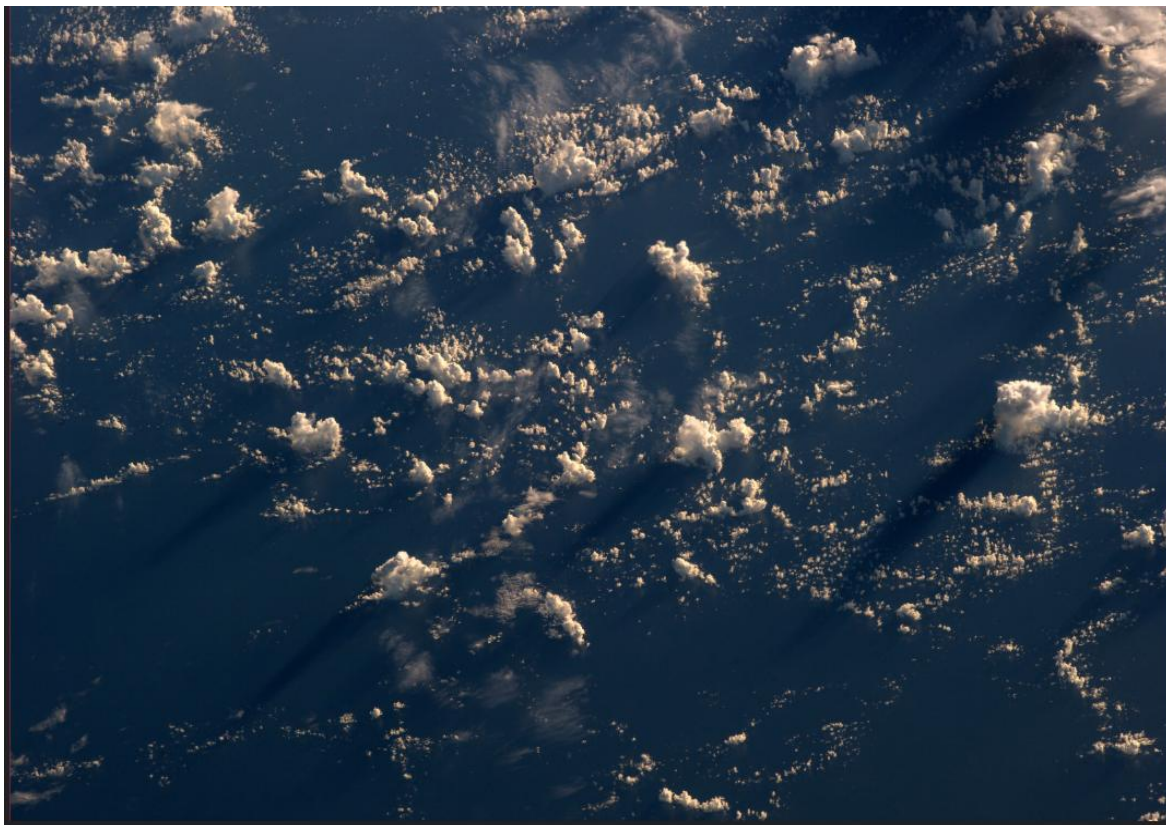


Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives – Rapport de l'Académie des sciences



Proposition d'illustration de couverture. Cloud shadows.

Crédits : Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center

Sommaire

Sommaire	2
Résumé exécutif.....	3
Recommandations	5
Introduction.....	6
Partie 1 : Les méthodes de modification du rayonnement solaire - SRM	9
1. Les principes et bases scientifiques	9
2. Les atouts envisagés et justifications avancées.....	11
3. Les limites, risques et objections	11
4. Synthèse scientifique, ouvertures sociétales et recommandations	13
Partie 2 : Les méthodes d'élimination et stockage à long terme du dioxyde de carbone - CDR.....	16
CDR - Chapitre 1 - Le stockage de carbone organique dans la biomasse terrestre et les sols.....	18
1. Les principes et bases scientifiques	18
2. Les atouts envisagés et justifications avancées.....	19
3. Les limites, risques et objections	21
4. Synthèse des connaissances scientifiques et recommandations.....	23
Préambule aux CDR-Chapitres 2 et 3 : Le puits de carbone océanique : présentation et bases scientifiques des méthodes visant à accroître son efficacité.....	24
CDR - Chapitre 2 : Le stockage de carbone dans l'océan par des méthodes biologiques	27
1. Les principales méthodes envisagées : atouts et limites	27
2. Synthèse des connaissances et recommandations.....	28
CDR - Chapitre 3 : Altération provoquée des roches (AP) et alcalinisation de l'océan (AO)	30
1. Altération provoquée des roches : principes, atouts et limites	30
2. Alcalinisation de l'océan : principes, atouts et limites	31
3. Synthèse et recommandations	33
Synthèse des recommandations pour le CDR.....	34
Partie 3 : Les méthodes de captage, stockage et valorisation du CO ₂ – CCUS	35
Le captage direct du CO ₂ dans l'air - DAC.....	36
Les méthodes de valorisation du CO ₂ - CCU	36
Le stockage du CO ₂ - CCS	37
1. Les étapes du stockage de CO ₂	37
2. Le potentiel de stockage de CO ₂	39
Les limites, risques et objections	42
Synthèse et recommandations.....	42
Conclusion	45
Références bibliographiques	48
Annexes	54
Liste des contributeurs	54
Experts auditionnés	54
Liste des figures et tableaux.....	55
Listes des abréviations, acronymes, formules et symboles	55
Lexique	56

Résumé exécutif

Les effets du changement climatique s'intensifient, induisant une menace grandissante pour les sociétés humaines et les écosystèmes. Pourtant, les politiques publiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), ou politiques d'atténuation, ne sont aujourd'hui pas suffisantes pour respecter l'objectif de l'Accord de Paris qui vise à limiter le réchauffement sous 2°C, avec l'aspiration à renforcer les efforts pour le contenir à 1,5°C.

Dans ce contexte, en parallèle des efforts de réduction des émissions de GES et des besoins d'adaptation au changement climatique, un ensemble de méthodes d'intervention directe à l'échelle planétaire sur le système climatique, regroupées sous l'expression de *géo-ingénierie climatique*, suscite un intérêt croissant, mais également des controverses dans un contexte de fortes incertitudes. Au sens large¹, trois grandes familles d'approches sont distinguées : (i) les techniques visant à contrebalancer l'effet réchauffant des GES par une modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Modification* - SRM), (ii) les méthodes d'élimination et de stockage à long terme du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique (*Carbon Dioxide Removal* - CDR) qui cherchent à réduire la concentration atmosphérique de ce GES et (iii) les technologies de captage, stockage et valorisation du carbone (*Carbon Capture, Utilisation and Storage* - CCUS) qui consistent à capter les émissions de CO₂ à la source, dans le but de les stocker durablement, ou de les réutiliser pour la fabrication de certains produits en remplacement de sources de combustibles fossiles.

L'Académie des sciences a souhaité examiner avec rigueur les fondements scientifiques, les bénéfices potentiels, les limites et les risques de ces approches. Il apparaît que, à quelques exceptions près, aucune ne peut aujourd'hui être déployée à grande échelle sans faire peser des risques importants en raison d'incertitudes majeures sur le plan scientifique, environnemental et géopolitique.

Les méthodes de SRM, bien que théoriquement efficaces pour ralentir le réchauffement, ne sont pas encore matures technologiquement et soulèvent des questions éthiques, politiques et sociales majeures. Les effets régionaux et globaux de ces techniques sur le cycle hydrologique et la chimie de l'atmosphère restent très mal connus. Les incertitudes sur les délais de mise en œuvre et la perspective d'un déploiement multiséculaire constituent une préoccupation majeure. Surtout, le risque d'une interruption soudaine du SRM, qui entraînerait un réchauffement brutal de la Terre aux conséquences catastrophiques pour les sociétés humaines et les écosystèmes, est à considérer avec un grand sérieux. La mise en œuvre du SRM risquerait, en outre, de freiner les efforts indispensables de réduction des émissions de GES en nourrissant l'illusion d'un remède rapide, sans régler pour autant l'origine du problème et l'acidification de l'océan.

Les méthodes de CDR apparaissent nécessaires pour atteindre la neutralité carbone en contrebalançant les émissions issues notamment des activités pour lesquelles il n'existe pas encore de technologie bas-carbone accessible techniquement ou économiquement (émissions résiduelles).

¹ Les méthodes dites de Captage, valorisation et stockage du carbone (CCUS) visent principalement (à l'exception du captage direct dans l'air (DAC) et de la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS) qui relèvent du CDR à condition qu'elles s'accompagnent d'un stockage durable du CO₂) à éviter des émissions de CO₂ plutôt qu'à retirer du CO₂ déjà présent dans l'atmosphère. À ce titre, elles sont globalement considérées comme des leviers d'atténuation du changement climatique plutôt que comme des approches de *géo-ingénierie climatique* au sens strict (Voir notamment Smith et al., [2024] pour une présentation de la typologie des méthodes). Elles contribuent néanmoins à une stratégie globale de réduction des concentrations de CO₂ atmosphérique, et c'est à ce titre que l'Académie des sciences a souhaité les inclure dans le périmètre de ce rapport.

Elles permettront éventuellement de faire redescendre légèrement la température, après avoir dépassé un certain niveau de réchauffement planétaire, quelques dixièmes de degrés ou moins. Elles pourraient aussi aider à compenser une partie des émissions de GES induites par les réactions naturelles du climat dans un monde plus chaud, notamment en cas de rétroactions amplificatrices du cycle* du carbone par la transformation de puits naturels de carbone en sources (par exemple lors du dégel des sols gelés). Leur efficacité, leur coût, leur faisabilité à grande échelle et leurs répercussions environnementales restent cependant très variables selon les techniques considérées.

Enfin, les méthodes de CCUS, qui visent à réduire les émissions résiduelles de certaines industries voire, dans une moindre mesure pour le moment, à capter directement du CO₂ dans l'atmosphère grâce à des technologies encore émergentes, sont considérées à l'échelle mondiale, principalement comme un ensemble de leviers d'atténuation. Leur déploiement présente néanmoins encore de sérieuses limites techniques et géophysiques, des coûts élevés, et reste contraint par des enjeux d'acceptabilité sociale et environnementale.

L'Académie des sciences souligne que la géo-ingénierie climatique ne peut en aucun cas se substituer aux politiques de réduction des émissions de GES et de préservation de la capacité de stockage de carbone des écosystèmes (puits naturels), ni aux efforts pour renforcer les capacités d'adaptation au changement climatique et de gestion de risques indispensables pour limiter les pertes et dommages. Certaines approches de CDR et de CCUS pourraient jouer un rôle notable. En revanche, les options de SRM ne doivent pouvoir faire l'objet que de recherches strictement encadrées, en s'abstenant de déploiement opérationnel.

Recommandations

L'Académie des sciences rappelle que la priorité absolue doit être donnée aux changements structurels et au déploiement de mesures permettant la réduction massive des émissions de gaz à effet de serre (GES) et l'adaptation au réchauffement et à ses conséquences.

Elle recommande :

S'agissant des méthodes de modification du rayonnement solaire (SRM), de :

Recommandation SRM 1 - Promouvoir un accord international visant à interdire toute initiative, publique ou privée, de déploiement du SRM, quel qu'en soit le cadre ou l'échelle. Pour ce faire, l'ensemble de la communauté scientifique devra être impliquée.

Recommandation SRM 2 - Soutenir et approfondir les recherches sur le climat, les processus physico-chimiques de l'atmosphère et la biodiversité afin de pouvoir évaluer rigoureusement le potentiel et les risques du SRM.

Recommandation SRM 3 - Renforcer la recherche sur l'éthique, les risques et les mesures d'atténuation des risques liés à toute forme d'expérimentation climatique que l'Académie des sciences rejette explicitement quels qu'en soient l'échelle, la nature ou l'initiateur.

Par ailleurs, la recherche sur le climat, sa perturbation par les activités humaines et sa modélisation devant bénéficier d'un soutien prioritaire (recommandation SRM 2), l'Académie des sciences considère donc qu'il est inutile de labelliser une recherche spécifiquement SRM qui, en outre, n'a aucune légitimité en tant qu'option d'intervention.

S'agissant des méthodes d'élimination et stockage à long terme de carbone (CDR), de :

Recommandation CDR 1 - Soutenir la recherche sur les différentes méthodes de stockage dans la biomasse vivante terrestre et les sols, qui sont à ce jour les seules immédiatement implémentables à moindre coût et avec de nombreux co-bénéfices, afin d'évaluer rigoureusement leur coût, leur efficacité, leur durabilité, leur acceptabilité sociale et leurs conséquences environnementales.

Recommandation CDR 2 - Poursuivre la recherche sur les mécanismes biogéochimiques marins afin d'évaluer la durabilité et l'efficacité nette des méthodes de stockage qui pourraient être exploitées.

S'agissant des méthodes de captage, stockage et valorisation du carbone (CCUS), de :

Recommandation CCUS 1 - Accélérer l'identification et la caractérisation des capacités de stockage géologique en France et en Europe.

Recommandation CCUS 2 - Concernant le captage direct du CO₂ atmosphérique (DAC) : renforcer la recherche technologique et l'expérimentation tout en clarifiant les conditions de faisabilité d'ordre économique et environnemental.

Par ce rapport, l'Académie des sciences réaffirme son engagement à mettre la science au service de la décision politique, non comme un instrument de justification de solutions risquées, mais comme un outil d'orientation vers des politiques climatiques responsables, à la hauteur des défis à venir.

Cette contribution a pour objectif d'alimenter un débat éclairé sur le rôle potentiel de la géo-ingénierie dans les stratégies climatiques à venir. Si ce document ne se substitue pas à la lecture des rapports spécialisés issus des travaux des experts en climatologie, il vise à offrir un support de réflexion pour mieux appréhender les enjeux politiques, sociaux et environnementaux liés à ces technologies.

Introduction

L'accumulation de chaleur dans le système climatique est due aux activités humaines et découle des émissions de gaz à effet de serre* (GES) [IPCC, 2021 ; Forster et al., 2023, 2024, 2025]. Le réchauffement de la dernière décennie a atteint 1,24°C au-dessus du niveau de 1850-1900, dont 1,22°C sont attribués à l'influence humaine. Le réchauffement atteint 1,36°C en 2024 et cette température record résulte de la superposition de la tendance décrite liée aux activités anthropiques avec la variabilité naturelle du climat. Il atteindra 1,5°C au cours des prochaines années.

En raison de l'accumulation de chaleur dans l'océan, ce réchauffement est irréversible. Chaque incrément de réchauffement supplémentaire entraîne des conséquences immédiates : augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, sécheresses, pluies extrêmes, conditions propices aux incendies. Il entraîne aussi des conséquences à long terme, en raison de la réponse lente de l'océan profond, des glaciers et des calottes du Groenland et de l'Antarctique, dont les contributions respectives à la montée du niveau de la mer, déjà inéluctable, s'accroissent et s'accroissent.

En l'état actuel des connaissances, une des conditions clés pour stabiliser le réchauffement climatique est de ramener le bilan global des émissions de CO₂ liées aux activités humaines à zéro² en 2050³. Tout retard dans cette trajectoire rend plus probable le dépassement des objectifs fixés par l'Accord de Paris, qui visent à limiter le réchauffement climatique largement sous 2°C, avec l'aspiration à renforcer les efforts pour le contenir à 1,5°C, et à éviter ses répercussions les plus graves sur les sociétés humaines et les écosystèmes. Les risques encourus – qui concernent l'approvisionnement en eau, la sécurité alimentaire, la santé, la dégradation des écosystèmes et la préservation de la biodiversité, la sécurité des lieux de vie – sont directement liés au niveau de réchauffement et les impacts observés s'aggravent déjà. En France, le 7^e rapport du Haut conseil pour le climat (HCC), publié au début de l'été, souligne à la fois l'affaiblissement du pilotage de l'action climatique et l'aggravation des impacts du changement climatique, appelant à une relance urgente de l'action nationale [HCC, 2025]. En outre, dans un avis rendu récemment⁴, la Cour internationale de justice considère que c'est à l'aune de l'objectif de l'Accord de Paris (limiter le réchauffement à 1,5°C) que s'évaluent les obligations des États ainsi que leurs devoirs de réparation en cas de manquement. Cet avis établit un lien étroit entre protection des droits humains, protection de l'environnement et lutte contre le changement climatique, élargit la notion d'équité à celle entre générations, et consacre explicitement la responsabilité des États dans la mise en place d'un cadre réglementaire pour les acteurs privés et les énergies fossiles.

Pourtant, l'extrapolation des politiques publiques déjà en place, sans tenir compte des engagements ou des reculs récents, impliquerait un dépassement rapide de 1,5°C, puis un dépassement de 2°C vers 2050, et conduirait à plus de 3°C en 2100 [UNEP, 2024].

Face à ces défis, en parallèle des nécessaires efforts pour la réduction des émissions à la source et pour l'adaptation* au changement climatique, certains acteurs - souvent extérieurs au monde de la

² La situation d'équilibre où les émissions de CO₂ d'origine anthropique seraient compensées par la quantité de CO₂ retirée de l'atmosphère et piégée par l'intervention humaine est appelée « neutralité carbone » (ou « zéro émission nette de dioxyde de carbone »). Cet objectif guide les stratégies climatiques nationales et internationales.

³ « Net zéro 2050 » correspond à une limitation du réchauffement à 1,5°C [IPCC, 2023].

⁴ Avis de la Cour internationale de justice en date du 23 juillet 2025 : [La Cour donne son avis consultatif et répond aux questions posées par l'Assemblée générale](#).

recherche - envisagent des méthodes d'intervention directe sur le système climatique à l'échelle planétaire pour limiter le réchauffement global. Cette *géo-ingénierie climatique* suscite aujourd'hui un intérêt croissant, mais également des controverses dans un contexte de fortes incertitudes. Souvent présentées comme des outils de dernier recours, ces méthodes posent des questions fondamentales, tant sur leur faisabilité et leur efficacité que sur leurs conséquences à long terme. Ainsi, l'enjeu dépasse largement la sphère scientifique : il touche aux choix politiques et sociétaux, aux inégalités environnementales et aux risques d'une dépendance technologique irréversible.

Plusieurs familles d'approches de *géo-ingénierie climatique* sont envisagées. Une vise à modifier le bilan radiatif de la Terre (*Solar Radiation Modification* ou SRM) en réduisant la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre afin de contrebalancer l'effet réchauffant des GES. Une autre consiste à abaisser la concentration de CO₂ présent dans l'atmosphère (*Carbon Dioxide Removal* ou CDR) en le séquestrant durablement dans différents réservoirs*. Enfin, une autre famille de méthodes, dites de captage, stockage et valorisation du carbone (*Carbon Capture, Utilisation and Storage* ou CCUS), vise à réduire les émissions résiduelles de secteurs industriels difficiles à décarboner, voire à capter directement le CO₂ dans l'atmosphère mais avec une ampleur limitée à ce jour dans l'attente des technologies adéquates. Ces méthodes relèvent ainsi essentiellement de l'atténuation*, plus que de techniques de *géo-ingénierie* au sens strict.

Alors que certaines méthodes s'appuient sur des phénomènes naturels qu'elles tentent d'amplifier ou d'accélérer (ex : altération des roches, alcalinisation de l'océan ou séquestration de CO₂ par les êtres vivants), d'autres font appel à des processus technologiques (ex : injection d'aérosols* dans la stratosphère).

Toutes ces interventions soulèvent de nombreuses questions et ne peuvent être envisagées sans une évaluation rigoureuse de leur faisabilité, des moyens (souvent lourds à mettre en œuvre), de leur gouvernance, de leurs effets collatéraux et des enjeux éthiques qu'elles impliquent.

Pourtant, la plupart des rapports d'analyse se focalisent sur des aspects techniques isolés, sans considérer les répercussions régionales et globales, à moyen et long terme. Les bilans d'efficacité de ces techniques et de leur coût énergétique et financier sont à l'état d'ébauche. Cette approche fragmentée freine une prise de conscience des véritables enjeux et est à l'origine d'une représentation biaisée des solutions proposées.

Il est indispensable de rappeler dans ce préambule que l'atmosphère ne connaît pas de frontière. Aucun mur n'arrête les GES, qu'ils soient produits en France, en Europe ou ailleurs dans le monde. Ainsi, les actions engagées pour réduire ces émissions, tout comme les méthodes d'ingénierie visant à amoindrir leur impact, doivent être évaluées à la lumière de deux critères majeurs : efficacité propre et répercussions globales potentielles.

Si de nombreuses questions font aujourd'hui l'objet de réponses consensuelles, d'autres, à l'instar de l'opportunité de développer une recherche dédiée à la *géo-ingénierie climatique*, demeurent débattues au sein même de la communauté scientifique. Cette divergence ne traduit ni une fragilité de la science ni un goût particulier pour la controverse, mais révèle le degré d'incertitude associé à certains mécanismes, justifiant la nécessité d'élargir le champ des observations, de renforcer l'acquisition de données, d'améliorer les modèles et d'approfondir notre compréhension des interactions entre climat, biosphère et dynamiques sociétales. Une telle démarche appelle à une mobilisation conjointe et soutenue des disciplines concernées.

Dans ce contexte, l'Académie des sciences a souhaité examiner avec rigueur les fondements scientifiques, les promesses, les risques et les limites des principales méthodes de *géo-ingénierie*

climatique envisagées. À l'issue de l'audition d'experts incontournables de ces thématiques et de l'analyse de la bibliographie scientifique, elle propose une analyse structurée selon quatre axes pour chacune des grandes techniques du SRM (partie 1), du CDR (partie 2) et du CCUS (partie 3) : (i) les bases scientifiques des procédés, (ii) les arguments avancés en faveur de leur utilisation, (iii) les risques, objections et limites soulevés, et enfin (iv) une synthèse accompagnée de recommandations. La distinction entre savoir scientifique établi et incertitude est particulièrement fondamentale alors qu'il s'agit de prendre des décisions relatives à des enjeux planétaires dont les conséquences seraient majeures pour l'humanité.

Dans ce rapport, les termes désignés par un astérisque lors de leur première occurrence (ex : albédo) sont définis dans [un lexique](#).*

Partie 1 : Les méthodes de modification du rayonnement solaire - SRM

Les méthodes de modification du rayonnement solaire⁵, ou plus simplement SRM (selon l'acronyme anglais pour *Solar Radiation Modification*), visent à refroidir la Terre en augmentant artificiellement sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire au niveau de sa surface ou au niveau de son atmosphère (albédo*). L'évaluation du potentiel, des limites et des risques du SRM repose aujourd'hui sur une base déjà solide de connaissances scientifiques concernant (i) le cas général de la physique du climat et du changement climatique et (ii) la réponse spécifique du climat à un déploiement hypothétique du SRM.

