

Inverser les émissions ou influencer le rayonnement solaire :

La «géo-ingénierie» est-elle raisonnable, réalisable et, si oui, à quel prix ?

L'accord de Paris sur le climat vise à limiter le réchauffement de la planète significativement en dessous de 2 degrés Celsius, voire 1,5 degrés Celsius si possible. Divers scénarios montrent que ces objectifs ne peuvent être atteints qu'avec un très grand effort si l'on ne prend que des mesures de réduction des émissions. Cela motive la recherche de solutions supplémentaires. Les interventions techniques dans le système climatique, souvent appelées «géo-ingénierie» ou «intervention climatique», sont donc discutées. Cependant, la plupart de ces mesures sont associées à des coûts, des risques et des effets secondaires indésirables qui sont difficilement estimables à ce jour. Alors que certaines mesures n'existent qu'en théorie, d'autres ont été testées en petit format. Cependant, il manque à ces expériences des connaissances sur les effets de l'application à la grande échelle requise. Comme les mesures n'auraient pas les mêmes effets à travers le monde, les questions éthiques de la justice mondiale et régionale sont également particulièrement importantes et devraient être couvertes par un ensemble de réglementations internationales.

Situation initiale

Avec l'accord de Paris sur le climat, la communauté internationale s'est fixée pour objectif de limiter le réchauffement de la planète à moins de 2 degrés Celsius, si possible même à 1,5 degrés Celsius par rapport à l'époque préindustrielle. Cette déclaration d'intention contraste avec les objectifs nationaux de réduction des émissions actuellement déclarés. Si elles sont observées, elles conduiraient à un réchauffement de la planète de l'ordre de 2 à 4 degrés Celsius, ce qui est loin d'être suffisant. L'évolution économique et politique récente ne suggère pas que les efforts de réduction des émissions seront suffisants pour atteindre les objectifs de limitation fixés en appliquant uniquement des mesures de réduction.

Cela se reflète également dans pratiquement tous les scénarios disponibles et utilisés par la science pour atteindre l'objectif de 1,5 degrés Celsius – mais également dans les scénarios pour atteindre l'objectif de 2 degrés Celsius – dans la mesure où ceux-ci incluent les émissions «négatives»

de CO₂, c'est-à-dire les mesures visant à éliminer du CO₂ de l'atmosphère. Certains scénarios contiennent également des activités techniques visant à influencer le rayonnement solaire. Le tableau 1 montre l'importance accordée à l'extraction du CO₂ dans les scénarios examinés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC – en anglais IPCC) et dans la littérature scientifique. Comme le montrent ces chiffres, avec les émissions annuelles actuelles, le budget d'émissions existant pour atteindre l'objectif de 1,5 degrés aurait déjà été épuisé en quatre à un maximum de vingt ans.

Les mesures techniques visant à éliminer ultérieurement les émissions de CO₂ de l'atmosphère ou du moins à atténuer le réchauffement ne peuvent donc pas être exclues des discussions sur la limitation du changement climatique. Il faut également considérer que certaines de ces «mesures correctives» techniques peuvent être moins coûteuses que certaines mesures de réduction des émissions.

Deux approches différentes

Deux approches fondamentalement différentes doivent être distinguées dans les mesures, qui sont parfois résumées sous des termes tels que « géo-ingénierie » ou « intervention climatique ». Il convient donc de les examiner séparément :

L'élimination du CO₂ de l'atmosphère (les termes techniques les plus courants à cet égard sont « Carbon Dioxide Removal », **CDR** ou « Negative Emission Technologies ») est une tentative d'inverser certaines des émissions de CO₂ d'origine humaine et de ralentir l'augmentation des concentrations de CO₂. Il s'agit de contrer la principale cause du changement climatique. Des exemples de CDR sont l'utilisation énergétique de la biomasse en combinaison avec le captage et le stockage géologique du CO₂ (BECCS) ; le captage technique du CO₂ de l'atmosphère avec stockage géologique subséquent (DACCS) ; la fixation du CO₂ de l'atmosphère dans les forêts par le biais du boisement à grande échelle ; le stockage du carbone dans le sol par une gestion appropriée du sol ou du charbon végétal ; la fertilisation des océans pour favoriser la croissance des algues qui fixent