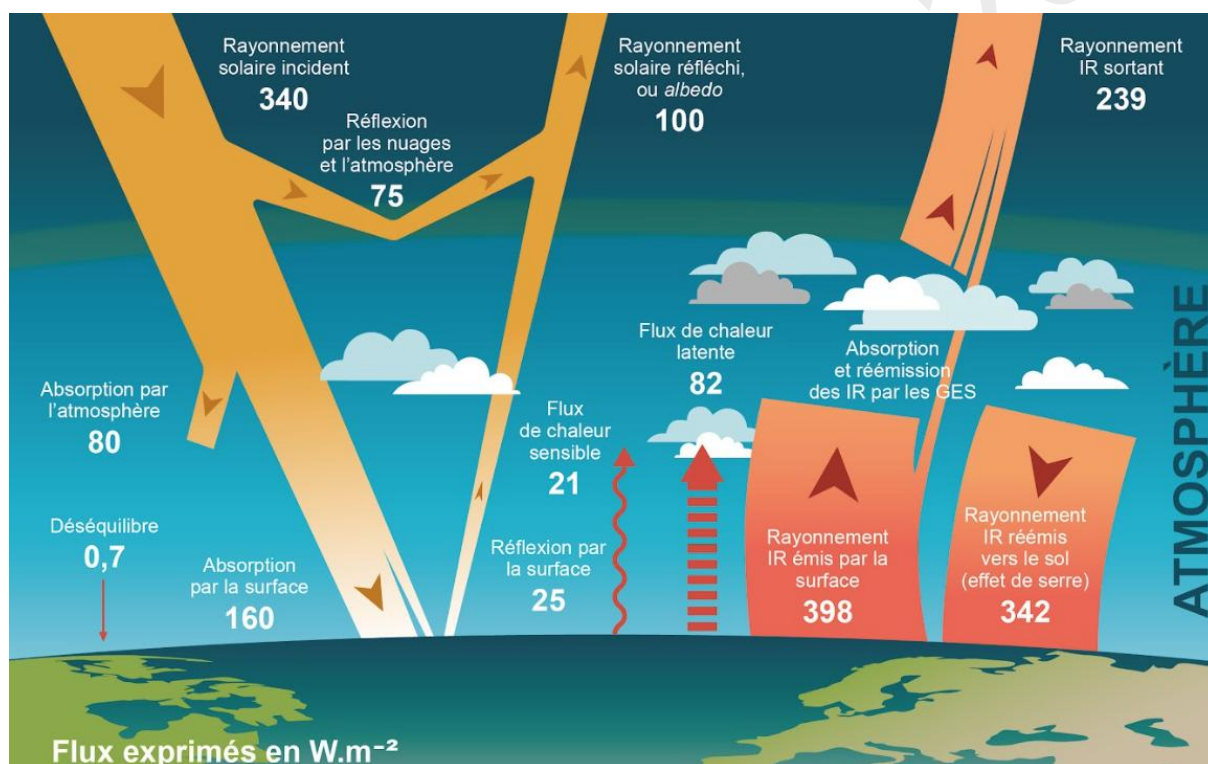


Figure 1.1 : Les principaux éléments du bilan radiatif terrestre. Traduit d'après IPCC [2021].

Lorsqu'il atteint la Terre, le rayonnement solaire incident (en jaune) est en partie réfléchi par l'atmosphère, les nuages ou la surface (albédo) et en partie absorbé par la surface terrestre. Cette fraction d'énergie absorbée est réémise sous forme de chaleur par (i) flux sensible (conduction), (ii) flux latent (évaporation) et (iii) rayonnement infrarouge ou IR. En interagissant avec le rayonnement IR, les GES (H_2O , CO_2 , CH_4 , etc.) réduisent le flux IR émis vers l'espace, contribuant à l'élévation de la température moyenne de la planète : c'est l'effet de serre. L'augmentation de la concentration atmosphérique des GES due aux activités humaines induit un effet de serre additionnel, qui contribue au réchauffement climatique en cours.

1. Les principes et bases scientifiques

La figure 1.1 fournit un aperçu général des principaux éléments du bilan radiatif terrestre. Le déséquilibre de ce bilan, causé principalement par l'augmentation des concentrations de GES dans

⁵ On peut également trouver dans la littérature la notion de "gestion du rayonnement solaire" (*solar radiation management*). Cette expression, qui suggère une capacité de contrôle, minimise l'incertitude associée à la réponse climatique aux injections d'aérosols stratosphériques, ainsi qu'au type d'injection. Afin de refléter plus fidèlement l'état des connaissances scientifiques, de ne pas présupposer une maîtrise technologique, et conformément à la terminologie adoptée par le GIEC, l'expression "modification du rayonnement solaire" (*solar radiation modification*) s'est imposée dans ce rapport.

l'atmosphère, est à l'origine du réchauffement climatique. Diverses méthodes, regroupées sous l'acronyme SRM, visent à limiter celui-là, avec des amplitudes variables (figure 1.2) : alors que certaines techniques visent à utiliser des peintures blanches pour augmenter le pouvoir réfléchissant (albédo) des surfaces urbaines (toits, sols), d'autres envisagent de déployer à grande échelle des dispositifs techniques (installation de miroirs dans l'espace) et d'autres encore entendent injecter des aérosols dans l'atmosphère à plus ou moins haute altitude. Pour ces dernières, selon les approches, cette injection est prévue dans les basses couches de l'atmosphère, dans le but de rendre les nuages bas plus réfléchissants, ou dans la très haute atmosphère, au-dessus des nuages, au niveau de la basse stratosphère, afin de réfléchir une partie du rayonnement solaire à la manière des aérosols émis par des éruptions volcaniques [Robock, 2000]. En effet, les éruptions explosives majeures injectent des gaz soufrés dans la stratosphère qui se transforment rapidement en aérosols réfléchissant le rayonnement solaire incident. Le refroidissement global de la Terre causé par les éruptions volcaniques (après retrait de l'influence de la variabilité naturelle du climat) est estimé à 0,2-0,3°C au maximum, et le pic de refroidissement causé en 1992 par l'éruption du Mont Pinatubo (1991) est estimé à 0,3-0,5°C [Haywood & Tilmes, 2022]. Ce refroidissement n'est que temporaire (2-3 ans), les aérosols injectés lors de l'éruption finissant par être lessivés et disparaître de l'atmosphère.

D'autres techniques visent à modifier, au moyen d'aérosols, des nuages de haute altitude (cirrus) pour les rendre moins opaques au rayonnement infrarouge (IR)⁶.

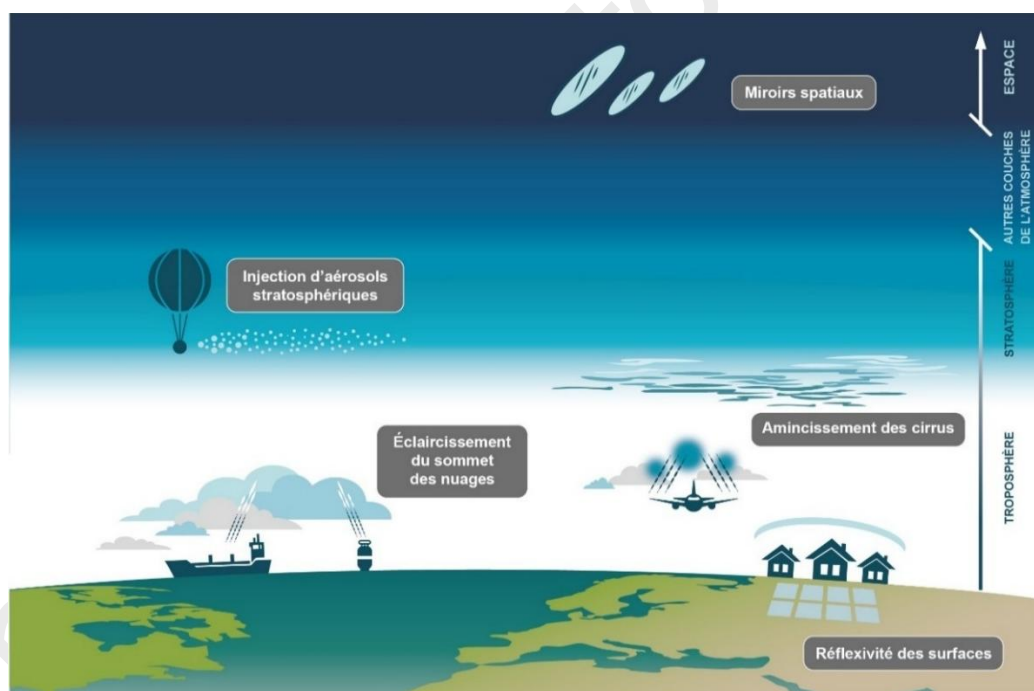


Figure 1.2 : Les options technologiques proposées pour le SRM. Traduit d'après SAPEA [2024].

Les techniques considérées aujourd'hui comme les plus aisément déployables, tout en suscitant une opposition des scientifiques assez générale, sont celles consistant à injecter des aérosols à plus ou moins haute altitude. Ce sont ces approches qui sont examinées dans le présent chapitre.

La compréhension de la réponse du climat aux perturbations radiatives s'appuie sur plusieurs décennies de recherche ayant permis de développer des théories solides, fondées à la fois sur de

⁶ Au sens strict, cette technique, qui consiste à modifier la composante infrarouge et non solaire du bilan radiatif de la Terre, n'entre pas à proprement parler dans le cadre des techniques de SRM. Toutefois elle est généralement considérée dans ce cadre et c'est à ce titre qu'elle est mentionnée ici.

nombreuses observations et mesures, ainsi que de nombreuses simulations numériques. Les connaissances spécifiques concernant la réponse climatique aux méthodes SRM s'appuient, quant à elles, sur un vaste corpus de simulations numériques, en particulier celles réalisées depuis 2011 dans le cadre du projet GeoMIP⁷, qui ont déjà fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Ces connaissances restent associées à une forte incertitude [Määttä et al., 2024]. Toutefois, l'ensemble de ces avancées scientifiques permet d'ores et déjà de tirer des conclusions sur l'efficacité et les risques des méthodes de SRM, et de faire des recommandations sur la pertinence d'un déploiement de ces techniques et du développement des recherches associées.

2. Les atouts envisagés et justifications avancées

Les méthodes de SRM sont effectivement capables de refroidir la Terre, et ce sur des échelles de temps courtes. Leur efficacité dépend de l'intensité du déploiement : plus celui-ci est important, plus les effets seront rapides et marqués. Toutefois, la durée de vie limitée des aérosols dans l'atmosphère (au plus quelques années dans la stratosphère, beaucoup moins dans la troposphère) impose des injections en continu pour obtenir un effet capable de compenser le réchauffement causé par l'accumulation des GES. Différents scénarios de déploiement du SRM ont été proposés. Ils diffèrent par leur méthodologie, intensité, moment de déclenchement ou durée.

3. Les limites, risques et objections

Dans la littérature actuelle, le SRM peut être présenté comme une mesure provisoire, impliquant un déploiement modéré. L'étude de Baur et al. [2023] montre pourtant que dans tous les scénarios qui utilisent le SRM pour éviter de dépasser l'objectif de réchauffement de 1,5 °C, le déploiement devrait être maintenu plus de 100 ans, même dans les conditions de réponses climatiques les plus favorables. L'évolution de l'atténuation, la disponibilité future des technologies de captage du carbone⁸ et la réversibilité climatique resteront incertaines au moment du lancement et il est impossible de prévoir combien de temps durerait un déploiement de SRM dit temporaire. Tout déploiement comporte donc un risque d'héritage multiséculaire, engageant plusieurs générations face aux coûts, aux risques et aux effets secondaires du SRM.

Le risque majeur de « choc terminal* ». Établi sur la base de connaissances scientifiques robustes, il s'agit, et de loin, du risque majeur du SRM. L'attrait du SRM par injection d'aérosols stratosphériques réside dans sa capacité à produire des effets climatiques rapides et marqués. Toutefois, étant donné que le carbone s'accumule dans l'atmosphère alors que les aérosols ne s'accumulent pas, pratiquer le SRM exige d'injecter toujours plus d'aérosols pour compenser l'effet des GES sur la température terrestre⁹, et ce pendant des centaines ou milliers d'années. Or il est aujourd'hui établi [Matthews & Caldeira, 2007 ; Robock et al., 2008 ; Ross et al., 2009 ; Jones et al., 2013] qu'une interruption du déploiement, alors que les concentrations en GES restent élevées, entraînerait inévitablement un rattrapage climatique, appelé « choc terminal », caractérisé par un réchauffement global extrêmement rapide, bien plus rapide qu'un réchauffement progressif sans SRM (2 à 15 fois plus rapide selon l'ampleur du déploiement) [IPCC, 2021].

Le choc terminal induirait également des changements climatiques rapides et inégaux selon les régions, bien trop soudains pour que les sociétés humaines et les écosystèmes aient le temps de s'y adapter. Il en résulterait un « chaos climatique » dont les conséquences à l'échelle mondiale seraient

⁷ Pour *Geoengineering Model Intercomparison Project*. Voir <https://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/publications.html>.

⁸ Ces méthodes seront envisagées dans les chapitres suivants.

⁹ Tant que des méthodes ayant prouvé leur efficacité dans le captage et le stockage du carbone de l'atmosphère à grande échelle ne seront pas déployées (voir Partie 2 du présent rapport).

majeures tant sur les sociétés humaines que sur la biodiversité [Trisos et al., 2018 ; Pierrehumbert, 2019]. Le risque de choc terminal est présent dès lors que le SRM est déployé alors que les concentrations en GES demeurent élevées, et ce quelle que soit la méthode (injection d'aérosols dans la stratosphère ou dans les nuages). Ainsi, l'arrêt soudain du déploiement, en raison d'une défaillance technique ou d'un désaccord sur sa maintenance, entraînerait une augmentation rapide de la température et des précipitations à l'échelle mondiale, ainsi qu'une réduction de la superficie des glaces marines.

Au regard de ce risque, les incertitudes discutées ci-après paraissent moindres. Un déploiement intermittent ou non concerté du SRM risquerait d'accroître également la variabilité climatique [Määttänen et al., 2025], ce qui serait susceptible d'entraîner des répercussions sur la production alimentaire.

Incertitudes sur les effets régionaux. Les effets du SRM sur les modifications régionales des régimes de précipitations sont difficiles à prévoir car ces changements restent dépendants des caractéristiques du déploiement (ex : distribution en altitude et en latitude de l'injection des aérosols, propriétés de ceux-ci, notamment leur taille et leur composition). Cette incertitude est accrue par le fait qu'en absence d'uniformité de l'injection des aérosols à l'échelle de la planète, un hémisphère pourrait devenir plus brillant que l'autre, conduisant, en plus des conséquences locales, à une modification à distance de la position des zones de pluies tropicales et des moussons [ex : Haywood et al., 2013]. Par ailleurs, il est déjà établi, sur la base de mécanismes physiques fondamentaux, que le SRM ne permet pas de compenser totalement les changements de précipitation associés à l'augmentation des GES [Bala et al., 2008 ; Bony et al., 2013 ; Vioni et al., 2021].

Incertitudes sur l'effet des aérosols sur l'albédo des nuages bas. Il est encore très difficile d'évaluer avec précision l'efficacité de l'injection d'aérosols dans l'augmentation du pouvoir réfléchissant (albédo) des nuages bas. En effet, les nuages réagissent de manière complexe à ce type d'intervention et les réactions dépendent fortement des conditions météorologiques et climatiques locales [Wan et al., 2024 ; Feingold et al., 2024]. De plus, certains de ces mécanismes restent mal compris et sont encore mal représentés dans les modèles climatiques. Par conséquent, à ce jour, les connaissances disponibles ne permettent pas de déterminer la quantité et les propriétés des aérosols requises pour induire un effet de refroidissement donné. Cette incertitude est en grande partie liée à notre connaissance encore incomplète des processus nuageux.

Incertitudes relatives aux effets sur la couche d'ozone et la santé des populations humaines et des milieux. Une modification de la composition chimique de l'atmosphère induite par l'injection d'aérosols est susceptible d'entraîner des conséquences néfastes sur la santé humaine et plus largement sur les organismes vivants, en entraînant une augmentation des pluies acides, en contribuant à la destruction de la couche d'ozone et en affectant la végétation [Haywood & Tilmes, 2022 ; Bednarz et al., 2023].

Incertitudes quant aux effets des aérosols sur la production d'électricité d'origine solaire. L'injection d'aérosols dans la stratosphère est susceptible d'affecter l'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'électricité (énergie photovoltaïque et concentration d'énergie solaire) [Baur et al., 2024], affectant d'autant les capacités de décarbonation de nos économies.

Une famille de méthodes sans effet sur les taux de GES dans l'atmosphère. Les méthodes de SRM s'attaquent uniquement aux effets thermiques du réchauffement (symptômes) sans en traiter sa cause profonde : ne modifiant pas les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, ces méthodes ne réduisent en rien les problèmes d'acidification de l'océan qui en découlent.

Autres incertitudes majeures : coûts, faisabilité et efficacité. Le déploiement de SRM a été envisagé pour diminuer le rythme du réchauffement ou éviter de dépasser certains niveaux de réchauffement, en complément d'efforts d'atténuation, mais avec un manque de connaissances sur les scénarios socio-économiques sous-jacents et leurs interactions, et une absence de méthodologie permettant d'analyser les risques liés au SRM par rapport aux risques climatiques.

De plus en plus d'industriels, souvent des start-ups, se lancent dans des approches expérimentales, dites de démonstration, dont le coût ne semble pas prohibitif. Réalisées à des échelles spatiales très limitées, ces expérimentations sont le plus souvent non concluantes. Cependant, elles risquent d'être conduites à plus grande échelle, financées par des fonds souverains ou de richissimes fondations. Malgré l'apparent attrait économique de ces méthodes, et outre leur problème éthique et leurs risques, un problème majeur reste leur absence de maturité et, notamment, l'inexistence de transporteurs stratosphériques capables de réaliser ces injections dans la stratosphère [Smith et al., 2022]. De plus, leur prix global est probablement bien plus élevé que ne le laissent entendre les seuls coûts techniques : les coûts et les risques à intégrer incluent d'importantes responsabilités financières liées aux dommages induits, des défis politiques tant nationaux qu'internationaux, ainsi que la prise en compte des risques de cessation [Bronsther & Xu, 2025].

Par ailleurs, les évaluations de faisabilité, infrastructures, coûts et capacités de déploiement indiquent qu'il faudrait environ une décennie pour initier de tels dispositifs, et qu'un déploiement modéré n'aurait un effet discernable sur le climat qu'au bout d'une à deux décennies. Or, ce délai correspond également à l'échelle de temps nécessaire pour discerner le ralentissement du réchauffement qui résulterait d'une nette baisse des émissions mondiales de GES [Siegert et al., 2025].

4. Synthèse scientifique, ouvertures sociétales et recommandations

Les méthodes de modification du rayonnement solaire pourraient, en théorie, permettre de refroidir la Terre à court terme, mais au prix de risques considérables à long terme si la concentration des GES dans l'atmosphère restait élevée. Les risques sur les systèmes naturels et sur les sociétés humaines qui en dépendent sont extrêmement forts et la probabilité d'un chaos climatique incontrôlable est très élevée. Les bénéfices potentiels ne compenseraient pas les conséquences négatives probables, tant à l'échelle locale que globale.

Enjeux éthiques liés aux risques majeurs identifiés. À l'échelle mondiale, le poids de la maintenance et de la gouvernance du SRM ainsi que le risque de choc terminal font peser sur les générations futures des risques climatiques aux conséquences potentiellement catastrophiques sur les populations humaines et, plus largement, les écosystèmes. Cela engage une responsabilité éthique majeure [Gardiner, 2017 ; UNESCO, 2023]. L'existence de ce risque exige la mise en place d'une gouvernance internationale solide, durable et stable à l'échelle de plusieurs générations. Si plusieurs initiatives issues du monde scientifique ont proposé des codes de conduite et des cadres de gouvernance, aucune d'entre elles n'a, à ce jour, été reprise par une instance internationale de décision. En l'absence de garantie quant à la pérennité d'une gouvernance multilatérale à long terme, et en l'absence de certitude sur notre capacité à retirer et stocker le CO₂ de l'atmosphère à grande échelle, tout déploiement du SRM fait courir à l'humanité entière un risque inconsidéré. Ainsi, pour de nombreux spécialistes du climat, ces considérations, tant éthiques que scientifiques, suffisent à conclure qu'un déploiement, même limité, du SRM est inacceptable [ex : Pierrehumbert, 2019 ; SAPEA, 2024].

À l'échelle régionale, les effets différenciés que pourrait induire le SRM soulèvent une autre question éthique, liée cette fois à l'exercice de la gouvernance. Le risque que certains États ou groupes d'intérêt puissent être tentés de manipuler le SRM à des fins unilatérales, stratégiques ou géopolitiques, au détriment d'autres régions du monde, doit être considéré avec sérieux. À ce titre, ces technologies sont déjà perçues comme de potentiels outils de pression politique, géostratégique et militaire [de Guglielmo Weber et al., 2023].

Le SRM est un leurre climatique et non un investissement d'avenir. Le recours au SRM peut avoir des effets profondément contre-productifs sur la mise en place de politiques tangibles et concrètes d'atténuation et d'adaptation au changement climatique à long terme. Alors même que les efforts de décarbonation de nos économies et d'adaptation de nos sociétés devront s'intensifier dans les années à venir, le déploiement du SRM risque d'être perçu comme une possible justification d'un relâchement, voire d'un report, des actions nécessaires, et un facteur de fragilisation des engagements. Pourtant, un tel retard nécessiterait d'augmenter toujours plus la quantité d'aérosols nécessaire à la limitation du réchauffement, aggravant d'autant les conséquences de l'augmentation des GES sur l'acidification de l'océan et les risques de choc terminal.

Faut-il encourager la recherche sur le développement du SRM ? De façon générale, face à l'ampleur des défis climatiques, il est essentiel d'amplifier les efforts de recherche visant à mieux anticiper les conséquences des activités anthropiques sur le climat, les sociétés humaines et la biodiversité, et à définir des actions susceptibles de favoriser l'atténuation du réchauffement climatique ainsi que l'adaptation¹⁰.

Cependant, les incertitudes associées aux effets du SRM sur le climat ou la biodiversité sont, pour de nombreux aspects, identiques à celles posées par les éruptions volcaniques, l'augmentation des taux de GES dans l'atmosphère ou l'évolution régionale des quantités d'aérosols anthropiques. Dans ce contexte, renforcer les recherches sur le climat et les écosystèmes dans leur ensemble semble plus pertinent que de développer un programme spécifique au SRM.

La communauté scientifique n'est pas unanime sur l'opportunité d'une recherche active sur le développement du SRM. Le risque de crédibiliser ou de légitimer *a priori* ces méthodes par l'existence même d'une recherche qui leur serait dédiée est réel, d'autant plus que l'ensemble des incertitudes et des risques associés au SRM est rarement abordé et rarement mentionné explicitement dans les projets ou articles [Visioni et al., 2023 ; Määttä et al., 2024]. Même si certains effets du SRM pourraient être mieux compris et maîtrisés grâce à un approfondissement des recherches, (i) une grande part de ces connaissances peut être acquise dans le cadre des travaux sur le climat et l'atmosphère non spécifiques au SRM et (ii) les connaissances acquises sur les effets du SRM permettent déjà de conclure de façon robuste que le risque de choc terminal inévitablement associé est trop élevé pour justifier un déploiement de ces techniques. Par ailleurs, les enjeux de gouvernance renforcent également l'argument contre leur mise en œuvre.

¹⁰ Sans occulter les limites aux options d'adaptation et les risques résiduels de pertes et de dommages et la manière d'y faire face.

À la lumière de tous ces éléments, l'Académie des sciences recommande de :

Recommandation SRM 1 - Promouvoir un accord international visant à interdire toute initiative, publique ou privée, de déploiement du SRM, quel qu'en soit le cadre ou l'échelle. Pour ce faire, l'ensemble de la communauté scientifique devra être impliquée.

Recommandation SRM 2 - Soutenir et approfondir les recherches sur le climat, les processus physico-chimiques de l'atmosphère et la biodiversité afin de pouvoir évaluer rigoureusement le potentiel et les risques du SRM.

Recommandation SRM 3 - Renforcer la recherche sur les questions éthiques, les risques et les mesures d'atténuation des risques liés à toute forme d'expérimentation climatique, que l'Académie des sciences rejette explicitement quels qu'en soient l'échelle, la nature ou l'initiateur.

Par ailleurs, la recherche sur le climat, sa perturbation par les activités humaines et sa modélisation devant bénéficier d'un soutien prioritaire (recommandation SRM 2), l'Académie des sciences considère donc qu'il est inutile de labelliser une recherche spécifiquement SRM qui, en outre, n'a aucune légitimité en tant qu'option d'intervention.

Partie 2 : Les méthodes d'élimination et stockage à long terme du dioxyde de carbone - CDR

Depuis le début de l'ère industrielle, le cycle naturel du carbone est perturbé par les activités humaines (figure 2.1), qui déséquilibrent le bilan global et induisent une accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. La compréhension du fonctionnement du système climatique montre une relation étroite entre le cumul dans le temps des émissions de CO₂ et l'évolution de la température planétaire, jusqu'à un réchauffement d'environ 2°C. Cette relation résulte de la fraction émise de CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère, de son effet radiatif et de la réponse du climat à ce forçage.

Ainsi, pour parvenir à limiter le réchauffement climatique, une condition géophysique nécessaire est d'atteindre la « neutralité carbone* » (ou *zéro émission nette de CO₂*), situation d'équilibre où les émissions de CO₂ anthropiques seraient compensées par la quantité de CO₂ retirée de l'atmosphère et piégée grâce aux interventions humaines. Cette notion guide désormais les stratégies climatiques nationales (voir Stratégie nationale bas carbone - SNBC¹¹) et internationales, et l'Accord de Paris (2015) a inscrit dans ses objectifs la nécessité d'atteindre un équilibre entre émissions et absorptions anthropiques de GES. L'utilisation de cette expression s'accompagne souvent de celle - peu intuitive - d'émission négative*. Faisant référence au retrait actif de GES de l'atmosphère, ce levier doit s'ajouter aux efforts de réduction des émissions afin de contrebalancer les émissions résiduelles et permettre de tendre vers l'objectif de neutralité à l'horizon 2050. Le niveau de réchauffement visé et l'horizon de neutralité carbone sont étroitement liés : limiter le réchauffement à 1,5°C impose d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et l'objectif de 2°C l'impose à l'horizon 2070.

Les écosystèmes terrestres et océaniques agissent comme puits* naturels de carbone. La réponse naturelle de ces derniers (hors gestion des écosystèmes) absorbe chaque année environ la moitié des émissions mondiales anthropiques de CO₂ [Friedlingstein et al., 2025]. Toutefois, leur efficacité est appelée à diminuer dans un contexte de réchauffement climatique, sous l'effet conjugué de la saturation physico-chimique de l'océan et du stress thermique et hydrique affectant la végétation et les sols. Si l'absorption absolue de carbone tend à croître avec l'élévation de la concentration atmosphérique en CO₂, l'efficacité relative de ces puits - c'est-à-dire la fraction des émissions anthropiques effectivement séquestrée - se réduit dans un contexte climatique plus chaud. Par ailleurs, dans un climat plus chaud, des rétroactions climatiques pourraient induire des rejets de GES, par exemple provenant des incendies de végétation, des zones humides ou du dégel des sols gelés. Dans ce contexte, la stabilisation du réchauffement planétaire demanderait une capacité d'élimination de CO₂ atmosphérique et de stockage à long terme (émissions négatives) visant à contrebalancer ces rétroactions amplificatrices, révélant le besoin d'une capacité préventive d'élimination du CO₂ de plusieurs centaines de gigatonnes [Schleussner et al., 2024].

La deuxième partie du rapport examine ainsi les méthodes de géo-ingénierie climatique qui, regroupées sous l'acronyme « CDR » (pour *Carbon Dioxide Removal*), visent à réduire la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère par des mécanismes naturels ou technologiques de séquestration à long terme du carbone. Cette partie examine différentes voies d'élimination du CO₂ atmosphérique (biologiques, géochimiques) et différents réservoirs de stockage (végétation, sols, sédiments terrestres ou océaniques, réservoirs géologiques, formes minérales) tandis que les méthodes industrielles de

¹¹ Pour en savoir plus, consulter le site du gouvernement français : [Stratégie nationale bas-carbone \(SNBC\) | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique](#).

captage, concentration et stockage de CO₂ - type BECCS et DACCS - seront abordées dans la partie 3 du présent rapport. La figure 3.3 illustre le périmètre de chaque méthode, son type de stockage et les perspectives offertes.

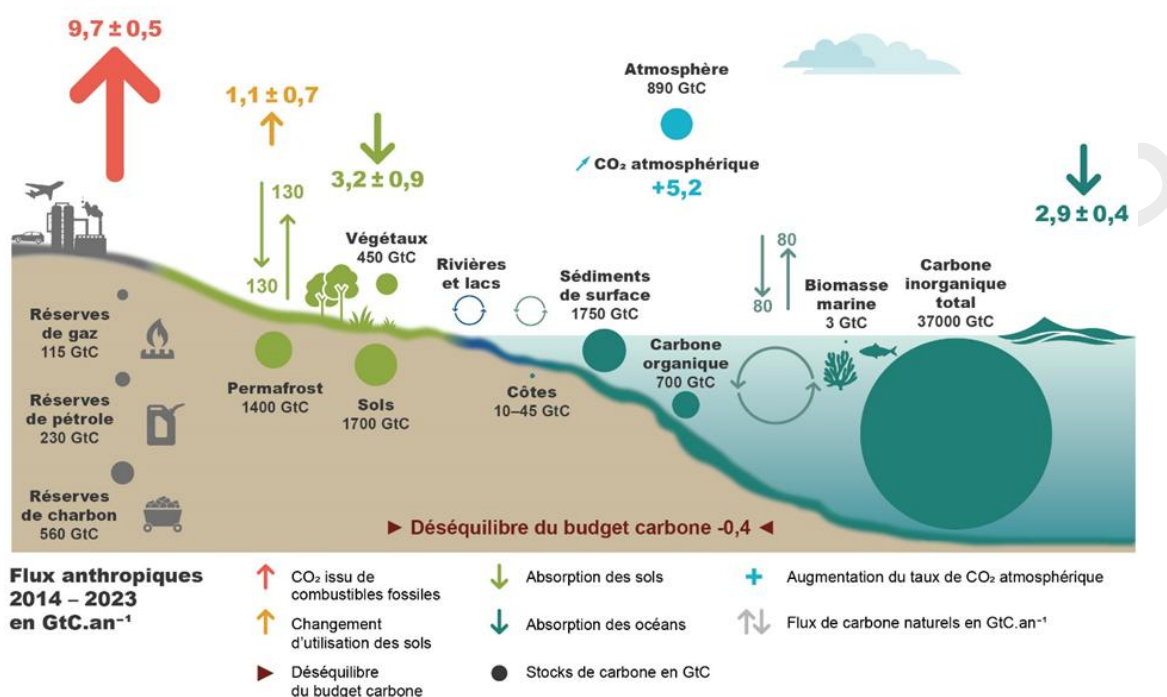


Figure 2.1: Schéma de la perturbation globale du cycle du carbone causée par les activités anthropiques, à l'échelle mondiale pour la décennie 2014-2023. Traduit d'après Friedlingstein et al., [2025].

Dans cette figure, sont représentés les principaux réservoirs de carbone, leur stock actuel (en GtC), et les flux qui les relient sous forme de flèches (en GtC.an⁻¹). Les flèches unidirectionnelles indiquent les flux d'origine anthropique (combustion d'énergies fossiles et exploitation des sols, en particulier déforestation), ainsi que l'absorption de CO₂ par l'océan, la biomasse et les sols. Ces flux se superposent aux flux naturels de carbone, à l'équilibre, représentés par les doubles flèches (respiration-photosynthèse, absorption-dissolution, etc.). Le déséquilibre du budget carbone¹² résulte de l'écart entre les émissions anthropiques estimées et le carbone effectivement séquestré par les puits naturels que sont les surfaces végétalisées et l'océan. En effet, en raison d'une couverture spatiale ou temporelle imparfaite des données, des incertitudes de chaque estimation, de l'origine différente des sources et méthodes employées pour chaque flux, et de la non prise en compte de certains termes de moindre ampleur, l'équilibre (*i.e* bilan nul) n'est pas atteint.

Les données peuvent être exprimées sur la base de quantités de C ou de CO₂ ; ces valeurs se déduisent l'une de l'autre par le rapport de la masse molaire du CO₂ sur celle du carbone. Pour convertir un nombre exprimé en GtC en GtCO₂, il faut le multiplier par 3,666 ($M(\text{CO}_2) / M(\text{C}) = (12 + 2 \times 16) / 12 = 3,666$).

À l'exception de la figure 2.1, les stocks et flux présentés dans le présent rapport sont exprimés respectivement en GtCO₂ et GtCO₂/an.

¹² Pour en savoir plus sur le budget carbone : [Stratégie nationale bas-carbone \(SNBC\)](#).

CDR - Chapitre 1 - Le stockage de carbone organique dans la biomasse terrestre et les sols

1. Les principes et bases scientifiques

Depuis le début de la révolution industrielle, les écosystèmes terrestres ont absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂, soit environ 807 GtCO₂. Toutefois, une quantité équivalente de CO₂ a été perdue dans l'atmosphère en raison de la déforestation et autres activités de changement d'usage des terres liées à l'expansion des terres agricoles. Le CO₂ séquestré par les plantes peut ensuite être stocké dans les sols sous forme de matière organique grâce à l'activité des organismes décomposeurs. La quantité de CO₂ que la végétation peut séquestrer chaque année varie cependant beaucoup en fonction des conditions météorologiques. Les vagues de canicules et les sécheresses qui se succèdent depuis le début du siècle partout dans le monde affectent la capacité des plantes à séquestrer le CO₂ car la photosynthèse et la croissance des plantes s'arrêtent dans ces conditions [Ciais et al., 2005 ; Meunier et al., 2024], voire la végétation meurt [Etzold et al., 2019]. Elles augmentent également la probabilité que le carbone séquestré reparte dans l'atmosphère sous l'effet de la combustion de la végétation desséchée lors d'incendies [Vallet et al., 2023]. Il a été par exemple estimé que les émissions de CO₂ par les incendies avaient triplé entre 2011 et 2023 dans toute la zone extratropicale [Matthew et al., 2024]. Le puits de carbone représenté par la végétation terrestre apparaît donc de plus en plus fragile [Forzieri et al., 2022].

Deux approches principales sont envisagées pour augmenter la séquestration de carbone par la végétation :

- Une augmentation des surfaces végétalisées à haut potentiel de séquestration par afforestation*, reforestation*, restauration des forêts dégradées et par la remise en prairies permanentes de terres cultivées ;
- Un changement dans les pratiques agricoles et sylvicoles, en gérant la forêt pour augmenter les stocks de carbone de la biomasse, en limitant le travail du sol, ou encore en laissant plus de résidus de récolte sur les terres cultivées.

La quantité de carbone qui entre dans la biomasse dépend de la productivité végétale. Le stockage à long terme dépend ensuite du temps de résidence* dans chaque arbre, lié à sa longévité, au volume maximal qu'il peut atteindre (qui varie selon les essences), du climat et des types de sols, et du temps de résidence à l'échelle de l'écosystème, lié aux perturbations naturelles comme les incendies, les attaques d'insectes et la récolte.

Le stock de biomasse global est de l'ordre de 1 650 GtCO₂, dont 733 GtCO₂ dans les forêts tropicales humides (qui ont les plus fortes densités de biomasse par unité de surface). Le stock de biomasse global augmente en raison des changements environnementaux (augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, allongement de la durée des saisons de croissance dans l'hémisphère Nord, programmes d'afforestation, par exemple en Chine, et gestion forestière dans les forêts où la croissance est supérieure aux prélèvements). En revanche, le stock de biomasse des forêts tropicales diminue en raison de la déforestation. Les principaux puits de carbone liés à la biomasse se trouvent ainsi dans les forêts de l'hémisphère nord et les forêts tropicales intactes.

La quantité de carbone organique qui entre dans un sol dépend du type, de la densité et de la productivité de la végétation qui le couvre ainsi que des éventuelles pratiques culturales. La quantité de carbone qui sort d'un sol dépend, quant à elle, des communautés microbiennes, des conditions

climatiques, des propriétés du sol liées à la stabilisation de la matière organique, et de son niveau d'érosion.

Les sols contiennent, selon les estimations, entre 5 130 et 8 800 GtCO₂ sous forme de matière organique¹⁴. En particulier, 1 800 Gt CO₂ sont présents dans les tourbières arctiques et 1 600 Gt dans les autres types de pergélisols, et ce carbone ancien est vulnérable au réchauffement climatique en absence d'actions humaines pour le préserver. La quantité de carbone du sol a diminué à cause de la déforestation et des pratiques de l'agriculture conventionnelle qui entraînent une baisse de l'apport de matière organique dans les sols et une augmentation de leur érosion [Guo & Gifford 2002 ; Neely et al., 2009]. L'initiative internationale « 4 pour 1 000 »¹⁵, lancée par la France en 2015, vise à promouvoir les actions permettant d'augmenter le stock de carbone* des sols de 0,4 % par an, pour compenser une fraction des émissions mondiales [Chabbi et al., 2017]. Toutefois, la faisabilité et la permanence du stockage de carbone dans les sols reste un sujet de débat [Van Groenigen et al., 2017].

2. Les atouts envisagés et justifications avancées

Pour les forêts : Des estimations du potentiel théorique de séquestration du carbone dans la biomasse des forêts si elles étaient en libre évolution, fondées sur des données de croissance dans différentes régions, indiquent un taux de séquestration global maximum de 4 à 5,9 GtCO₂/an [Cook-Patton et al., 2020] selon le scénario de surface considéré. Le taux de séquestration par unité de surface est bien plus élevé dans les forêts tropicales humides, en particulier les forêts secondaires où plus de 80% de la biomasse maximale pourrait être restaurée en 2 à 3 décennies [Poorter et al., 2016]. Les projets actuels sur la forêt à l'échelle globale, institutionnels ou volontaires, ne séquestrent que 0,07 GtCO₂/an, soit seulement 1% du potentiel [Anderegg et al., 2020]. Mettre fin à la déforestation et à la dégradation des forêts en régénérant les forêts tropicales dégradées, entraînerait une forte réduction des émissions nettes mondiales de carbone du secteur des changements des terres, voire la création d'un puits net de carbone [Lewis et al., 2019 ; Gasser et al., 2022] avec la repousse de forêts secondaires.

Les estimations de la surface qui pourrait être plantée d'arbres varient de 900 Mha, sur la base de données bioclimatiques [Bastin et al., 2019], à 935 Mha selon les résultats de plus de 1 000 simulations de modèles socioéconomiques utilisés par le GIEC, fondés sur un prix du carbone et des scénarios de forte atténuation à l'horizon 2100 [Moustakis et al., 2024]. Ces surfaces ont été revues à la baisse par des études plus récentes, prévoyant des valeurs situées entre 633 et 670 Mha si l'on prend en compte les engagements des pays [The Land Gap Report, 2023] et la préservation de la biodiversité [Griscom et al., 2017]. En considérant l'ensemble des limitations sur les surfaces qui pourraient être plantées et restaurées avec des arbres ou des forêts, détaillées ci-après, la surface d'afforestation possible au niveau mondial est inférieure à 400 Mha pour un potentiel de séquestration additionnelle cumulée de 147 GtCO₂ d'ici 2050 [Wang et al., 2025]. Si l'on croise ces potentiels avec les engagements réellement pris par les pays (du Sud principalement) en matière d'afforestation et de reforestation dans le cadre du Challenge de Bonn¹⁶, ce chiffre tombe à 45,8 GtCO₂. Cela se traduit par un puits de carbone annuel potentiel par reforestation de 4,7 GtCO₂ par an en 2050. Pour

¹³ Soit entre 1 400 et 2 400 GtC.

¹⁴ Dans le premier mètre de sol. Ces chiffres représentent l'équivalent de 50 ans d'émissions anthropiques de CO₂.

¹⁵ Cette initiative internationale tire son nom de l'objectif de 0,4 % (soit 4 ‰) de l'augmentation annuelle du stock de carbone dans les sols agricoles et forestiers pour lutter contre les effets du changement climatique. Consulter : [L'initiative internationale "4 pour 1000"- Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat](#).

¹⁶ [The Bonn Challenge | Bonchallenge](#)

comparaison, l'évaluation du 6^e rapport du GIEC basé sur des modèles socioéconomiques (Chapitre 7 WGIII) indique un potentiel technique de 4 GtCO₂/an d'ici 2050 et un potentiel économique de 1,6 GtCO₂/an. Le chapitre AFOLU¹⁷ du rapport du GIEC de 2022 suggérait un potentiel plus élevé en incluant la protection, la gestion soutenable, la restauration des forêts, zones humides, prairies et savanes de l'ordre de 7 GtCO₂/an et d'environ 4 GtCO₂/an pour toutes les pratiques d'agroécologie [IPCC, 2022b].

Pour les sols : À l'échelle mondiale, les estimations de la séquestration annuelle possible varient de 3 à 6 GtCO₂/an [Bossio et al., 2020 ; Fuss et al., 2018], soit une augmentation de 0,03 à 0,11 % par an des stocks de carbone dans les sols. Bien que ces valeurs restent en deçà des 0,4 % par an visés par l'initiative « 4 pour 1000 », elles correspondent à 8 à 16% des émissions nettes de carbone en 2023. Le biochar produit par pyrolyse de débris végétaux qui ne pourraient être utilisés à d'autres fins offre également la possibilité de stocker du carbone dans les sols sur de très longues périodes (0,3 à 6,6 GtCO₂/an) et, sous certaines conditions, d'améliorer la productivité des sols [Smith, 2016].

Par ailleurs, augmenter le stockage de carbone organique dans les sols améliore leur capacité de rétention de l'eau et des minéraux, augmente leur fertilité, agrège davantage les particules en leur sein et limite leur érosion [Chabbi et al., 2017 ; Smith, 2016]. Le stockage de carbone organique dans les sols joue donc également un rôle important dans l'adaptation au changement climatique et, compte tenu de l'ensemble de ses co-bénéfices, son coût est très modeste, voire négatif [Smith, 2016].

Le temps de résidence du carbone dans le sol varie entre quelques jours et plusieurs millénaires, avec une durée moyenne de quelques décennies. La vitesse à laquelle le carbone du sol est perdu est plus rapide que celle à laquelle il est stocké mais l'équilibre n'est atteint qu'après plusieurs décennies. En France, l'évolution de la quantité de carbone stocké est négative dans les sols cultivés et positive dans les prairies permanentes et les forêts [Pellerin et al., 2021]. Il est donc primordial de préserver le carbone déjà stocké dans les sols les plus riches, tels que les tourbières, les sols forestiers et les prairies permanentes, notamment en stoppant l'artificialisation¹⁸ de ces milieux naturels et en limitant le retournement des prairies.

En France, la séquestration du carbone repose principalement sur la biomasse forestière :

La SNBC 2 reconnaissait le stockage de carbone organique dans la biomasse terrestre¹⁹ et dans les sols comme un levier essentiel, et donnait un objectif de puits net dans le secteur de l'usage des terres (UTCATF)²⁰ de 67 MteqCO₂/an à l'horizon 2050²¹. Les bilans récents montrent un puits net de 37,4 Mt CO₂/an sur la période 2017–2024²² [HCC, 2025], révélant un déficit par rapport à la trajectoire attendue. Le projet de SNBC 3 révisé à la baisse l'ambition nationale en matière de stockage, en

¹⁷ AFOLU pour Agriculture, Forestry and Other Land Uses.

¹⁸ Définie par la loi Climat et Résilience de 2021, l'artificialisation des sols est « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Lorsque des opérations d'aménagement sont réalisées (habitat, activités, commerces, infrastructures, équipements publics, etc.), la structure et la composition des sols sont profondément transformées et dégradées, les habitats naturels sont détruits et fragmentés, les paysages sont modifiés. En France, entre 20 000 et 30 000 hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers sont consommés chaque année. Ce phénomène se poursuit à un rythme 4 fois plus important que celui de l'augmentation de la population. Source OFB : <https://www.ofb.gouv.fr/lartificialisation-des-sols>.

¹⁹ S'agissant spécifiquement des écosystèmes forestiers, retrouvez le [rapport de l'Académie des sciences](#).

²⁰ UTCATF pour Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres, Foresterie.

²¹ Et 82 MtCO₂/an à l'horizon 2050 (dont 67 par les puits naturels et 15 par les puits technologiques (dont DAC et BECCS qui seront traités dans la partie 3 du présent rapport)).

²² Le stockage de carbone des forêts, prairies et produits bois est contrebalancé par les émissions de ce secteur (terres cultivées, dégradation des zones humides, artificialisation des terres).

projetant un puits net plus faible de 19 MteqCO₂/an à l'horizon 2030. Cette révision des objectifs entre SNBC 2 et SNBC 3 est le résultat de la prise en compte de la crise forestière liée à l'impact du changement climatique sur la forêt, affaiblissant le puits de carbone forestier, et de l'augmentation des conditions chaudes et sèches propices aux incendies de forêt. La question de la durabilité du stockage de carbone dans la végétation et les sols se pose de façon aiguë face à l'augmentation de la mortalité des arbres, des dépérissements et incendies de forêts. Dans l'UE, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, les États Membres visent à stocker 400 MtCO₂ par an dans le secteur de l'usage des terres, principalement dans la biomasse des forêts.

Pour les sols : Les sols des zones humides, des forêts et des prairies stockent beaucoup plus de carbone organique que les sols agricoles. En moyenne en France, les zones humides contiennent environ 367tCO₂/ha, tandis que les sols forestiers et prairiaux en retiennent environ 293tCO₂/ha. À titre de comparaison, les sols agricoles n'en stockent généralement que 128 à 183 tCO₂/ha. Cette différence s'explique en grande partie par la quantité de biomasse pouvant être recyclée dans ces différents sols²³. Le stockage additionnel de carbone en sols forestiers ou prairiaux est limité, et l'enjeu réside dans la préservation des stocks importants existants. En revanche, un stockage additionnel significatif est possible dans les sols agricoles et le potentiel en France métropolitaine est estimé à 31 MtCO₂/an [Pellerin et al., 2019], soit une augmentation de 0,23% par an des stocks de carbone dans les sols. Ce stockage additionnel représenterait 7% des émissions nationales de GES et pourrait découler de pratiques agricoles adaptées, avec, par ordre d'importance : (i) l'utilisation de cultures intermédiaires*, (ii) le développement de l'agroforesterie*, (iii) l'allongement de la durée des prairies temporaires, et (iv) une extensification modérée des prairies permanentes. Si l'on ajoute le stockage tendanciel observé, il serait possible d'atteindre un stockage total de +0,5% par an.

3. Les limites, risques et objections

Les évaluations de stockage additionnel par les écosystèmes terrestres doivent ainsi être considérées avec prudence, en raison de certains risques et incertitudes associées :

- Risque de surestimation du potentiel de stockage, lorsque les évaluations ne tiennent pas compte des usages actuels des terres (agriculture, usages locaux) ;
- Risque d'échec climatique, notamment dans les zones arides et semi-arides ciblées pour les plantations [Bastin et al., 2019], ainsi que vulnérabilité aux aléas naturels (incendies, maladies, insectes) et anthropiques (exploitation forestière [Anderegg et al., 2020]) ;
- Risques dus aux effets indésirables du reboisement : dans les zones boréales [Betts, 2000] et arides [Rohatyn et al., 2022], planter des arbres a un effet réchauffant. En assombrissant la surface, les arbres absorbent plus de lumière du soleil au lieu de la renvoyer vers l'atmosphère, ce qui peut réchauffer localement le climat. Ce réchauffement biophysique pourrait annuler, voire dépasser, les bénéfices apportés par le stockage du carbone dans les arbres.
- Risque d'atteinte à la biodiversité, si les plantations se font au détriment des espèces et écosystèmes en place : les plantations monospécifiques réduisent la diversité biologique et la résilience des écosystèmes [voir notamment Jactel et al., 2017].

²³ Dans les écosystèmes naturels ou peu exploités, une grande part de la matière végétale (feuilles, racines, bois mort) se décompose sur place, enrichissant ainsi le sol en carbone. En revanche, dans les systèmes agricoles, une part importante de la biomasse est retirée sous forme de récoltes, de fourrages ou de résidus exportés, réduisant d'autant la quantité de matière organique disponible pouvant être incorporée au sol. Un moindre retour de matière organique au sol entraîne une réduction du carbone stocké, ce qui explique les stocks plus faibles observés dans les terres cultivées [Guo & Gifford, 2002].

- Risques socioéconomiques et de sécurité alimentaire. L'afforestation à grande échelle peut entrer en concurrence avec d'autres usages des terres, tels que la production alimentaire, entraînant une augmentation des prix alimentaires et une aggravation de l'insécurité associée, en particulier dans les régions vulnérables [IPCC, 2019b], ou la production d'énergie²⁴. De façon générale, elle peut entraîner un accaparement foncier et des impacts négatifs sur les populations autochtones, imposant des considérations de justice sociale et d'équité dans les stratégies de séquestration terrestre [IPCC, 2019b].

De même, les estimations du stockage additionnel de carbone dans les sols doivent être nuancées, car elles ne prennent pas toujours en compte un certain nombre de limites et de contraintes :

- Un coût potentiellement élevé : le coût de la tonne de carbone stockée dans les sols peut atteindre jusqu'à 600 €/tC selon le rapport « 4 pour 1000 » [Pellerin et al., 2021], une fois les coûts de mise en œuvre intégrés. Ce chiffre ne tient toutefois pas compte des co-bénéfices environnementaux et agronomiques associés à ces pratiques ;
- Des limitations par les nutriments : le stockage du carbone dans les sols ne peut s'effectuer sans azote et phosphore. Les ratios carbone/azote et carbone/phosphore de la matière organique du sol sont beaucoup plus faibles que ceux de la biomasse. La séquestration du carbone dans les sols est donc fortement consommatrice en azote et phosphore, qui doivent être apportés par des intrants agricoles [Van Groenigen et al., 2017] ;
- Des barrières socio-économiques : le coût du changement de pratiques, ainsi que les contraintes organisationnelles au sein des exploitations, freinent la mise en œuvre de ces solutions [Demenois et al., 2020] ;
- Un effet climatique net parfois incertain : les risques d'émission accrues de protoxyde d'azote (N₂O) liés à certaines pratiques agricoles intensives, peuvent annuler les bénéfices climatiques nets.

Par ailleurs, certaines questions restent en suspens : Sous quelle forme faut-il apporter la matière organique aux sols (fraîche, compostée, méthanisée, pyrolysée) et quels sont les compromis acceptables entre durabilité, coût et efficacité climatique ?

Le rapport spécial du GIEC sur le climat, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de GES rappelle que si le stockage de carbone dans les sols et la biomasse terrestre peut constituer un levier important d'atténuation, il reste fondamentalement réversible et limité dans le temps [IPCC, 2019b]. Ce potentiel repose sur des pratiques de gestion durable (par exemple reboisement, agroforesterie, gestion des sols), dont la poursuite est indispensable pour maintenir le carbone séquestré. En outre, ces réservoirs terrestres sont très vulnérables face au changement climatique : sécheresses, incendies, maladies ou dégradation des sols peuvent entraîner une perte rapide du carbone accumulé, tandis que les écosystèmes tendent vers un nouvel équilibre limitant leur capacité additionnelle de stockage [IPCC, 2019b]. Ainsi, si les écosystèmes terrestres peuvent contribuer de manière significative à l'atténuation au cours des prochaines décennies, leur potentiel est incertain et non permanent, car les perturbations naturelles et anthropiques peuvent conduire à un relargage massif de CO₂ [IPCC, 2022b].

²⁴ Voir le rapport de l'Académie des sciences [Quelles perspectives énergétiques pour la biomasse ? | Académie des sciences](#).

4. Synthèse des connaissances scientifiques et recommandations

Même dans les scénarios les plus optimistes, le stockage additionnel de carbone par la végétation terrestre et dans les sols ne permettra de contrebalancer qu'une faible fraction du niveau actuel d'émissions de CO₂. Cela souligne l'importance de réduire les émissions anthropiques à la source et d'explorer d'autres moyens d'atténuation, tels que l'agroécologie, l'agriculture biologique ou encore l'évolution des régimes alimentaires (notamment en réduisant la consommation de viande et en augmentant les apports de protéines végétales), qui constituent autant de leviers à la fois réalisables, déjà disponibles et porteurs de nombreux co-bénéfices.

Néanmoins, le stockage additionnel dans la végétation terrestre et les sols peut être significatif et un accompagnement des exploitants agricoles et forestiers aux pratiques vertueuses serait nécessaire pour accélérer ce stockage et garantir sa durabilité.

Si de nombreuses questions restent ouvertes, un consensus scientifique semble se dégager sur plusieurs points :

- Contrairement à d'autres méthodes de géo-ingénierie, les leviers de stockage additionnel de carbone dans la biosphère sont immédiatement disponibles ; ils peuvent, dans une approche de soutenabilité de leur mise en œuvre, générer de multiples co-bénéfices substantiels pour les sociétés humaines et la biodiversité [IPCC, 2022a] ;
- La protection des sols riches en matière organique (zones humides, forêts, prairies permanentes) est une priorité absolue ;
- Parmi les pratiques agricoles favorables au stockage de carbone dans les sols figurent l'usage de cultures intermédiaires, le développement de l'agroforesterie, l'allongement de la durée des prairies temporaires et une extensification modérée des prairies permanentes ;
- Enfin, le choix et la mise en œuvre de ces pratiques doivent impérativement être adaptés aux contextes locaux, climatiques, pédologiques, géographiques et socio-économiques. Leur déploiement à grande échelle doit être soigneusement encadré pour éviter des conflits d'usage.

S'agissant des efforts de recherche à engager, l'Académie des sciences recommande ainsi :

1. Le développement d'une approche prospective de modélisation des systèmes agricoles actuels et alternatifs, aux échelles nationale, européenne et mondiale, afin d'évaluer leurs effets économiques et environnementaux. Cette modélisation devra inclure des modèles de marché intégrant l'évolution des régimes alimentaires, les usages non alimentaires de la biomasse, les politiques publiques et les dynamiques d'échanges internationaux.
2. L'analyse approfondie des leviers de stockage du carbone en tenant compte des effets du changement climatique sur les processus écophysologiques, les pratiques culturales et les modes de gestion.
3. L'évaluation comparative des différentes filières de valorisation de la biomasse - comme la production d'énergie, le stockage dans les sols ou la fabrication de produits en bois - dans un contexte où la demande augmente. L'objectif est de savoir quelles options apportent le plus de bénéfices en matière de réduction des émissions de GES, en regard des conséquences économiques et sociales de leur déploiement.
4. Le renforcement des connaissances sur l'innocuité et l'efficacité des ressources organiques (boues, digestats, composts) utilisées comme leviers de stockage de carbone dans les sols, en garantissant leur sécurité pour les sols et la production alimentaire.

Préambule aux CDR-Chapitres 2 et 3 : Le puits de carbone océanique : présentation et bases scientifiques des méthodes visant à accroître son efficacité

Grâce à son immense superficie, couvrant les deux tiers de la planète, ses caractéristiques physiques et chimiques propres et à la moindre empreinte humaine sur certaines de ses zones, l'océan offre un potentiel considérable pour le développement de méthodes d'élimination du CO₂. Néanmoins, certaines régions océaniques, et donc certains écosystèmes marins, sont déjà sous forte pression directe des activités humaines (surpêche) et affectés par le changement climatique (accumulation de chaleur, vagues de chaleur marines, acidification, perte d'oxygène).

La surface de la Zone Économique Exclusive (ZEE) française est la 2^e par son étendue au niveau mondial. Elle couvre près de 11 millions de km² dont 97 % se situent en outre-mer et 93 % dans les grands fonds (profondeur supérieure à 1 000 m).

Ces dernières années, le nombre de projets et de startups consacrés aux techniques d'élimination du CO₂ marin (mCDR – *marine Carbon Dioxide Methods*) a augmenté de façon considérable, en parallèle d'une croissance significative des publications scientifiques et des rapports d'experts sur le sujet [ex : GESAMP, 2019 ; NASEM, 2021].

L'océan représente un puits naturel net considérable pour le carbone anthropique, estimé à 10,6 GtCO₂/an pour la décennie 2014-2023²⁵. Cela représente près de 25% des émissions anthropiques de CO₂ (combustion des réserves fossiles et déforestation) [Friedlingstein et al., 2025]. Sur une échelle de temps plus longue (1850-2023), l'océan a absorbé 679 GtCO₂, ce qui représente également 25% des émissions anthropiques totales sur la période. L'océan est ainsi un acteur clé du cycle du carbone.

Le mécanisme responsable du puits océanique est physico-chimique et découle de l'augmentation de la différence de pression partielle de CO₂ de part et d'autre de l'interface air-mer. L'océan peut ainsi dissoudre une partie de l'excès de CO₂ atmosphérique introduit par les activités humaines. Une fois dissous dans l'eau de mer, le CO₂ se retrouve essentiellement sous forme d'anions hydrogénocarbonate (HCO₃⁻) et peut être transporté en profondeur par les grands courants océaniques et le mélange vertical. Comme la solubilité du CO₂ augmente lorsque la température diminue, les zones les plus efficaces pour absorber le CO₂ (les meilleurs puits) sont l'Atlantique Nord et l'Océan Austral, où les eaux de surface sont froides et denses et où les masses d'eaux profondes se forment et séquestrent le carbone.

Si les émissions anthropiques diminuent fortement et que le taux atmosphérique de CO₂ se stabilise, l'absorption océanique tendra naturellement à diminuer, le système se rapprochant d'un nouvel état d'équilibre. En revanche, si la teneur en CO₂ atmosphérique continue d'augmenter, le puits océanique pourrait connaître une baisse d'efficacité relative, liée à plusieurs facteurs physiques et biogéochimiques : (i) l'acidification des eaux océaniques, qui limite la transformation du CO₂ dissous en ions hydrogénocarbonate, (ii) le réchauffement des eaux de surface de l'océan, qui réduit la

²⁵ Les méthodes utilisées pour estimer ce puits pour les dernières décennies combinent (i) des modèles statistiques avancés qui s'appuient sur la mesure de la pression partielle de CO₂ dans l'océan de surface[#] (ii) des modèles[#] du cycle du carbone océanique et (iii) l'utilisation des tendances combinées du CO₂ et de l'O₂ atmosphérique. Les différentes méthodes mettent toutes en évidence une augmentation du puits en parallèle de l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère mais divergent sur la valeur exacte du puits et sur sa tendance dans quelques régions clés (océan Austral en particulier) [Friedlingstein et al., 2025 ; DeVries et al., 2023].

solubilité du CO₂ dans l'eau et (iii) la modification de la circulation océanique, notamment la stratification verticale, et la diminution de la ventilation des eaux profondes, qui freine le transfert du CO₂ vers l'océan intérieur.

Le puits de carbone océanique de la ZEE française est estimé à 210 MtCO₂/an (pour la période 2011-2020) [Berger et al., 2024]. Cette valeur élevée représente 50% de l'ensemble des émissions territoriales françaises de GES sur la même période.

L'océan joue un rôle central dans la régulation du climat en raison des échanges possibles de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère. La capacité de l'océan à stocker du carbone repose sur deux grands mécanismes complémentaires : la pompe physique (ou pompe de solubilité) et la pompe biologique. Ensemble, elles contrôlent la répartition verticale du carbone entre les eaux de surface, en contact avec l'atmosphère, et les profondeurs océaniques.

- ♦ La pompe physique : un mécanisme de dissolution et d'entraînement

La pompe physique repose sur la capacité de l'eau froide à dissoudre le CO₂ atmosphérique. Aux hautes latitudes (Atlantique Nord, océan Austral), les eaux de surface refroidies deviennent plus denses et s'enfoncent, entraînant avec elles le CO₂ dissous. Ce processus de formation d'eaux profondes permet de stocker le carbone sur des échelles de temps longues, allant de plusieurs siècles à un millénaire.

Ce mécanisme dépend fortement :

- de la température : plus l'eau est froide, plus elle dissout de CO₂,
- de la circulation océanique globale, dite thermohaline,
- de la stratification verticale, qui peut limiter le mélange entre surface et profondeur.

- ♦ La pompe biologique : un moteur biogéochimique

La pompe biologique est d'abord assurée par le phytoplancton, constitué essentiellement par des microalgues photosynthétiques présentes en surface. En absorbant le CO₂ par leur activité photosynthétique au cours de laquelle elles produisent de la matière organique, ces algues jouent un rôle clé dans le transfert du carbone vers les couches profondes. Deux étapes majeures structurent ce processus :

(i) Production biologique : le phytoplancton capte du CO₂ et l'incorpore dans sa biomasse. Cette biomasse peut être ensuite consommée par d'autres organismes.

(ii) Exportation : une partie de cette biomasse coule vers les profondeurs, sous forme de cellules mortes, de carcasses, de déjections ou d'agrégats. En sédimentant, ces particules transportent le carbone hors d'un contact potentiel avec l'atmosphère. Une large part de cette matière est néanmoins recyclée (reminéralisée) avant d'atteindre les abysses. Seule une petite fraction est effectivement stockée à long terme.

- ♦ Un système dynamique, mais déséquilibré

Ces deux pompes entretiennent un déséquilibre structurant dans la distribution du carbone inorganique dissous : l'océan de surface est globalement déficitaire en CO₂ par rapport aux profondeurs. Ce déséquilibre favorise le transfert net de CO₂ depuis l'atmosphère vers l'océan.

Bien que la pompe physique explique la quasi-totalité du puits de carbone anthropique aujourd'hui, c'est la pompe biologique qui contrôle l'état à long terme du stock de carbone marin, en expliquant environ 90 % du gradient vertical de carbone dans l'océan [Sarmiento & Gruber, 2013].

La plupart des techniques d'élimination du CO₂ basées sur l'océan sont fondées sur une augmentation de l'efficacité des pompes de carbone décrites ci-dessus. Parmi les approches proposées figurent la

fertilisation océanique au fer (OIF), le renforcement artificiel des échanges verticaux (ascendants et descendants), la culture de macroalgues, l'augmentation de l'alcalinité* océanique (OAE) par l'ajout de minéraux ou par électrochimie, ainsi que l'extraction directe du CO₂ de l'océan. Certaines méthodes reposent également sur la capacité de certains écosystèmes à capter et stocker le carbone, comme la conservation et la restauration des écosystèmes de carbone bleu (mangroves, herbiers marins, marais littoraux) [NASEM, 2021].

Les différentes méthodes peuvent être classées selon le mode initial de suppression ou de réduction du CO₂ en surface de l'océan (processus biologiques ou abiotiques), mais d'autres critères de classification ont été utilisés [ex : Cooley et al., 2023] : certaines techniques reposent sur la photosynthèse, d'autres sur des processus géochimiques ou sur des technologies avancées. Elles peuvent aussi être considérées comme conventionnelles ou innovantes, ou encore distinguées selon qu'elles relèvent des solutions fondées sur la nature ou non. La figure 2.2 présente ces différentes classifications.

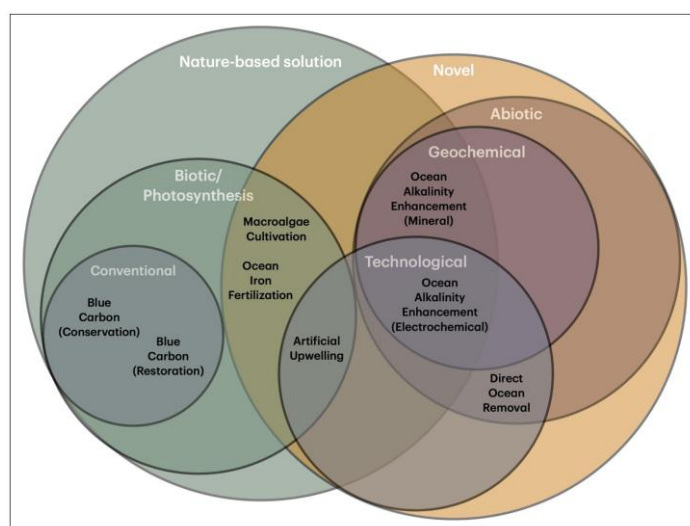


Figure 2.2 : Classification des différentes méthodes de mCDR en fonction de leurs caractéristiques. [Ho & Bopp, 2024].

Le chapitre suivant considère en particulier les méthodes biotiques. Les autres méthodes, dites géochimiques et jouant sur la « pompe de solubilité » (alcalinisation de l'océan en particulier), feront l'objet d'une partie dédiée du chapitre 3.

CDR - Chapitre 2 : Le stockage de carbone dans l'océan par des méthodes biologiques

Ce chapitre s'intéresse aux méthodes reposant sur des processus biologiques affectant le puits de carbone océanique. Les méthodes reposant sur les processus géochimiques sont examinées dans le chapitre 3.

1. Les principales méthodes envisagées : atouts et limites

Fertilisation océanique par le fer (Ocean Iron Fertilization, OIF)

La fertilisation océanique par le fer repose sur l'ajout de fer dans certaines zones océaniques pauvres en fer dissous (océan Austral, Pacifique Nord, Pacifique équatorial) afin de stimuler la croissance des microorganismes photosynthétiques marins. L'augmentation de cette biomasse entraîne une absorption accrue de CO₂ par photosynthèse, suivie d'un transfert partiel du carbone vers les fonds marins à la faveur de la sédimentation des organismes morts et autres matières organiques [Martin et al., 1990].

L'efficacité de cette approche reste cependant controversée. Alors que certaines expériences ont montré une augmentation temporaire de la productivité biologique et un piégeage partiel du carbone en profondeur [de Baar et al., 2008], d'autres études indiquent que le carbone organique ainsi produit peut être rapidement recyclé et réémis dans l'atmosphère [Boyd & Trull, 2007]. Les modèles montrent un potentiel limité, même dans des cas idéalisés où l'ensemble des zones propices seraient fertilisées en continu [Aumont & Bopp, 2006].

Par ailleurs, parmi les principales limites de l'OIF figurent un certain nombre d'effets secondaires possibles de l'ajout de fer sur les écosystèmes marins avec l'apparition de zones appauvries en oxygène sous l'effet de la dégradation locale de la matière organique produite. D'autres perturbations des réseaux trophiques interviennent, comme le développement d'espèces phytoplanctoniques produisant des toxines. La stimulation du phytoplancton peut également conduire à l'émission d'autres GES, tels que le protoxyde d'azote (N₂O) diminuant, voire annulant, l'effet escompté sur le climat dû à la diminution du CO₂, dont l'ampleur et la durée restent par ailleurs difficiles à quantifier. Enfin, la stimulation locale du phytoplancton conduira à l'augmentation de prélèvement de sels nutritifs (notamment phosphate et nitrate) consommés dans la région fertilisée, qui ne seront plus disponibles pour soutenir les réseaux alimentaires marins dans d'autres régions.

Afforestation océanique

L'afforestation océanique par culture de macroalgues, en milieu côtier ou en pleine mer, est une technique qui consiste à cultiver à grande échelle des algues de grande taille, comme les laminaires, dont l'activité photosynthétique permettrait de capter du CO₂ dissous dans l'eau de mer, potentiellement remplacé par du CO₂ atmosphérique. Ces macroalgues ont une croissance rapide et un potentiel élevé de stockage de carbone, notamment en milieu côtier [Duarte, 2017]. Certaines études estiment que, à l'échelle mondiale, l'afforestation océanique pourrait théoriquement séquestrer plusieurs gigatonnes de CO₂ par an.

Toutefois, l'efficacité réelle de cette approche dépend fortement du devenir du carbone fixé : si la biomasse se décompose en surface, le CO₂ est rapidement réémis dans l'atmosphère, réduisant d'autant l'effet escompté sur la séquestration du carbone [Krause-Jensen & Duarte, 2016]. Par ailleurs, des défis écologiques et logistiques subsistent, notamment la gestion de la compétition pour

l'espace marin, la variabilité des conditions environnementales, notamment température et disponibilité des nutriments, et le risque de perturbations des écosystèmes marins en surface [Berger et al., 2023] et en profondeur dans le cas d'un export de la matière organique vers le fond de l'océan.

Conservation et restauration des écosystèmes dits du « carbone bleu »

La conservation et la restauration des écosystèmes dits de « carbone bleu » (mangroves, herbiers marins et marais littoraux) sont des approches qui visent à préserver et à renforcer la capacité naturelle de ces habitats côtiers à capter et stocker le carbone. Ces écosystèmes figurent parmi les puits de carbone les plus efficaces de la planète, stockant du CO₂ sous forme de biomasse végétale et de sédiments riches en matière organique, où le carbone peut rester piégé pendant des siècles, voire des millénaires [McLeod et al., 2011].

La dégradation de ces habitats, due à l'urbanisation côtière, l'aquaculture et la montée du niveau de la mer, entraîne d'importantes émissions de CO₂, faisant de leur conservation une priorité pour le climat [Pendleton et al., 2012].

La restauration active, par la replantation de mangroves ou la régénération des herbiers marins, peut améliorer leur fonction de séquestration, bien que les résultats varient en fonction des conditions locales et du succès des interventions [Duarte et al., 2017]. D'après le GIEC [IPCC, 2019a], la restauration de ces écosystèmes côtiers végétalisés pourrait contribuer à atténuer le changement climatique grâce à une augmentation du captage et du stockage du carbone d'environ 0,5 % des émissions mondiales annuelles actuelles. Au niveau mondial, il est estimé que le potentiel lié à la gestion des écosystèmes "blue carbon" est inférieur à 1 GtCO₂/an. Une protection et une gestion améliorées de ces écosystèmes peuvent réduire leurs émissions de carbone. Conjuguées, ces mesures offrent de multiples co-bénéfices, comme une protection renforcée contre les tempêtes et une amélioration de la qualité de l'eau, de la biodiversité et des ressources pour la pêche [IPCC, 2019a].

Le rapport sur la séquestration du carbone par les écosystèmes français [EFESE, 2019] confirme que les mangroves, herbiers marins ou marais littoraux des côtes françaises présentent des conditions écologiques (salinité, productivité, etc.) particulièrement favorables au stockage de carbone. Leur potentiel de séquestration peut atteindre jusqu'à 7 t_{eq}CO₂/ha/an. Toutefois, en raison de leur faible extension, ces écosystèmes séquestrent aujourd'hui moins de 1 % des émissions annuelles nationales.

Ces approches présentent des limites, notamment liées (i) à la vulnérabilité des écosystèmes restaurés aux changements climatiques (élévation du niveau de la mer, cyclones tropicaux plus intenses, vagues de chaleur marines, augmentation des pluies extrêmes pouvant affecter, par le ruissellement terrestre, la qualité des eaux avec des effets néfastes), (ii) à la disponibilité restreinte d'espaces adaptés, ainsi que (iii) aux coûts et défis socio-économiques liés à la gestion durable des zones côtières [Narayan et al., 2016].

2. Synthèse des connaissances et recommandations

L'océan joue déjà un rôle majeur dans le cycle du carbone, absorbant plus d'un quart des émissions anthropiques de CO₂ (figure 2.1). Ce puits naturel est principalement piloté par des processus physico-chimiques (pompe de solubilité). La pompe biologique est importante pour redistribuer le carbone dans l'océan et ses changements entraîneront aussi des variations du puits océanique. Ces mécanismes offrent les fondements scientifiques des méthodes de suppression du CO₂ marin (mCDR).

Trois grandes familles de méthodes se distinguent et diffèrent par leur degré de maturité, leur potentiel de séquestration (et la durabilité de stockage), leurs effets environnementaux et leur complexité logistique (tableau 1).

Méthodes	Potentiel de séquestration	Durée de stockage du carbone	Degré de maturité	Co-bénéfices	Inconvénients, limites
Fertilisation océanique au fer	Limité et très incertain	Court à moyen terme ; réémission potentiellement rapide dans l'atmosphère	Très faible		Nombreux défis de mise en œuvre ; perturbations écologiques potentielles (notamment perturbations des réseaux trophiques)
Afforestation océanique par culture de macroalgues	Limité	Incertaine ; variable selon le devenir de la biomasse	Intermédiaire		
Restauration des écosystèmes côtiers de carbone bleu	Élevé à très élevé localement ; faible à très faible au niveau global	Long terme	Important	Biodiversité, protection côtière	Volume de carbone séquestré faible ; contrainte d'espace

Tableau 1 : Bilan des méthodes de mCDR faisant intervenir des organismes marins.

À ce stade, aucune des méthodes étudiées ne peut être considérée comme une solution de décarbonation de l'atmosphère à grande échelle. Certaines peuvent néanmoins jouer un rôle utile et complémentaire, en particulier dans le cadre de stratégies territorialisées générant des co-bénéfices multiples. Plus précisément, les études montrent que les techniques de fertilisation océanique (OIF) et de culture de macroalgues en pleine mer présentent, *a priori*, une efficacité limitée et des risques environnementaux délétères pour les écosystèmes marins et, en l'état actuel des connaissances, leur mise en œuvre ne peut pas être recommandée. En revanche, la conservation et la restauration des écosystèmes de carbone bleu, malgré un potentiel de séquestration modeste à l'échelle globale, offrent de nombreux co-bénéfices écologiques, sociaux et économiques. Ces atouts justifient dès à présent la multiplication des projets et le renforcement des financements en leur faveur. Un enjeu majeur dans l'évaluation du potentiel offert par ces méthodes réside dans la prise en compte des répercussions des fortes pressions anthropiques directes (surpêche) et découlant du changement climatique sur l'océan.

À la lumière de ces éléments, l'Académie des sciences recommande de :

1. Poursuivre la recherche sur les mécanismes biogéochimiques marins, notamment pour mieux évaluer la durabilité et l'efficacité nette des méthodes qui pourraient être exploitées ;
2. Prioriser la conservation et la restauration des écosystèmes de carbone bleu, qui présentent un bon rapport coût-efficacité, des effets climatiques certains à court terme et de nombreux co-bénéfices écosystémiques, notamment dans les stratégies visant à limiter l'érosion du littoral.

Certaines techniques, telles que l'OIF ou l'afforestation océanique (qui sera envisagée plus tard dans ce rapport), les plus intrusives, présentent des risques significatifs de manipulation des biens communs mondiaux, et appellent ainsi à une vigilance accrue.

CDR - Chapitre 3 : Altération provoquée des roches (AP) et alcalinisation de l'océan (AO)

Parmi les approches visant l'élimination et le stockage à long terme de carbone de l'atmosphère, certaines méthodes cherchent à reproduire et amplifier des processus géochimiques naturels permettant de fixer durablement le CO₂. Le concept de pompage géologique a été introduit il y a près de deux siècles [Ebelmen, 1845], mais les échelles de temps naturelles sont très longues. Cela souligne la nécessité d'accélérer les réactions pour pomper le CO₂ d'origine anthropique. Ces techniques de CDR reposent sur l'altération* de minéraux silicatés ou carbonatés qui libère en solution des cations alcalins et alcalino-terreux qui entraînent la transformation du CO₂ en formes stables dissoutes (ions hydrogénocarbonates²⁶ (HCO₃⁻) et autres carbonates). Ces formes stables peuvent ensuite être stockées à long terme dans les sols, les eaux souterraines ou l'océan.

Deux grandes variantes de cette stratégie sont actuellement à l'étude :

- l'altération provoquée des roches (AP), qui consiste à broyer et épandre des roches sur les sols pour accroître leur capacité naturelle de captation de CO₂ ;
- l'alcalinisation de l'océan (AO), qui vise à augmenter l'alcalinité de l'eau de mer afin de renforcer le rôle tampon de l'océan vis-à-vis du CO₂ atmosphérique. Elle fait appel à l'ajout direct de minéraux ou d'espèces dissoutes ou à des procédés électrochimiques.

Ce chapitre vise à présenter les principes, avantages et limites de ces deux familles de méthodes considérées successivement.

1. Altération provoquée des roches : principes, atouts et limites

Les principes de l'altération provoquée et atouts envisagés

Le principe de l'altération provoquée vise à accélérer et amplifier le phénomène naturel de l'altération chimique des roches. Ce processus se produit lorsque des minéraux riches en calcium, magnésium ou sodium réagissent avec l'eau au contact de l'atmosphère. Cette interaction entraîne la solubilisation de CO₂ atmosphérique sous forme d'ions hydrogénocarbonates, qui peuvent ensuite être transportés par les eaux souterraines et les rivières jusqu'à l'océan, où ils sont stockés à long terme.

Dans le détail, les étapes de cette technique sont les suivantes :

- Épandage de roches broyées : les roches ou minéraux silicatés (comme le basalte ou l'olivine) ou les carbonates (comme le calcaire) sont broyés en fines particules et dispersés sur les sols agricoles ou dans des espaces naturels appropriés.
- Réaction avec le CO₂ : en présence d'eau, ces roches et minéraux libèrent des ions qui accroissent l'alcalinité de l'eau (calcium, magnésium, sodium) et, en conséquence, la solubilisation du CO₂.
- Transport et stockage : les produits de ces réactions chimiques sont emportés par les cours d'eau vers l'océan, où ils contribuent à augmenter l'alcalinité de l'eau de mer et permettent un stockage durable du CO₂.

La séquestration durable du carbone repose sur la transformation du CO₂ ainsi capté en carbonates, permettant ainsi un stockage stable sur plusieurs milliers d'années [Fuss et al., 2018].

²⁶ L'ion hydrogénocarbonate, historiquement appelé bicarbonate, appartient au système de l'acide carbonique. L'usage est aujourd'hui d'utiliser le terme de « carbonates » (au pluriel) de façon plus générale pour englober toutes les formes stables de cet acide : H₂CO₃, HCO₃⁻ et CO₃²⁻.

L'épandage de roches, en plus du captage du CO₂, présente des bénéfices agricoles induits notables (co-bénéfices), en contribuant à enrichir les sols en minéraux et autres éléments essentiels, à stabiliser l'acidité créée par la décomposition des amendements organiques riches en azote et ainsi à en améliorer la fertilité.

Enfin, ce procédé s'appuie sur un processus naturel et relativement peu invasif, qui ne requiert pas de dispositifs complexes de stockage géologique, contrairement à d'autres méthodes de séquestration.

Les obstacles et incertitudes

L'un des principaux obstacles techniques et économiques tient à l'énergie nécessaire au broyage des roches : pour maximiser leur surface de réaction avec le CO₂ atmosphérique, ces roches doivent être finement broyées, selon un procédé qui consomme beaucoup d'énergie²⁷. À l'échelle mondiale²⁸, le déploiement de cette méthode pour éliminer des quantités significatives de CO₂ impliquerait l'extraction, le broyage, le transport et l'épandage de milliards de tonnes de roches. Une telle logistique, extrêmement lourde, s'accompagne de coûts très élevés et supposerait l'implication active du monde agricole pour sa mise en œuvre concrète sur le terrain.

Par ailleurs, l'efficacité du processus diminue dans le temps : la réactivité des minéraux silicatés s'affaiblit sous l'effet de la réduction de leur surface réactionnelle effective [Schott et al., 2024 ; Chen et al., 2025]. Le fer présent à la surface des minéraux peut également progressivement s'oxyder, ce qui ralentit considérablement les vitesses de dissolution et de captage du CO₂. Toutefois, en présence de biofilms* qui piègent le fer, ce ralentissement peut être fortement réduit [Gerrits et al., 2020 ; Vicca et al., 2021].

2. Alcalinisation de l'océan : principes, atouts et limites

Principe de l'alcalinisation directe de l'océan et atouts envisagés

L'alcalinisation de l'océan, ou augmentation de l'alcalinité océanique (*Ocean Alkalinity Enhancement*, OAE), est une technique d'élimination du CO₂ qui vise à accroître cette capacité naturelle de stockage. Elle repose sur l'ajout de minéraux alcalins (comme l'olivine, la chaux ou des carbonates) ou sur l'utilisation de procédés électrochimiques, afin d'augmenter les concentrations de carbonates dans l'eau de mer [Renforth & Henderson, 2017]. L'alcalinisation a le potentiel de lutter contre l'acidification de l'océan et permettrait de stocker du carbone sur des millénaires [Köhler et al., 2013]. Un océan plus alcalin capte davantage de CO₂ qu'il transforme en carbonates dissous stables sur de longues périodes [Keller, 2019]. La capacité de stockage est considérable - plusieurs gigatonnes de carbone par an [Gattuso et al., 2018] - et cette approche pourrait être déployée à grande échelle.

Dans le cas de l'ajout direct de roches ou de minéraux (silicates, carbonates) à l'eau de mer, les cations libérés accroissent son alcalinité et provoquent ainsi la dissolution de CO₂ atmosphérique. Pour que cette méthode ait un effet rapide sur la concentration atmosphérique de CO₂, les minéraux doivent se dissoudre dans la couche de mélange* présente à la surface de l'océan²⁹. Cela n'est pas

²⁷ Une augmentation de 0,1 % de l'alcalinité de l'océan nécessiterait l'apport d'environ 1,4 Gt de calcaire à l'océan. En supposant que l'énergie nécessaire pour broyer une tonne de calcaire soit d'environ 30 kWh, le broyage nécessite, maintenance comprise, 42 TWh, soit 6,3 milliards d'euros. Le coût du transport serait approximativement de 2,8 milliards d'euros.

²⁸ L'élimination annuelle de 4 Gt de CO₂, représentant 10% des émissions fossiles actuelles, nécessiterait l'extraction, broyage et épandage annuels de plusieurs dizaines à centaines de Gt de basalte ou olivine sur 5 à 20 millions de km² de sols, suivant la pluviosité envisagée [Vienne et al., 2022 ; Renforth et al., 2015 ; Cipolla et al., 2021]. Avec un coût de 75-250 €/t de CO₂ enlevé [Beerling et al., 2020], la dépense totale annuelle serait de 300 à 1000 milliards d'euros. Les estimations correspondant à l'épandage de calcaire seraient d'une dizaine à une vingtaine de Gt de roches [Zeng et al., 2022 ; Knapp & Tipper, 2022].

²⁹ L'équilibrage de la couche supérieure de l'océan avec l'atmosphère se produit sur des échelles de temps allant de quelques mois à une année [Harvey, 2008].

réalisable avec du calcaire car les eaux de surface sont naturellement saturées vis-à-vis des carbonates de calcium (calcite et aragonite)³⁰, et nécessite de broyer très finement (jusqu'à environ 1 micron) les silicates comme l'olivine ou les basaltes avant leur épandage [Köhler et al., 2013].

L'électrolyse constitue une méthode alternative, non naturelle, qui utilise un courant électrique. La réaction industrielle, dite procédé *chlor-alkali*, permet d'augmenter l'alcalinité de l'eau de mer en injectant des ions sodium et en retirant des ions chlore, sans modifier significativement la composition globale de l'eau. Elle transforme également le CO₂ dissous en composés solides stables³¹, empêchant leur retour dans l'atmosphère. Ce procédé permettrait de produire l'urée utilisable comme engrais.

Les obstacles et incertitudes

Les défis concernent :

- L'échelle de mise en œuvre : la suppression de 10 % des émissions annuelles anthropiques de CO₂ nécessite l'apport de plus de 4Gt/an de silicates à l'océan [Köhler et al., 2013]. Cette estimation ne prend néanmoins pas en compte la réduction importante de la vitesse de dissolution de l'olivine au cours du temps due à l'oxydation du fer à sa surface [Gerrits et al., 2020].
- Les effets écologiques incertains : l'ajout de minéraux riches en silicium, fer, magnésium et calcium (silicates et carbonates) à l'océan changerait significativement le bilan de ces éléments et ainsi la chimie de l'eau, le cycle des nutriments et la biodiversité planctonique [Hartmann et al., 2023]. Cela pourrait modifier la dynamique des écosystèmes marins de façon non anticipée. De plus, l'extraction et le broyage des minéraux nécessaires à l'alcalinisation pourraient entraîner des émissions de CO₂ et autres conséquences néfastes sur les environnements terrestres.
- Les coûts énergétiques et logistiques élevés : le broyage et transport en mer des minéraux sont coûteux et complexes. Le coût du transport pourrait être réduit en apportant l'eau de mer dans des carrières exploitées sur le continent en utilisant des sources d'énergies décarbonées plutôt qu'en transportant les roches.
- L'acceptabilité sociale et la réglementation : les conséquences environnementales doivent être soigneusement étudiées avant tout déploiement à grande échelle.
- Le coût énergétique de l'électrolyse, qui est considérable, même si l'on associe le processus aux usines de désalinisation et que l'on inclut la récupération de l'hydrogène produit dans le processus et le bénéfice tiré de la fabrication d'urée³².

Le tableau 2 propose une vue synthétique des méthodes d'altération et alcalinisation provoquée.

³⁰ La calcite et l'aragonite sont deux formes du carbonate de calcium cristallin. Les océans sont sursaturés par rapport à la calcite et l'aragonite depuis la surface jusqu'à de grandes profondeurs. Cependant, de la poudre de CaCO₃ pourrait être déversée dans les régions de l'océan où l'épaisseur de la couche d'eau sursaturée est relativement faible (250-500 m) et où la vitesse de remontée des eaux est élevée (30-300 m/an). Les produits de dissolution des solides entreraient alors dans la couche de mélange en quelques années ou décennies.

³¹ Urée et chlorure d'ammonium.

³² L'électrolyse pour augmenter l'alcalinité de l'océan de 0,1 % nécessiterait 139 000 TWh d'électricité, soit 5 fois la consommation annuelle mondiale. Le coût énergétique serait d'environ 7 000 milliards d'euros, sans compter les 20 000 milliards d'euros d'infrastructures. L'énergie récupérable sous forme d'hydrogène est d'environ 51 300 TWh, soit ~37 % de l'énergie consommée.

Méthode	Principe	Effet	Co-bénéfices	Potentiel	Principaux défis/dangers
Altération provoquée (AP)	Épandage de roches (sols agricoles et zones naturelles)	Captage du CO ₂ atmosphérique	Fertilisation des sols et stabilisation du pH	Limité par les très grandes masses de roches et surfaces d'épandage requises	Coût énergétique lié à l'extraction, broyage et transport des roches - Pollution et menaces en santé publique liées à accroissement activités minières - Implication des agriculteurs
Alcalinisation de l'océan (AO)	Ajout de minéraux alcalins dans l'océan	Accroissement de la capacité de l'océan à absorber CO ₂	Réduction de l'acidification de l'océan	Limité par masses de roches requises et leur transport par bateaux	Coût énergétique (voir AP) - Pollution/santé publique (voir AP) - Potentiel impact sur les écosystèmes marins - Nécessité acceptation sociale et gouvernance mondiale
Électrolyse de l'eau de mer	Mise en œuvre de réactions électrochimiques dans un milieu réactionnel confiné pour modifier le pH de l'eau de mer	Suppression de CO ₂ ou accroissement de la capacité de stockage CO ₂ dans l'eau de mer		?	?

Tableau 2 : Bilan des méthodes d'altération provoquée et d'alcalinisation de l'océan.

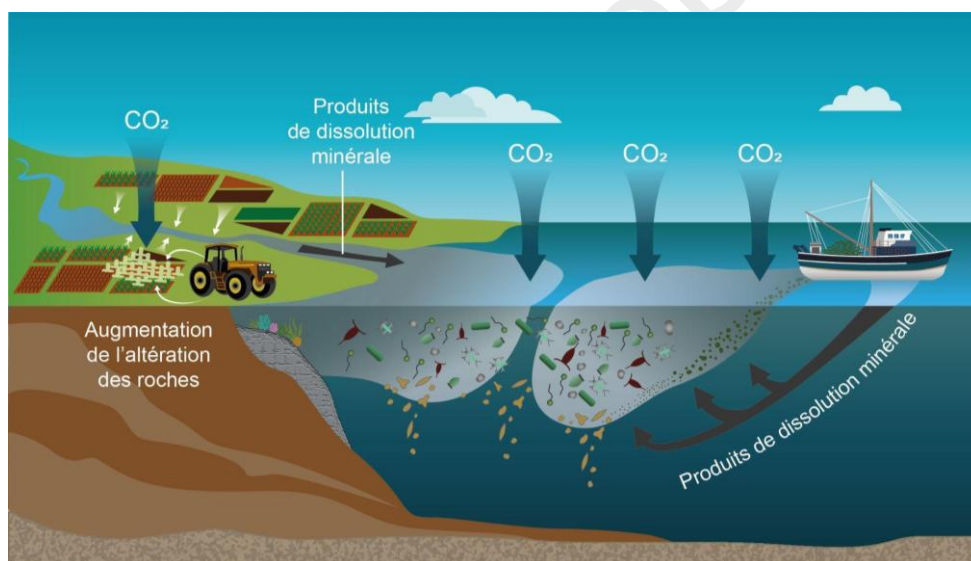


Figure 2.3 : Schéma général de l'altération provoquée (AP) et de l'alcalinisation océanique (AO). Traduit d'après Bach et al. [2019].

L'AP et l'AO entraîneraient le rejet de produits issus de la dissolution minérale dans les milieux marins, avec des conséquences encore largement inconnues pour les écosystèmes marins et les cycles biogéochimiques qui s'y déroulent. Au cours de l'AP, les produits issus de la dissolution minérale pénètrent dans l'océan principalement par les fleuves, de sorte que les perturbations se produisent d'abord dans les régions estuariennes et côtières. Dans le cas de l'AO, les navires de transport pourraient acheminer les minéraux vers les régions côtières ou plus au large, et les sites de distribution seraient alors les plus fortement touchés.

3. Synthèse et recommandations

L'altération provoquée (AP) et l'alcalinisation de l'océan (AO) sont deux stratégies permettant de piéger le CO₂ atmosphérique de manière durable, inspirées de processus naturels et dont la figure 2.3 donne une vision d'ensemble. Cependant, leur mise en œuvre à grande échelle se heurte encore à plusieurs défis majeurs.

Pour cela, l'Académie recommande :

1. D'évaluer leur efficacité climatique : des recherches approfondies et des expérimentations pilotes sont nécessaires pour réduire les incertitudes sur leur capacité à diminuer significativement la concentration de CO₂ atmosphérique. Leur efficacité dépend de nombreux facteurs, tels que :
 - la vitesse réelle de dissolution des minéraux,
 - les dynamiques de transport et de mélange des eaux alcalinisées,
 - la faisabilité logistique et économique du déploiement à grande échelle.
2. D'évaluer leurs conséquences environnementales : les effets potentiels sur les sols, les écosystèmes terrestres et marins doivent être rigoureusement étudiés, en particulier dans le cas de l'alcalinisation de l'océan.
3. D'évaluer les coûts associés et le potentiel pour les réduire : l'extraction, le broyage et le transport des minéraux impliquent des coûts énergétiques et logistiques importants, qu'il est nécessaire d'optimiser pour rendre ces méthodes viables. Une question centrale est celle de l'identification de l'échelle à laquelle ces méthodes pourront être raisonnablement déployées, en tenant compte de toutes les dimensions de soutenabilité et faisabilité.
4. De veiller à obtenir un soutien politique et social : la mise en œuvre de ces approches nécessite non seulement des investissements substantiels et un cadre réglementaire adapté, mais aussi l'implication des populations, notamment dans le cas de l'altération provoquée, qui intervient souvent à proximité des zones habitées.
5. Renforcer les cadres réglementaires internationaux pour anticiper les enjeux de gouvernance, de risques transfrontaliers et d'acceptabilité des techniques, notamment celles impliquant des manipulations à grande échelle de l'océan.

Synthèse des recommandations pour le CDR

Le recours au CDR doit nécessairement s'inscrire en complément d'une réduction profonde, rapide et soutenue des émissions de GES. Son rôle est de réduire les émissions nettes, pour atteindre la neutralité carbone, voire parvenir à des émissions nettes négatives pouvant conduire à une diminution de température ou permettre de contrebalancer un rejet de carbone issu de sources naturelles.

Recommandation CDR 1 - Soutenir la recherche sur les différentes méthodes de stockage dans la biomasse vivante terrestre et les sols, qui sont à ce jour les seules immédiatement implémentables à moindre coût et avec de nombreux co-bénéfices, afin d'évaluer rigoureusement leur coût, leur efficacité, leur durabilité, leur acceptabilité sociale et leurs conséquences environnementales.

Recommandation CDR 2 - Poursuivre la recherche sur les mécanismes biogéochimiques marins afin d'évaluer la durabilité et l'efficacité nette des méthodes de stockage qui pourraient être exploitées.

Partie 3 : Les méthodes de captage, stockage et valorisation du CO₂ – CCUS

Préambule : Les méthodes de captage, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS, pour *Carbon Capture, Utilization & Storage*³³) ne relèvent de la géo-ingénierie climatique que lorsqu'elles visent à retirer du carbone déjà présent dans l'atmosphère. En règle générale, elles constituent avant tout des leviers de décarbonation destinés à réduire les émissions issues des usages industriels et énergétiques des combustibles fossiles.

L'origine et le devenir du carbone capté sont ici déterminants :

- Quand le CO₂ retiré provient directement de l'atmosphère dans le cas du DACCS (*Direct Air Capture and Storage*) ou qu'il a été capté dans l'atmosphère par la biomasse dans le cas du BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*), il s'agit bel et bien d'approches de géo-ingénierie pouvant s'inscrire dans des méthodes de CDR (*Carbon dioxide removal*) – qui ont été considérées dans la partie 2 du présent rapport – dès lors que le stockage est durable³⁴ ;
- À l'inverse, le captage post-combustion, réalisé à la source des émissions, à la sortie d'usines ou de centrales, relève d'une logique d'atténuation.

Smith et al. [2024]³⁵ rappelle cette distinction et en précise la portée.

Afin de situer l'ensemble des méthodes de décarbonation susceptibles de contribuer à la stabilisation des concentrations atmosphériques de CO₂, le présent rapport intègre néanmoins une présentation des différentes méthodes de captage, stockage et valorisation du CO₂, tout en reconnaissant qu'elles dépassent le périmètre strict de la géo-ingénierie climatique. La figure 3.3 replace ces méthodes dans un cadre général.

Dans un premier temps, le présent chapitre considèrera les méthodes visant le retrait de carbone de l'atmosphère (prolongeant les approches de CDR étudiées dans le chapitre 2), avant d'élargir le périmètre d'étude en considérant l'ensemble des méthodes de CC(U)S dans le cadre de la décarbonation de systèmes énergétiques ou industriels. En effet, une part importante des émissions dites résiduelles, celles qui subsistent malgré la mise en œuvre des mesures de réduction et d'atténuation, provient de secteurs tels que la cimenterie³⁶, les hauts fourneaux³⁷ ou les raffineries³⁸, où le captage du CO₂ à la source constitue l'une des principales voies de décarbonation. Dans ces secteurs, des technologies de captage post-combustion, notamment à partir de fumées concentrées en CO₂, sont relativement matures sur le plan technique, en particulier dans le cas des cimenteries. Leur intégration industrielle continue à se développer.

³³ Cet acronyme peut être décomposé en CCS - *Carbon Capture & Storage* - et CCU - *Carbon Capture & Utilization*.

³⁴ Ce n'est pas nécessairement le cas : la production de carburants, par exemple, à partir de DAC ne relève pas du CDR car le carbone retiré repart directement dans l'atmosphère lors de la combustion du carburant qu'il a permis de produire.

³⁵ Voir notamment l'encadré p24 sur la clarification des périmètres de chaque approche.

³⁶ La réaction de décarbonatation du calcaire ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) lors de la fabrication du ciment est à l'origine d'une part importante des émissions de CO₂ de cette industrie.

³⁷ Par exemple, la réaction de réduction chimique du minerai de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$) dans les hauts fourneaux pour la sidérurgie est à l'origine d'une part importante des émissions de CO₂ de cette industries.

³⁸ Par exemple, le torchage, utilisé dans l'industrie pétrolière pour évacuer, en le brûlant, le gaz naturel qui s'échappe lors de l'extraction du pétrole conduit alors à la formation de CO₂ ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$).

Le captage direct du CO₂ dans l'air - DAC

Cette approche de géo-ingénierie climatique constitue une piste émergente, encore à développer, mais à fort potentiel en particulier dans les zones situées à proximité des sites de stockage. Elle vise à capter le CO₂ en très grandes quantités directement à partir de l'atmosphère où il est très faiblement concentré³⁹. Les principales méthodes proposées sont les suivantes :

- ♦ Solvants liquides (potasse caustique) : cette technologie est mature, avec des installations pilotes (Carbon Engineering). Elle est efficace, mais très gourmande en énergie.
- ♦ Sorbants solides (amines sur supports) : cette technologie est commercialisée à petite échelle (Climeworks). Son efficacité énergétique est bonne mais la dégradation des sorbants augmente le coût du processus.
- ♦ Carbonatation minérale : cette approche rejoint le principe de l'altération accélérée (voir chapitre 3 partie 2). La méthode est naturelle et stable mais peu contrôlable et lente. Sa maturité est variable suivant les procédés (Heirloom en phase de test).
- ♦ Électro-swing : cette méthode (MIT, Verdox) repose sur les propriétés des quinones, qui absorbent ou libèrent le CO₂ selon qu'une charge électrique positive ou négative leur est appliquée, sans circulation de courant continu [Voskian & Hatton, 2019]. Elle est prometteuse en raison de sa faible consommation d'énergie : à titre de référence, l'antraquinone peut supporter plus de 10 000 cycles, avec un coût de captage estimé autour de 100 €/tCO₂.

Les méthodes de valorisation du CO₂ - CCU

Le CCU (selon l'acronyme de *Carbon capture and utilization*) correspond aux méthodes industrielles qui capturent le CO₂ pour le convertir en produits. Si le CCU utilise du CO₂ issu de l'atmosphère, cela peut relever du CDR à condition que le stockage soit durable (ex. agrégats de béton). Dans les faits néanmoins, la plupart des produits (gazéification, carburants, etc.) ont une durée de vie courte (le CO₂ extrait de l'atmosphère est ainsi relargué très vite).

Toute méthode de valorisation du CO₂ se heurte à une difficulté fondamentale : comme l'eau et la chaleur, le CO₂ est un déchet ultime, produit final de nombreuses réactions chimiques spontanées ou provoquées (combustion, respiration ou fermentation), ainsi que d'activités industrielles (production de ciment ou d'acier par exemple). Revenir en arrière dans un processus de transformation implique inévitablement l'utilisation d'une source d'énergie. Ainsi, des carburants peuvent être produits à partir du CO₂ en utilisant les surplus d'énergie ; la biomasse peut être convertie en biocarburants tout en captant le CO₂ émis et en le stockant dans des réservoirs géologiques, ou être conservée sous forme solide grâce à la pyrolyse, qui produit un résidu carboné appelé biochar, ensuite enfoui dans les sols. Ces procédés, regroupés sous l'appellation BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*), permettent ainsi de générer de l'énergie tout en retirant durablement du carbone de l'atmosphère. Seule une partie du CO₂ utilisé est effectivement soustraite, au prix d'une consommation importante d'énergie qui devra être décarbonée (solaire, éolienne, nucléaire).

³⁹ La concentration du CO₂ dans l'atmosphère est de 442 ppm, soit 0,042%.

Par ailleurs, de l'hydrogène peut être produit pour être combiné à du CO₂ (par exemple issu de l'extraction directe ou du captage à la source) pour fabriquer du méthane ou du méthanol. La combustion des carburants libère à nouveau du CO₂ qui retourne à l'atmosphère.

Le CCU est souvent présenté comme une voie prometteuse en substitut à l'usage de matières premières fossiles en utilisant le CO₂ capté comme matière première pour la production de matériaux de construction et de produits chimiques de synthèse. En particulier, le CO₂ peut être utilisé pour synthétiser de l'urée, engrais largement répandu. Le processus de synthèse de l'urée à partir du CO₂ et de NH₃ (ammoniac) est connu sous le nom de procédé Bosch-Meiser. La synthèse préalable de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène par le procédé Haber-Bosch rend l'ensemble du procédé extrêmement coûteux en énergie. Transformer le CO₂ en produits utiles peut avoir un intérêt économique, mais contribue peu à la lutte contre le changement climatique.

Aujourd'hui, la principale méthode de valorisation est la récupération assistée d'hydrocarbures (EOR pour *Enhanced Oil Recovery*), qui consiste à injecter du CO₂ dans des gisements de pétrole pour augmenter le rendement de l'extraction. Cette méthode n'a un bilan positif que si la quantité de CO₂ injectée est supérieure aux émissions liées à l'extraction, au raffinage et à la combustion du pétrole ainsi produit. Son efficacité est très variable et dépend fortement des caractéristiques du réservoir, du type de pétrole et des conditions locales.

Le stockage du CO₂ - CCS

La figure 3.1 propose une vue d'ensemble des processus du CCS⁴⁰.

1. Les étapes du stockage de CO₂.

Une fois capté, un préalable au stockage du CO₂ consiste généralement à faire passer ce gaz sous forme supercritique⁴¹. Ce processus consiste à chauffer le gaz au-dessus de 31 °C et à le comprimer à une pression supérieure à 74 bars. Dans cet état, le CO₂ possède la densité d'un liquide, ce qui permet de réduire son volume, tout en lui conservant sa capacité de circuler comme un gaz, ce qui facilite son injection. Cette transformation est particulièrement utile dans les techniques de stockage géologique du carbone, car elle facilite l'injection du CO₂ dans les formations rocheuses poreuses du sous-sol, tout en améliorant sa stabilité à long terme.

Les méthodes de stockage du CO₂ (CCS) consistent à séquestrer le CO₂ dans le sous-sol terrestre pour de longues périodes. Cette technologie s'inspire du fonctionnement des réservoirs géologiques naturels de carbone, qui contiennent du charbon, du pétrole ou du gaz, combustibles fossiles qui ont été et sont encore extraits puis brûlés, à l'origine des émissions de CO₂ anthropiques depuis la révolution industrielle. Le CO₂ est injecté dans des formations géologiques profondes (plus de 800 mètres), perméables, capables d'accueillir le gaz sous forme de fluide supercritique. Ces formations doivent être surmontées de couches imperméables qui assurent la rétention à long terme. Une fois injecté, le CO₂ interagit avec les roches hôtes poreuses, où, suivant la nature géologique du réservoir, il peut rester piégé pendant des centaines voire des milliers ou millions d'années. Dans certains cas, il peut se stabiliser en partie sous la forme de carbonates solides.

⁴⁰ Voir également Czernichowski-Lauriol I. (2020) Captage et Stockage du CO₂ : le puits de carbone géologique (CO₂ Capture and Storage: the geological carbon sink). *Comptes Rendus Géoscience de l'Académie des Sciences*. <https://doi.org/10.5802/crgeos.20>

⁴¹ Le CO₂ peut également être injecté sous forme dissoute dans l'eau.

La capacité des réservoirs souterrains à stocker le CO₂ sans fuite est un enjeu essentiel, objet de nombreuses recherches. Certaines roches, comme les basaltes, les péridotites ou les roches riches en feldspaths, réagissent avec le CO₂ pour former des carbonates stables, assurant une bonne étanchéité. D'autres, telles que les dolomies ou les grès, sont moins réactives et présentent un risque de fuite. Une surveillance continue est donc indispensable pour prévenir des incidents technologiques ou sismiques et elle permettra de renforcer l'acceptabilité publique du stockage. Le stockage sous-marin apparaît comme une option privilégiée.

Il existe un certain nombre de projets préliminaires portant sur la minéralisation directe du CO₂ dans les roches riches en magnésium, notamment les laves basaltiques [Kelemen et al., 2019]. En particulier, le projet CarbFix en Islande a démontré l'injection de CO₂ et sa minéralisation effective dans des roches basaltiques à des profondeurs allant de 300 à 1 000 mètres. Les quantités de carbone stocké sous forme dissoute et minérale solide sont bien moindres que celles stockées sous forme principalement supercritique et dissoute comme à Sleipner [Kelemen et al., 2019].

Chaque tonne de CO₂ nécessite environ 25 tonnes d'eau pour le processus d'injection. Ce CO₂ réagit avec le calcium et le magnésium présents dans la roche basaltique pour former des minéraux carbonatés très stables. 95 % du CO₂ injecté est ainsi minéralisé en l'espace de deux ans, ce qui est beaucoup plus rapide que ce que prévoyaient les estimations initiales.

Le CO₂ injecté par CarbFix provient d'une centrale géothermique. Climeworks est une entreprise suisse pionnière dans la technologie du DAC. Elle développe et exploite des unités capables de filtrer le CO₂ présent dans l'atmosphère à l'aide de matériaux adsorbants. Le CO₂ ainsi capté peut être soit réutilisé dans des procédés industriels, soit stocké de manière permanente dans des formations géologiques profondes. En 2021, Climeworks a inauguré en Islande Orca, la plus grande usine de DAC en activité au monde. Située près de la centrale géothermique de Hellisheiði, Orca vise à éliminer 4 ktCO₂/an en le captant directement dans l'air et en le minéralisant et en le stockant dans les roches basaltiques islandaises [Kelemen et al., 2019] grâce à la technologie de l'entreprise Carbfix, transformant le gaz en roche solide en quelques années. Cependant, l'usine n'a pas atteint 1 ktCO₂/an d'élimination nette depuis le début de son exploitation en 2021 et les perspectives sont très incertaines⁴².

⁴² <https://www.swissinfo.ch/eng/climate-solutions/why-swiss-carbon-removal-start-up-climeworks-faces-serious-headwinds/89386618>

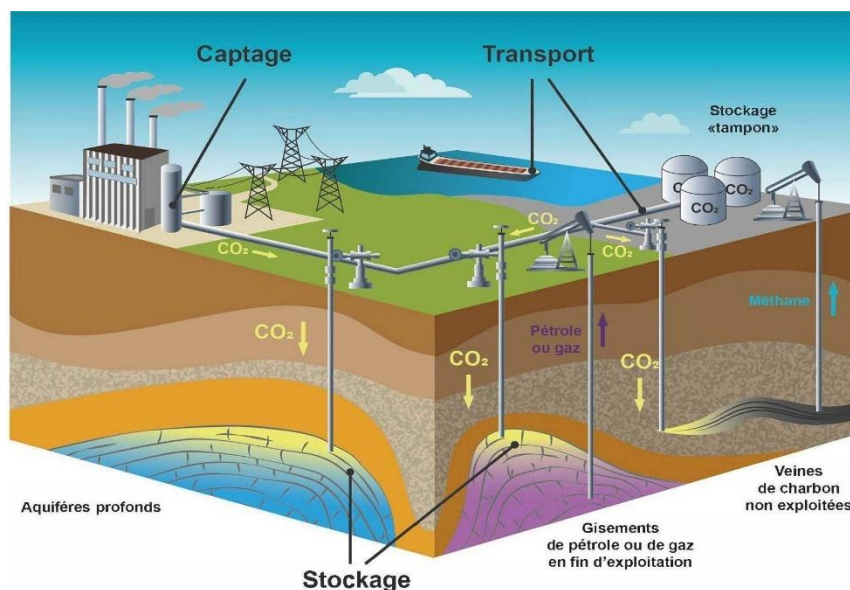


Figure 3.1 : Schéma des processus du CCS. Modifié d'après BRGM.

2. Le potentiel de stockage de CO₂

Les références scientifiques disponibles sur ces technologies demeurent relativement limitées et ce chapitre s'appuie sur une compilation des sources les plus pertinentes actuellement disponibles, et notamment sur l'avis du Haut Conseil pour le Climat [HCC, 2023]. Le rapport se focalise, non sur une vision des efforts à l'échelle globale, qui sont largement hors d'atteinte de notre communauté nationale, mais sur l'échelle française et l'échelle européenne qui offre plus d'opportunités pour les politiques, les décideurs et les investisseurs. Les chiffres globaux serviront surtout de référence.

Le CCS est une technologie de décarbonation encore marginale mais, comme en témoignent plusieurs projets industriels et pilotes, éprouvée. Le déploiement de cette technologie au plus près des principaux pôles industriels devrait constituer une priorité à l'échelle mondiale. Le rapport du HCC [2023] fait état de 17 installations opérationnelles dans le monde. Il s'agit, par exemple, du projet d'Equinor à Sleipner sous la mer du Nord, où 1 MtCO₂ par an est injecté sous terre dans un aquifère* salin profond depuis 1996, ou du projet de Total Energies à Lacq-Rousse où 51 ktCO₂ ont été injectées dans un ancien réservoir de gaz entre 2010 et 2013.

Dans le monde

La capacité maximale de stockage géologique de CO₂ à l'échelle mondiale pourrait atteindre 16 GtCO₂/an d'ici 2050 [Zhang et al., 2024]. Cette estimation repose néanmoins sur des hypothèses ambitieuses concernant le rythme de déploiement technologique, la disponibilité des formations géologiques adaptées et, jusqu'à une date récente⁴³, la contribution majeure des États-Unis, qui devaient représenter à eux seuls environ 60 % de ce total. Cette valeur représente un peu moins de la moitié des émissions annuelles de CO₂ mondiales (37 GtCO₂ en 2023). Néanmoins, dans des scénarios plus réalistes, tenant compte des contraintes géologiques, économiques et politiques actuelles, l'étude de Gidden et al. [2025] fixe une limite planétaire à environ 1 460 Gt de stockage de CO₂, sur la base d'une analyse spatiale explicite et fondée sur les risques du stockage du carbone dans les bassins sédimentaires.

⁴³ L'arrêt des financements de l'IRA décidé par l'administration Trump invite à revoir à la baisse ces estimations.

Les projets peuvent être développés à l'échelle mondiale et pourraient être importants dans des régions telles que les Émirats Arabes Unis, où il existe d'abondantes roches basaltiques. Il en est de même pour l'Arabie Saoudite qui dispose de roches basiques abondantes à proximité de la mer Rouge (la disponibilité d'eau de mer en abondance est en effet un point crucial).

En Europe

L'Europe et la France ont joué un rôle moteur dans la compréhension des enjeux scientifiques, techniques et sociétaux du CCS. La France dispose de compétences et d'infrastructures, notamment dans ses régions industrielles, mais son potentiel (1,5 à 8,6 GtCO₂, [HCC, 2023]) est modeste par rapport à ses partenaires nord-européens (capacité potentielle d'environ 350 GtCO₂ des bassins de la mer du Nord) [EU GeoCapacity, 2009]. La France participe toutefois activement à des initiatives de coopération européenne pour mutualiser l'accès aux capacités de stockage de la mer du Nord, notamment en lien avec ses partenaires nordiques et le secteur industriel.

Comme le montre la figure 3.2, l'Europe est avancée dans ses projets pilotes de CCS, notamment à la faveur de l'évaluation du potentiel offshore de la mer du Nord. Ce potentiel de stockage de CO₂ en Europe est important et estimé à environ 360 GtCO₂ (1/3 onshore, 2/3 offshore) [EU GeoCapacity, 2009], soit un millier d'années d'émissions françaises de CO₂ au rythme de 2023. En particulier, les sites au large de la Norvège exploités par le groupe pétrolier norvégien Equinor (anciennement Statoil) pourraient contenir un stockage conséquent pour une grande partie de l'Europe dans un avenir proche [European Commission, 2018]. La France (France GRT Gaz), par exemple, collabore avec Equinor pour connecter le centre industriel de Dunkerque à leurs sites de stockage. Un terminal dédié au CO₂ est en cours de développement à Loon-Plage, avec une mise en service prévue pour 2028 [Clean Air Task, 2022]. Ce terminal aura une capacité de traitement de 1,5 MtCO₂/an (phase 1) jusqu'à 5 à 7 MtCO₂/an à partir de 2026, facilitant ainsi l'exportation du CO₂ capté vers des sites de stockage en mer du Nord. D'autres pays européens, et notamment l'Allemagne, envisagent de transporter leur CO₂ vers des sites de stockage souterrains et sous-marins en mer du Nord [EU GeoCapacity, 2009]. La figure 3.2 fournit un aperçu de l'ensemble des projets européens, en développement ou opérationnels.

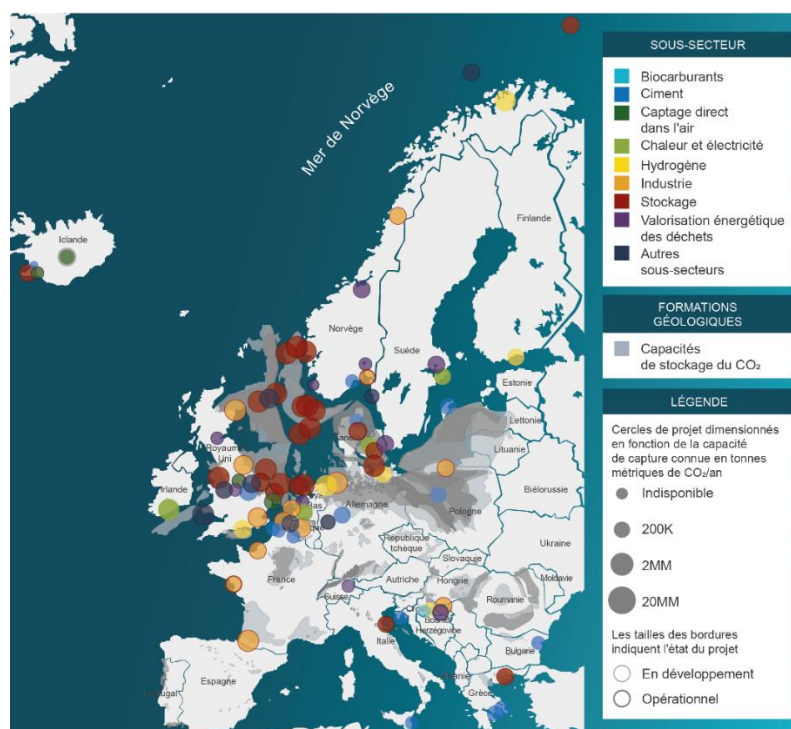


Figure 3.2 : Carte des projets européens. Traduit d'après Clean Air Task [2024].

En France

La France dispose dans son sous-sol de nombreux gisements naturels de CO₂ présents depuis des millions d'années (notamment dans la vallée du Rhône), ainsi que des sources d'eaux carbo-gazeuses (Perrier, Badoit, etc.). La présence de CO₂ est liée à la remobilisation de matériaux à la suite d'événements tectoniques alpins et du volcanisme dans le Massif central. Ces formations ont permis de mieux comprendre les mécanismes de piégeage et de migration du CO₂.

Le site gazier de Lacq, dans les Pyrénées-Atlantiques, a également servi de pilote pour le CCS. Bien qu'il soit éloigné des grands bassins d'émissions, son héritage reste structurant, en particulier pour le projet Pycasso, récemment abandonné. Ce site a été déclassé en 2008. D'autres bassins géologiques, comme celui de Paris (incluant la région Lorraine), présentent un fort potentiel de stockage et font l'objet d'études.

Le potentiel total de stockage en France est estimé à 8,6 GtCO₂, équivalent à deux ans d'émissions nationales. Le Bassin parisien est particulièrement favorable : il dispose d'aquifères souterrains peu exploités pour d'autres usages et est proche de nombreux sites industriels. En revanche, la capacité nationale reste faible comparée à d'autres pays, notamment ceux disposant d'un accès à des stockages offshore massifs (cf. section sur l'Europe ci-avant).

Le stockage en France à terre ou en mer devrait être possible et des études approfondies sont nécessaires pour évaluer le potentiel [BRGM-EVASTOCO₂, 2025]. Des projets de captage et d'exportation sont en cours. Les installations industrielles peuvent certainement contenir le CO₂ qu'elles produisent. C'est le cas de la décarbonisation du bassin de Dunkerque, actuellement en phase de préprojet avec Air Liquide. Dans les Pays de la Loire (projet GOCO₂), le CO₂ devrait être exporté et stocké sous la mer du Nord.

Le CCS est avant tout un outil d'évitement d'émissions de CO₂. Il revêt un intérêt stratégique pour la décarbonation des grands sites industriels fortement émetteurs et concentrés, pour lesquels les alternatives décarbonées sont aujourd'hui inexistantes ou limitées. Son potentiel demeure restreint et concerne à ce jour essentiellement les cimenteries [HCC, 2023].

Les limites, risques et objections

Si le site de stockage géologique est correctement sélectionné et géré, le CO₂ peut être isolé de manière permanente de l'atmosphère [IPCC, 2022b]. Les risques techniques liés au stockage sont considérés comme minimes, à condition que :

- La qualité des sites soit rigoureusement évaluée (capacité, enfouissement sous-marin, proximité des sites d'émission, fuites minimales, acceptation sociale),
- Une surveillance géophysique et géochimique des formations souterraines soit assurée,
- Les éventuelles fuites, notamment celles qui pourraient ne se manifester qu'à long terme, soient suivies et maîtrisées.

Par ailleurs, le coût énergétique, la consommation d'eau et d'intrants chimiques associés doivent être maîtrisés. En particulier, les besoins additionnels en eau sont actuellement de l'ordre de 2 à 4m³ d'eau/tCO₂ capturé [HCC, 2023], ce qui constitue un aspect important à prendre en compte face aux tensions croissantes sur la ressource en eau dans un climat plus chaud.

Si le BECCS peut, en principe, contribuer aux émissions négatives, la technologie se heurte à la concurrence pour l'usage des terres. Le développement des biocarburants se fait déjà au détriment de la sécurité alimentaire, de la préservation de la biodiversité et d'autres services écosystémiques, ce qui rend nécessaire l'établissement de choix clairs.

Par ailleurs, les modalités de transport éventuel du CO₂ entre les sites de production et les sites d'enfouissement (pipelines, camions, bateaux), ainsi que les coûts associés, demeurent incertains, et le raccordement entre les sites d'émission et les sites de stockage constitue un enjeu logistique et économique majeur. L'acceptabilité du CCS reste également un point sensible, notamment dans les territoires qui devront accueillir les sites de stockage. Elle requiert des recherches en sciences humaines et sociales sur les méthodes de délibération et de médiation, champs qui ne sont pas discutés dans le présent rapport.

Enfin, le DAC requiert de grandes quantités d'énergie. L'électricité bas-carbone disponible doit pourtant être utilisée prioritairement pour remplacer le recours aux combustibles fossiles (décarbonation des usages) et ainsi réduire directement les émissions de GES, avant de pouvoir être allouée au DAC.

Synthèse et recommandations

Le CCS constitue une option de réduction des émissions des grandes sources fossiles et industrielles, sous réserve de la disponibilité de sites de stockage géologique adaptés et socialement acceptés. Son déploiement doit cibler en priorité les secteurs pour lesquels il n'existe pas encore d'alternatives techniquement et économiquement viables, ou dont les solutions de substitution bas-carbone, comme l'hydrogène, ne sont pas matures. Les cimenteries apparaissent aujourd'hui comme la cible prioritaire.

La mise en œuvre du CCS se heurte aujourd'hui à des obstacles technologiques, économiques, institutionnels, environnementaux et sociétaux. Les taux mondiaux actuels de déploiement pour les

secteurs difficiles à décarboner demeurent largement inférieurs à ceux prévus dans les scénarios modélisés visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ou 2 °C [IPCC, 2023].

À la lumière de ces éléments, l'Académie des sciences recommande :

1. D'accélérer l'identification et la caractérisation des capacités de stockage géologique en France et en Europe.

Une meilleure connaissance du sous-sol est indispensable pour planifier un déploiement sécurisé et efficace du stockage de CO₂. Ces mesures impliquent de mener des campagnes d'exploration approfondies, de disposer de bases de données géologiques ouvertes, fiables et actualisées, et d'établir un cadre réglementaire stable et sécurisé pour permettre la mise en service et le suivi des sites de stockage géologique du CO₂.

2. De renforcer la recherche et l'expérimentation sur le captage direct du CO₂ atmosphérique (DAC).

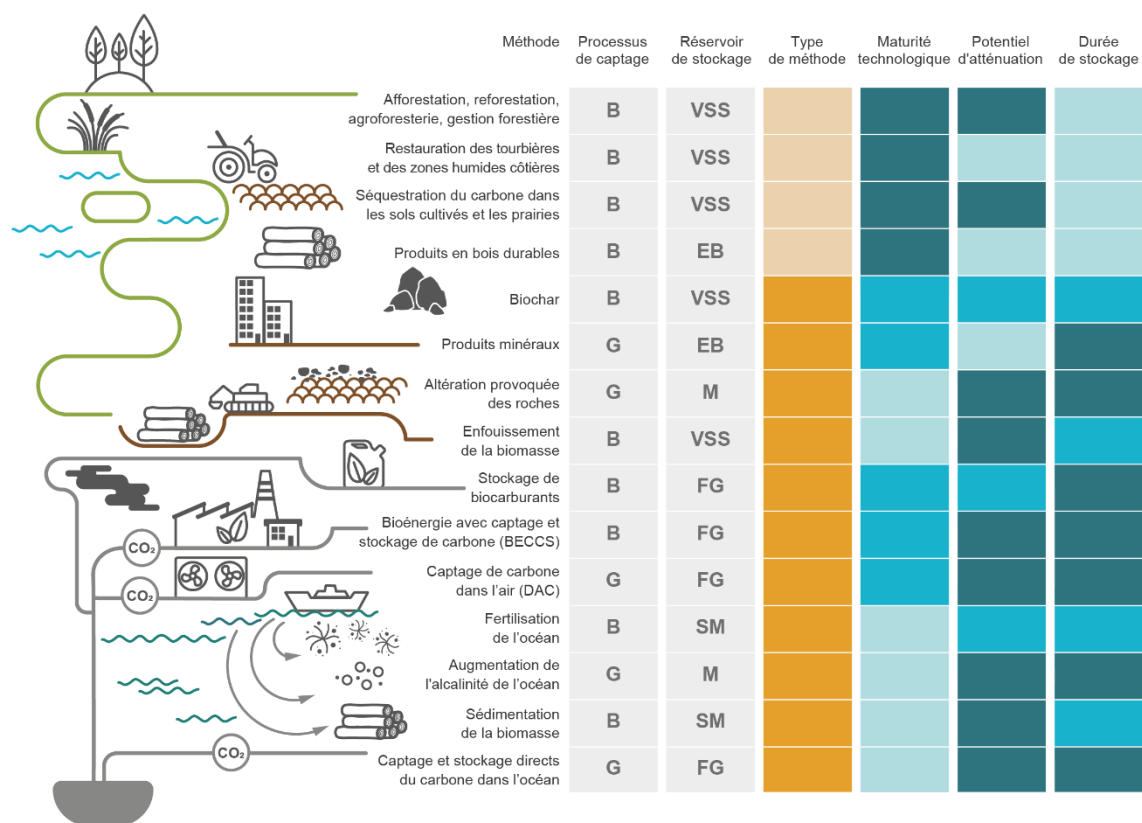
Il s'agit en particulier d'en déterminer les coûts, potentiels, limites et faisabilité.

3. De garantir la transparence et d'améliorer les méthodes de délibération ou de participation du public.

L'acceptabilité sociale et environnementale de tout projet de stockage nécessite un dispositif rigoureux de suivi, de transparence et de communication. L'implication des parties prenantes locales et du monde éducatif et la mise en place de dispositifs de gouvernance partagée sont indispensables pour garantir la légitimité et la durabilité des projets.

4. D'inscrire le CCS dans une stratégie globale de décarbonation.

Le CCS doit s'articuler avec les politiques de réduction des émissions de secteurs particulièrement difficiles à décarboner, d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables, voire de redirection des excédents éventuels de production de ces énergies.



LÉGENDE:

B Biologique	VSS Végétation, sols et sédiments	Conventionnel	Haut	Élevé	> Dix millénaires
G Géochimique	EB Environnement bâti	Innovant	Moyen	Modéré	Des siècles aux millénaires
	FG Formations géologiques		Bas	Faible	Des décennies aux siècles
	SM Sédiments marins				
	M Minéraux				

Figure 3.3 : Résumé des méthodes d'élimination du CO₂, décrivant, pour chacune, le processus de captage et le réservoir de stockage, sa classification en tant que méthode conventionnelle ou innovante, son niveau actuel de maturité technologique en vue d'un déploiement à grande échelle, son potentiel maximal d'atténuation (élevé : > 9 GtCO₂/an ; modéré : 3-9 GtCO₂/an ; faible : < 3 GtCO₂/an) et sa durée caractéristique de stockage. Traduit d'après Smith et al. [2024].

Conclusion

L'ensemble des travaux de modélisation du climat et la compréhension du fonctionnement physique du climat, sur lesquels s'appuient les évaluations du GIEC, indique que, sans une réduction drastique des émissions de GES, la température moyenne mondiale pourrait dépasser les objectifs critiques fixés par l'Accord de Paris⁴⁴, entraînant des effets délétères irréversibles sur les écosystèmes et les sociétés humaines.

Dans ce contexte, la géo-ingénierie climatique ne constitue ni une alternative à la réduction des émissions de GES, ni une solution technologique miracle. Elle regroupe un ensemble de technologies très diverses, dont certaines peuvent constituer des options complémentaires à la réduction des émissions et à l'adaptation à considérer avec prudence, tandis que d'autres suscitent une vive inquiétude.

L'analyse menée par l'Académie des sciences, à la lumière des auditions d'experts reconnus dans les domaines concernés et d'une revue de la littérature scientifique disponible, montre qu'aucune de ces approches ne peut aujourd'hui être déployée à grande échelle sans incertitudes scientifiques majeures, impacts environnementaux potentiels, dont certains irréversibles, entraînant des risques géopolitiques sérieux.

Les techniques de modification du rayonnement solaire (SRM), qui visent à renvoyer davantage de rayonnement solaire vers l'espace⁴⁵, s'attaquent aux symptômes du réchauffement et non à ses causes, et ne permettent, au mieux, qu'un effet de refroidissement net temporaire sur le climat terrestre. Le risque de "choc terminal", réchauffement global rapide en cas d'arrêt du SRM alors que les concentrations atmosphériques de GES restent élevées, est majeur. Il entraînerait des perturbations climatiques soudaines, auxquelles ni les sociétés ni la biodiversité ne pourraient s'adapter. Ces techniques posent des questions majeures d'ordre éthique, sociétal et géopolitique, en raison de leurs effets potentiellement rapides, globaux – les aérosols émis dans l'atmosphère n'ayant pas de frontières – dévastateurs et difficilement réversibles.

En contrepoint, les méthodes d'élimination et stockage à long terme du carbone (CDR) s'attaquent effectivement à la cause du changement climatique. Celles-ci apparaissent nécessaires à moyen terme pour compenser les émissions résiduelles difficiles à éviter et, potentiellement, pour ramener la température sous les seuils fixés en cas de dépassement. Toutefois, leur efficacité, leur faisabilité à grande échelle, leur coût et leurs répercussions environnementales font encore l'objet de nombreuses incertitudes. Certaines techniques sont scientifiquement étayées, facilement implémentables et permettraient de stocker une part significative de nos émissions à un coût modeste (stockage de matière organique et biochar dans le sol), alors que d'autres sont encore très spéculatives et non matures technologiquement.

Par ailleurs, les méthodes de captage, stockage et valorisation du carbone (CCUS), qui visent à réduire les émissions résiduelles des activités pour lesquelles il n'existe pas de technologie bas-carbone accessible techniquement ou économiquement, et, dans une moindre mesure, à capter directement

⁴⁴ Nous l'avons dit, les objectifs de l'accord de Paris (limiter le réchauffement sous 2°C et aspiration à renforcer les efforts pour le limiter à 1,5°C) ont été déterminés par rapport au lien entre chaque incrément supplémentaire de réchauffement et l'aggravation de risques climatiques sévères. Les récents rapports du GIEC ont montré une réévaluation à la hausse de la sévérité de ces risques, pour un même niveau de réchauffement.

⁴⁵ Ou, pour certaines, à laisser échapper davantage de rayonnement infrarouge depuis la Terre.

du CO₂ dans l'atmosphère, grâce à des technologies encore émergentes, relèvent davantage d'un levier de décarbonation que d'une méthode de géo-ingénierie climatique à grande échelle au sens strict. Une fois capté, le CO₂ peut être valorisé comme matière première pour fabriquer divers produits, se substituant ainsi à l'utilisation de ressources carbonées fossiles, mais avec un effet climatique qui dépend de la durée de vie du produit, du type de produit qu'il remplace et de la source de CO₂. Le CO₂ peut aussi et surtout être stocké durablement dans des formations géologiques adaptées : le potentiel de stockage mondial est important mais dépend de contraintes géologiques, économiques et sociétales. En France et en Europe, plusieurs projets pilotes sont en cours, notamment autour de la mer du Nord, qui offre un potentiel de stockage offshore important.

L'Académie des sciences considère dès lors que certaines méthodes de CDR et de CCUS peuvent constituer des outils complémentaires aux efforts de réduction des émissions de CO₂ ; elles ne sauraient toutefois, en aucun cas, s'y substituer.

L'Académie des sciences recommande :

S'agissant des méthodes de modification du rayonnement solaire (SRM), de :

Recommandation SRM 1 - Promouvoir un accord international visant à interdire toute initiative, publique ou privée, de déploiement du SRM, quel qu'en soit le cadre ou l'échelle. Pour ce faire, l'ensemble de la communauté scientifique devra être impliquée.

Recommandation SRM 2 - Soutenir et approfondir les recherches sur le climat, les processus physico-chimiques de l'atmosphère et la biodiversité afin de pouvoir évaluer rigoureusement le potentiel et les risques du SRM.

Recommandation SRM 3 - Renforcer la recherche sur les questions éthiques, les risques et les mesures d'atténuation des risques liés à toute forme d'expérimentation climatique, que l'Académie des sciences rejette explicitement quels qu'en soient l'échelle, la nature ou l'initiateur.

Par ailleurs, la recherche sur le climat, sa perturbation par les activités humaines et sa modélisation devant bénéficier d'un soutien prioritaire (recommandation SRM2), l'Académie des sciences considère donc qu'il est inutile de labelliser une recherche spécifiquement SRM qui, en outre, n'a aucune légitimité en tant qu'option d'intervention.

S'agissant des méthodes d'élimination et stockage à long terme de carbone (CDR), de :

Recommandation CDR 1 - Soutenir la recherche sur les différentes méthodes de stockage dans la biomasse vivante terrestre et les sols, qui sont à ce jour les seules immédiatement implémentables à moindre coût et avec de nombreux co-bénéfices, afin d'évaluer rigoureusement leur coût, leur efficacité, leur durabilité, leur acceptabilité sociale et leurs conséquences environnementales.

Recommandation CDR 2 - Poursuivre la recherche sur les mécanismes biogéochimiques marins afin d'évaluer la durabilité et l'efficacité nette des méthodes de stockage qui pourraient être exploitées.

S'agissant des méthodes de captage, stockage et valorisation du carbone (CCUS), de :

Recommandation CCUS 1 - Accélérer l'identification et la caractérisation des capacités de stockage géologique en France et en Europe.

Recommandation CCUS 2 - Concernant le captage direct du CO₂ atmosphérique (DAC) : renforcer la recherche technologique et l'expérimentation tout en clarifiant les conditions de faisabilité d'ordre économique et environnemental.

Par ce rapport, l'Académie des sciences réaffirme son engagement à mettre la science au service de la décision politique, non comme un instrument de justification de solutions risquées, mais comme un outil d'orientation vers des politiques climatiques responsables, à la hauteur des défis à venir.

Cette contribution a pour objectif d'alimenter un débat éclairé sur le rôle potentiel de la géo-ingénierie dans les stratégies climatiques à venir. Si ce document ne se substitue pas à la lecture des rapports spécialisés issus des travaux des experts en climatologie, il vise à offrir un support de réflexion pour mieux appréhender les enjeux politiques, sociaux et environnementaux liés à ces technologies.

Références bibliographiques

- Anderegg W.L., Trugman A.T., Badgley G., *et al.* (2020) Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* **368**, eaaz7005. DOI: [10.1126/science.aaz7005](https://doi.org/10.1126/science.aaz7005)
- Aumont O. & Bopp L. (2006) Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles* **20** (2). <https://doi.org/10.1029/2005GB002591>
- Bach L.T., Gill S.J., Rickaby R.E.M., *et al.* (2019) CO₂ Removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems. *Frontiers in Climate* **1** <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00007>
- Bala G., Duffy P. B. & Taylor K. E. (2008) Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **105**, 7664–7669, <https://doi.org/10.1073/pnas.0711648105>
- Bastin J.F., Finegold Y., Garcia C., *et al.* (2019) The global tree restoration potential. *Science* **366**, Issue 6463. DOI: [10.1126/science.aay8108](https://doi.org/10.1126/science.aay8108)
- Baur S., Nauels A., Nicholls Z., *et al.*, (2023) The deployment length of solar radiation modification: an interplay of mitigation, net-negative emissions and climate uncertainty, *Earth System Dynamics* **14**, 367–381, <https://doi.org/10.5194/esd-14-367-2023>
- Baur S., Sanderson B. M., Séférian R., & Terray L. (2024) Solar radiation modification challenges decarbonization with renewable solar energy, *Earth System Dynamics* **15**, 307–322, <https://doi.org/10.5194/esd-15-307-2024>
- Bednarz E. M., Butler A. H., Vioni D., *et al.* (2023) Injection strategy – a driver of atmospheric circulation and ozone response to stratospheric aerosol geoengineering. *Atmospheric Chemistry and Physics* **23**, 13665–13684. <https://doi.org/10.5194/acp-23-13665-2023>
- Beerling D. J., Kantzas E.P., Lomas M. R., *et al.* (2020) Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering on croplands. *Nature* **583** (7815), 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Betts R. (2000) Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* **408**, 187–190. <https://doi.org/10.1038/35041545>
- Berger M., Kwiatkowski L., Ho D. T., & Bopp L. (2023) Ocean dynamics and biological feedbacks limit the potential of macroalgae carbon dioxide removal. *Environmental Research Letters* **18**(2), 024039. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb06e>
- Berger M., Comte A., Kwiatkowski L. & Bopp L. (2024) Unaccountable counting: the folly of incorporating open ocean carbon sinks in Nationally Determined Contributions. *Comptes Rendus. Géoscience* **356**, 123–137, <https://doi.org/10.5802/crgeos.271>
- BRGM (2025) Programme EVASTOCO₂ — Évaluation du potentiel de stockage géologique du CO₂ en France. Rapport final.
- Bony S., Bellon G., Klocke D., *et al.* (2013) Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation, *Nature Geoscience* **6**, 447–451, <https://hal.science/hal-01099394v1>
- Bossio D.A., Cook-Patton S.C., Ellis P.W., *et al.* (2020) The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature sustainability* **3**, 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Boyd P. W., & Trull T. W. (2007) Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters: Is there consensus? *Progress in Oceanography* **72** (4), 276–312. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.10.007>
- Bronsther J., Xu Y. (2025) The social costs of solar radiation management. *npj Climate Action* **4**, 69. <https://doi.org/10.1038/s44168-025-00273-y>
- Chabbi A., Lehmann J., Ciais P., *et al.* (2017) Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change* **7**, 307–309. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>
- Chen M., Gong L., Schott J., *et al.* (2025) Coupled feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems: 6. Labradorite dissolution, calcite growth, and clay precipitation at 60°C and pH 8.2–8.4. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **390**, 181–198. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.11.030>
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., *et al.* (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**, 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>

- Cipolla G., Calabrese S., Valerio Noto L., Porprato A. (2021) The role of hydrology for carbon sequestration II: From hydroclimatic scenarios to carbon-sequestration efficiencies. *Advances in Water Resources* **154**, 103934. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103934>
- Clean Air Task Force (2022) A Vision for a European CO₂ Infrastructure. Clean Air Task Force.
- Clean Air Task Force (2024) A Vision for the EU Net-Zero Transition (Rapport). [Lien](#).
- EFSE- Commissariat général au développement durable (2019) La séquestration du carbone par les écosystèmes français. La Documentation Française (ed.). Collection Théma Analyse, e-publication. [Lien](#).
- Cook-Patton S.C., Leavitt S.M., Gibbs D., *et al.* (2020) Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. *Nature* **585**, 545–550. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>
- Cooley S.R., Klinsky S., Morrow D.R. & Satterfield T. (2023) Sociotechnical considerations about ocean carbon dioxide removal - *Annual Review of Marine Science* **15** – pp 41-46. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-113850>
- de Baar H. J. W., Gerringa L. J. A., Laan P. & Timmermans K. R. (2008) Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization. *Marine Ecology Progress Series* **364**, 269–282. <https://doi.org/10.3354/meps07548>
- de Guglielmo Weber M., Kabbej S. & Hebbel Boutang L. (2023) Géo-ingénierie solaire : enjeux géostratégiques et de défense. *Observatoire Défense et Climat*. [Lien](#).
- Demenois J., Torquebiau E., Arnoult M.H., *et al.* (2020) Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems - Sec. Climate-Smart Food Systems* **4** - <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00037>
- DeVries T., Yamamoto K., Wanninkhof R., *et al.* (2023) *Magnitude, trends, and variability of the global ocean carbon sink from 1985 to 2018. Global Biogeochemical Cycles* **37**, e2023GB007780. <https://doi.org/10.1029/2023GB007780>
- Duarte C. M. (2017) Reviews and syntheses: Hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget. *Biogeosciences* **14**, pp : 301–310, <https://doi.org/10.5194/bg-14-301-2017>
- Ebelmen J.-J. (1845) Recherches sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates. *Annales des Mines* **7**, 3-66.
- Etzold S., Ziemińska K., Rohner B., *et al.* (2019) One Century of Forest Monitoring Data in Switzerland Reveals Species- and Site-Specific Trends of Climate-Induced Tree Mortality. *Frontiers in Plant Science*, **10**, Article 307. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00307>
- European Commission (2018) Directorate-General for Research and Innovation, The strategic energy technology (SET) plan, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/04888>
- European Commission (2018) SET-Plan Action 9 Implementation Plan: CCUS – Capture, Utilisation and Storage of CO₂.
- EU GeoCapacity (2009) Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. Final Report. Disponible sur : [Microsoft Word - GeoCapacity Publishable Final Activity Report 2006-2008.doc](#)
- Feingold G., Ghatge V.P., Russell L.M. *et al.* (2024) Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening, *Science Advances* **10**, eadi8594. DOI: [10.1126/sciadv.adi8594](https://doi.org/10.1126/sciadv.adi8594)
- Forster P. M., Smith C. J., Walsh T., *et al.* (2023) Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 2295–2327, <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- Forster P. M., Smith C., Walsh T., *et al.* (2024) Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data*, **16**, 2625–2658, <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>
- Forster P. M., Smith C., Walsh T., *et al.* (2025) Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2025-250> in review
- Forzieri G., Dakos V., McDowell N.G., *et al.* (2022) Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature* **608**, 534–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9>

Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., *et al.* (2025) *Global Carbon Budget 2024*. Global Carbon Project. essd-17-965-2025.pdf

Fuss S., Lamb W. F., Callaghan M.W., *et al.* (2018) Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* **13**, Number 6. DOI [10.1088/1748-9326/aabf9f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f)

Gardiner S. M. (2017) Climate ethics in a dark and dangerous time. *Ethics* **127**, no 2, 430–465, <https://www.jstor.org/stable/26541017>

Gasser T., Ciais P., & Lewis S.L. (2022) How the Glasgow Declaration on Forests can help keep alive the 1.5 °C target. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **119** (23) e2200519119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2200519119>

Gattuso J.-P., Magnan A., Bopp L., *et al.* (2018) Ocean solutions to address climate change and the effects on marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science* **5**, 337. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>

GESAMP (2019) High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). *GESAMP Reports and Studies* 98. 144 p. [Lien](#).

Gerrits R., Pokharel R., Breitenbach R., *et al.* (2020) How the rock-inhabiting fungus *K. petricolla* A95 enhances olivine dissolution through attachment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **282**, 76–97. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.05.010>

Gidden M.J., Joshi S., Armitage J.J., *et al.* (2025) A prudent planetary limit for geologic carbon storage. *Nature* **645**, 124–132 <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09423-y>

Griscom B., Adams J., Ellis P. *et al.* (2017) Natural climate solutions, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **114** (44) 11645–11650, <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

Guo L. B. & Gifford R. M. (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology* **8**, Issue 4 P345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>

Hartmann J., Suitner N., Lim C., *et al.* (2023) Stability of alkalinity in ocean alkalinity enhancement (OAE) approaches – consequences for durability of CO₂ storage. *Biogeosciences* **20** (2), 781–802. <https://doi.org/10.5194/bg-20-781-2023>

Harvey L. D. D. (2008) Mitigating the atmospheric CO₂ increase and ocean acidification by adding limestone powder to upwelling regions. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **113**(C4), C04028. [Lien](#).

Haywood J., Jones A., Bellouin, N. *et al.* (2013) Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian rainfall. *Nature Climate Change* **3**, 660–665. [Lien](#).

Haywood J., Tilmes S., (Lead Authors), F. Keutsch, *et al.* (2022) Stratospheric Aerosol Injection and its Potential Effect on the Stratospheric Ozone Layer, Chapter 6 in *Scientific Assessment of Ozone Depletion* GAW Report No. 278, 509 pp., WMO, Geneva. [Lien](#).

Haut Conseil pour le Climat (2023) Captage, stockage et valorisation du carbone : état des lieux et perspectives de déploiement en France. Rapport spécial, juin 2023.

Haut Conseil pour le Climat (2025) Relancer l'action climatique face à l'aggravation des impacts et à l'affaiblissement du pilotage. Rapport annuel, juillet 2025.

Ho D. T. & Bopp L. (2024) Marine carbon dioxide removal may be a future climate solution. *Dialogues on Climate Change* **1**, 56–62. <https://doi.org/10.1177/29768659241293223>

IPCC (2019a) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V. *et al.*]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>

IPCC (2019b) Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, *et al.*]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 896 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>

IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., *et al.*]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896)

- IPCC (2022a) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009325844
- IPCC (2022b) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926
- IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, [IPCC AR6 SYR SPM.pdf](#)
- Jactel H., Bauhus J., Boberg J. *et al.* (2017) Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports* **3**, 223–243. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-1>
- Jones A., Haywood J., Alterskjaer, K., *et al.* (2013) The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**(19), 9743–9752. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50762>
- Kelemen P., Benson S. M., Pilorgé H., Psarras P. & Wilcox J. (2019) An overview of the status and challenges of CO₂ storage in minerals and geological formations. *Frontiers in Climate* **1**, 9. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00009>
- Keller D. P. (2019) Marine climate engineering. In M. Salomon & T. Markus (Eds.), *Handbook on marine environment protection: Science, impacts and sustainable management* (pp. 261–276). Springer.
- Knapp W. J., & Tipper E. T. (2022) The efficacy of enhancing carbonate weathering for carbon dioxide sequestration. *Frontiers in Climate* **4**, 928215. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.928215>
- Köhler P., Abrams J. F., Völker C., *et al.* (2013) Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on open atmospheric CO₂, surface ocean pH and marine biology. *Environmental Research Letters* **8** (1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014009>
- Krause-Jensen D. & Duarte C. (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geosciences* **9**, pp 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Lewis S. L., Wheeler C. E., Mitchard E. T. A., & Koch A. (2019) Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature* **568** (7750), 25–28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
- Määttänen A., Lameille T., Kloeck C., *et al.* (2024) Uncertainties and confidence in stratospheric aerosol injection modelling: a systematic literature review, *Oxford Open Climate Change* **4**, Issue 1, kgae007, <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae007>
- Määttänen A., F. Ravetta F., Lurton T. & Boucher O. (2025) Idealized modeling of stratospheric aerosol injection deployment scenarios with two uncooperative actors, *Earth's future*, submitted. [Lien](#).
- Matthew W. J., Veraverbeke S., Andela N., *et al.* (2024) Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. *Science* **386**, ead15889(2024). DOI: [10.1126/science.ad15889](https://doi.org/10.1126/science.ad15889)
- Matthews H.D. & Caldeira K. (2007) Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**(24):9949-54. DOI: [10.1073/pnas.0700419104](https://doi.org/10.1073/pnas.0700419104)
- Martin J. H. (1990) Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography* **5**(1), pp 1–13. <https://doi.org/10.1029/PA005i001p00001>
- McLeod E., Chmura G. L., Bouillon S., *et al.* (2011) A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* **9** (10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Meunier F., Boeckx P., Botía S., *et al.* (2024) Intact Amazon forests hit a record low gross primary productivity level in 2023-2024, PREPRINT (Version 1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4161696/v1>
- Moustakis Y., Nützel T., Wey H-W., *et al.* (2024) Temperature overshoot responses to ambitious forestation in an Earth System Model. *Nat Commun* **15**, 8235 <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52508-x>

- Narayan S., Beck M. W., Reguero B. G., *et al.* (2016) The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS ONE* **11**(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>
- NASEM- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021) A research strategy for ocean-based carbon dioxide removal and sequestration. *Washington, DC: The National Academies Press*. [Lien.](#)
- Neely C., Bunning S. & Wilkes A. (2009) Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change. *Rome: FAO*. [Lien.](#)
- Pellerin S., Bamière L., Launay C., *et al.* (2019) Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude. Paris : INRA, 117 p. [Lien.](#)
- Pellerin S., Bamière L., Savini I. & Réchauchère O. (2021) Stocker du carbone dans les sols français. *Matière à débattre et décider*. *QUAE Editions*. [Lien.](#)
- Pendleton L., Donato D. C., Murray B. C., *et al.* (2012) Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE* **7**(9) e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Pierrehumbert R. (2019) There is no Plan B for dealing with the climate crisis. *Bulletin of the atomic scientists* **75**, 5, 215–221. <https://doi.org/10.1080/00963402.2019.1654255>
- Poorter L., Bongers, F., Aide, T., *et al.* (2016) Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* **530**, 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- Renforth P., Pogge von Strandmann P.A.E. & Henderson G.M. (2015) The dissolution of olivine added to soil: Implications for enhanced weathering. *Applied Geochemistry* **61**, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.05.016>
- Renforth P., & Henderson G. (2017) Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Reviews of Geophysics* **55**(3), 636–674. <https://doi.org/10.1002/2016RG000533>
- Robock A., Oman L., & Stenchikov G. L. (2008) Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections, *Journal of Geophysical Research* **113**. <https://doi.org/10.1029/2008JD010050>
- Robock A. (2000) Volcanic eruptions and climate. *Review of Geophysics* **38**: 191–219. <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Rohatyn S., Yakir D., Rotenberg E. & Carmel Y. (2022) Limited climate change mitigation potential through forestation of the vast dryland regions. *Science* **377**, 143639. DOI: [10.1126/science.abm9684](https://doi.org/10.1126/science.abm9684)
- Ross A., & Matthews, H. D. (2009) Climate engineering and the risk of rapid climate change. *Environmental Research Letters* **4** (4), 045103. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045103>
- SAPEA (2024) Solar radiation modification (Evidence review report). *Scientific Advice Mechanism to the European Commission*. *Berlin: SAPEA*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14283096>
- Sarmiento J.L. & Gruber N. (2013) Ocean Biogeochemical Dynamics. *Princeton University Press*. <https://doi.org/10.2307/j.ctt3fgxqx>
- Schleussner CF., Ganti G., Lejeune Q. *et al.* (2024) Overconfidence in climate overshoot. *Nature* **634**, 366–373 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08020-9>
- Schott J., Saldi G. D., Zhu C., *et al.* (2024) Mechanisms controlling albite dissolution/precipitation kinetics as a function of chemical affinity: New insights from experiments in ²⁹Si spiked solutions at 150 and 180 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **374**, 284–303. [10.1016/j.gca.2024.03.023](https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.03.023)
- Siegert M., Sevestre H., Bentley M. J., *et al.* (2025). Safeguarding the polar regions from dangerous geoengineering: a critical assessment of proposed concepts and future prospects. *Frontiers in Science*, **3**. <https://doi.org/10.3389/fsci.2025.1527393>
- Smith P. (2016) Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global change biology* **22** (3): 1315–24. DOI : [10.1111/gcb.13178](https://doi.org/10.1111/gcb.13178)
- Smith W, Bhattarai U, Bingaman DC, *et al.* (2022) Review of possible very high-altitude platforms for stratospheric aerosol injection. *Environmental Research Communications* **14**;4(3):031002. [Lien.](#)
- Smith S. M., Geden O., Gidden M. J., *et al.* (2024) (eds.) The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition. DOI 10.17605/OSF.IO/F85QJ

The Land Gap (2023) Submission to the UNFCCC Global Stocktake (Technical Dialogue 1.3). **UNFCCC**. https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-05/The-Land-Gap_GST%20TD1.3%20submission.pdf

Trisos C. H., Amatulli G., Gurevitch J., *et al.* (2018) Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination, *Nature Ecology and Evolution* **2**, 475–482, <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0>

UNEP - United Nations Environment Program (2024). Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>

UNESCO (2023) Report of the World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (COMEST) on the ethics of climate engineering (SHS/COMEST-13/2023/1 REV). *Paris: UNESCO*. [Lien](#).

Vallet L., Schwartz M., Ciais P., *et al.* (2023) High-resolution data reveal a surge of biomass loss from temperate and Atlantic pine forests, contextualizing the 2022 fire season distinctiveness in France, *Biogeosciences* **20**, 3803–3825, <https://doi.org/10.5194/bg-20-3803-2023>

Van Groenigen J. W., van Kessel C., Hungate B. A., *et al.* (2017) Sequestering soil organic carbon: A nitrogen dilemma. *Environmental Science & Technology*, **51**(9), 4738–4739. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427>

Vicca S., Goll D. S., Hagens M., *et al.* (2021) Is the climate change mitigation effect of enhanced silicate weathering governed by biological processes? *Global Change Biology* **28**(2), 313–324. <https://doi.org/10.1111/gcb.15993>

Vienne A., Poblador S., Portilli-Estrada M., Hartmann, *et al.* (2022) Enhanced weathering using basalt rock powder: Carbon sequestration, co-benefits and risks in a mesocosm study with *Solanum tuberosum*. *Frontiers in climate* **4**, 869456. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.869456>

Visioni D., Kravitz B., Robock A., *et al.* (2023) Opinion: The scientific and community-building roles of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) – past, present, and future. *Atmospheric Chemistry and Physics* **23**, 5149–5176, <https://doi.org/10.5194/acp-23-5149-2023>

Visioni D., MacMartin D. G., Kravitz, B., *et al.* (2021) Identifying the sources of uncertainty in climate model simulations of solar radiation modification with the G6sulfur and G6solar Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics* **21**, 10039–10063, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10039-2021>

Voskian S. & Hatton T.A (2019) Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science* **12**.12: 3530-3547. <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>

Wan J.S., Chen C.C.J., Tilmes, S. *et al.* (2024) Diminished efficacy of regional marine cloud brightening in a warmer world. *Nature Climate Change* **14**, 808–814. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02046-7>

Wang Y., Zhu Y., Cook-Patton S.C. *et al.* (2025) Land availability and policy commitments limit global climate mitigation from forestation. *Science* **389**, 931–934 (2025) <https://doi.org/10.1126/science.adj6841>

Zhang Y., Jackson C. & Krevor S. (2024) The feasibility of reaching gigatonne scale CO₂ storage by mid-century. *Nature Communications* **15**:6913 <https://doi.org/10.5281/zenodo.11446272>

Zeng S., Liu Z., & Groves C. (2022) Large-scale CO₂ removal by enhanced carbonate weathering from changes in land-use practices. *Earth-Science Reviews* **225**, 103915. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103915>

Annexes

Liste des contributeurs

Auteurs - Par ordre alphabétique :

Francis ALBARÈDE - Jean-Claude ANDRÉ - Edouard BARD - Sandrine BONY - Laurent BOPP - Isabelle CHUINE - Philippe CIAIS - Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL - Jean-Claude DUPLESSY - Jean JOUZEL - John LUDDEN - Valérie MASSON-DELMOTTE et Jacques SCHOTT.

Membres du Comité des Sciences de l'environnement de l'Académie des sciences :

Membres de l'Académie des sciences : Francis ALBARÈDE (pilote du groupe de réflexion sur la géo-ingénierie climatique) - Jean-Claude ANDRÉ - Edouard BARD - Lydéric BOCQUET - Sandrine BONY - Laurent BOPP - Anny CAZENAVE - Marie-Lise CHANIN - Isabelle CHUINE - Philippe CIAIS - Vincent COURTILLOT - Michel DELSENY - Jean-Claude DUPLESSY (président du Comité) - Robert GUILLAUMONT - Philippe JANVIER - Jean JOUZEL - Jacques LASKAR - Sandra LAVOREL - Jean-Dominique LEBRETON - Ludwik LEIBLER - Yvon LE MAHO - Hervé LE TREUT - Daniel MANSUY - Valérie MASSON-DELMOTTE - Bernard MEUNIER - René MOREAU - Henri ROCHEFORT - Philippe TAQUET - Alain-Jacques VALLERON.

Personnalités extérieures : Olivier BOUCHER - John LUDDEN - Anni MÄÄTTÄNEN - Jacques SCHOTT.

Experts auditionnés

18 décembre 2023

Philippe CIAIS - Membre de l'Académie des sciences - DR CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement LSCE (CEA/CNRS/Université Versailles Saint-Quentin), Institut Pierre Simon Laplace.

22 janvier 2024

Olivier BOUCHER - DR CNRS, Co-fondateur de Klima consulting, start-up à l'intersection entre météorologie, climat et méthodes d'optimisation et IA.

Anni MÄÄTTÄNEN - DR CNRS, Laboratoire Atmosphères & Observations spatiales LATMOS (Université Versailles Saint-Quentin, Sorbonne Université, CNRS, Université Paris-Saclay).

12 février 2024

Laurent BOPP - DR CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique (CNRS/École polytechnique/ENS-PSL/Sorbonne Université) de l'Institut Pierre-Simon Laplace.

Élu à l'Académie des sciences en janvier 2025.

25 mars 2024

Claire CHENU – DR INRAE, Science du sol, biogéochimie, matières organiques.

29 avril 2024

Jacques SCHOTT - DR émérite CNRS, Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET/OMP– CNRS/CNES/Université Toulouse III-Paul Sabatier/IRD/Météo France).

27 mai 2024

Jean JOUZEL - Membre de l'Académie des sciences, DR émérite CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, CEA, Gif-sur-Yvette. Vice-président du GIEC.

6 novembre 2024

Valérie MASSON-DELMOTTE - DR CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS/Université Versailles Saint-Quentin).

Élue à l'Académie des sciences en janvier 2025.

Wolfgang CRAMER - DR CNRS, Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE) à Aix-en-Provence.

Liste des figures et tableaux

Figures :

Figure 1.1 : Les principaux éléments du bilan radiatif terrestre.

Figure 1.2 : Les options technologiques proposées pour le SRM.

Figure 2.1 : Schéma de la perturbation globale du cycle du carbone causée par les activités anthropiques, à l'échelle mondiale pour la décennie 2014-2023.

Figure 2.2 : Classification des différentes méthodes de mCDR en fonction de leurs caractéristiques.

Figure 2.3 : Schéma général de l'altération provoquée (AP) et de l'alcalinisation océanique (AO).

Figure 3.1 : Schéma des processus du CCS.

Figure 3.2 : Carte des projets européens.

Figure 3.3 : Résumé des méthodes d'élimination du CO₂, décrivant, pour chacune, le processus de captage et le réservoir de stockage, sa classification en tant que méthode conventionnelle ou innovante, son niveau actuel de maturité technologique en vue d'un déploiement à grande échelle, son potentiel maximal d'atténuation (élevé : > 9 GtCO₂/an ; modéré : 3-9 GtCO₂/an ; faible : < 3 GtCO₂/an) et sa durée caractéristique de stockage.

Tableaux :

Tableau 1 : Bilan des méthodes de mCDR faisant intervenir des organismes marins.

Tableau 2 : Bilan des méthodes d'altération et d'alcalinisation.

Listes des abréviations, acronymes, formules et symboles

Abréviations et acronymes

AO - Alcalinisation de l'océan (*Ocean alkalinization*)

AP - Altération provoquée (*Enhanced weathering*)

CCUS - Captage, stockage et valorisation du carbone (*Carbon Capture Utilization and Storage*)

CDR - Élimination du dioxyde de carbone (*Carbon Dioxide Removal*)

GES - Gaz à effet de serre

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; IPCC en anglais

IR - Infrarouge

mCDR - Élimination du CO₂ marin (*marine Carbon Dioxide Removal*)

OAE - Augmentation de l'alcalinité de l'océan (*Ocean Alkalinity Enhancement*) AO et OAE sont équivalents dans la littérature scientifique

OIF - Fertilisation de l'océan par le fer (*Ocean Iron Fertilization*)

SNBC - Stratégie nationale bas carbone

SRM - Modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Modification*)

ZEE - Zone économique exclusive

Formules chimiques

CH₄ - Méthane

CO₂ - Dioxyde de carbone

H₂O - Eau

HCO₃⁻ - Ion hydrogénocarbonate

N₂O - Monoxyde de diazote ou protoxyde d'azote

SO₂ - Dioxyde de soufre

Unités de mesure - Symboles

tC - Tonne de carbone (unité de masse) ; 1 ktC = 10³ tC ; 1 MtC = 10⁶ tC ; 1 GtC = 10⁹ tC

Conversion : Les données peuvent également être exprimées en pétagrammes : 1 PgC = 10¹⁵ gC
= 1 GtC = 10⁹ tC

tC/an (ou tC.an⁻¹) - Tonne de carbone transférée par année (unité de flux) ; 1 MtC/an = 10⁶ tC/an ;
1 GtC/an = 10⁹ tC/an

tCO₂ - Tonne de CO₂ (unité de masse) ; 1 ktCO₂ = 10³ tCO₂ ; 1 MtCO₂ = 10⁶ tCO₂ ; 1 GtCO₂ = 10⁹ tCO₂

tCO₂/an (ou tCO₂.an⁻¹) - Tonne de CO₂ transférée par année (unité de flux) ; 1 MtCO₂/an = 10⁶
tCO₂/an ; 1 GtCO₂/an = 10⁹ tCO₂/an

Conversion : Les données peuvent être exprimées en quantités de carbone ou de CO₂ ; ces valeurs
se déduisent l'une de l'autre en utilisant le rapport de la masse molaire du CO₂ sur celle du carbone.
Pour convertir un nombre exprimé en GtC en GtCO₂, il faut le multiplier par 3,666 (M(CO₂) / M(C)
= (12 + 2 × 16) / 12 = 3,666).

ha - Hectare (unité de surface valant 10 000 m²) ; 1 Mha = 10⁶ ha

tC/ha - Tonne de carbone par hectare (unité de masse surfacique)

teqCO₂/an - Tonne d'émission de GES équivalent à une tonne de CO₂ émis par année (unité de
masse de GES équivalent CO₂) ; 1 MteqCO₂/an = 10⁶ teqCO₂/an

Lexique

Albédo : Grandeur sans unité décrivant la capacité d'une surface à réfléchir les rayons qui lui
parviennent, c'est-à-dire la quantité d'énergie lumineuse réfléchie par rapport à la quantité d'énergie
lumineuse incidente. Un albédo élevé signifie une réflexivité importante et, *de facto*, une moindre
absorption ; ce paramètre joue ainsi un rôle essentiel dans le bilan radiatif terrestre.

Adaptation (climat) : Ensemble des stratégies mises en place pour réduire la vulnérabilité des
systèmes humains ou naturels face aux effets du changement climatique.

Aérosol : Fine particule solide, liquide ou gazeuse, en suspension dans l'atmosphère.

Afforestation : Plantation d'arbres sur des surfaces dépourvues de boisement.

Agroforesterie : Pratique agricole associant arbres, cultures ou animaux sur une même parcelle,
permettant une meilleure utilisation des ressources, une amélioration de la diversité biologique et de
meilleurs rendements. Cette pratique favorise la séquestration du carbone.

Alcalinité : Capacité d'un liquide à neutraliser les acides.

Altération des minéraux silicatés ou carbonatés : Ensemble de réactions chimiques naturelles
ou accélérées au cours desquelles les minéraux réagissent avec l'eau et le CO₂, et libèrent des ions.
Ces réactions constituent ainsi d'importantes pompes à CO₂ :

Bilan de l'altération des carbonates : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

Bilan de l'altération du plagioclase : $2 \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 4 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Ca}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^- + \text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})$

Aquifère : Formation géologique perméable constituant un réservoir d'eau souterraine.

Atténuation : Ensemble des actions visant à limiter le changement climatique en réduisant ou en
évitant les émissions de GES.

Biofilm : Communauté de micro-organismes adhérant entre eux sur une surface, souvent en milieux
aqueux.

Choc terminal : En cas de déploiement de SRM puis d'arrêt soudain, l'augmentation des taux de
GES - non interrompue - causerait une augmentation rapide et dommageable des températures, avec
des effets graves et d'ampleur mondiale.

Couche de mélange : Partie superficielle de l'océan brassée sous l'action de l'atmosphère, dans laquelle les propriétés physico-chimiques de l'eau (densité, température, salinité) restent constantes.

Culture intermédiaire : Pratique agricole consistant à mettre un sol en culture entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture principale suivante. Cette culture est destinée à être restituée au sol et non à être exportée, afin d'améliorer la couverture du sol et d'augmenter le stockage du carbone.

Cycle biogéochimique : Processus cyclique de transport et de transformation d'un élément ou composé chimique entre les différents réservoirs terrestres (biosphère, atmosphère, géosphère et hydrosphère). Chaque cycle est caractérisé par des réservoirs et les flux qui les relient.

Émission négative : Retrait anthropique actif de GES de l'atmosphère.

Gaz à effet de serre (GES) : Gaz atmosphériques (tels que H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , etc.) qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent dans toutes les directions. Ces gaz sont à l'origine de l'effet de serre naturel et l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère est responsable du réchauffement climatique.

Neutralité carbone (ou *zéro émission nette de CO_2*) : situation d'équilibre où les émissions de CO_2 anthropiques seraient compensées par la quantité de CO_2 retirée de l'atmosphère et piégée grâce aux interventions humaines.

Puits de carbone : Tout système capable d'absorber plus de CO_2 qu'il n'en émet.

Reforestation : Replantation d'arbres sur des surfaces anciennement forestières ayant été déboisées.

Réservoir de carbone : Compartiment du système terrestre ayant la capacité de stocker, d'accumuler ou de libérer du carbone.

Stock de carbone : Quantité de carbone (exprimée en GtC) contenue dans un réservoir donné à un moment donné.

Temps de résidence : Temps moyen pendant lequel un élément chimique séjourne dans un réservoir donné.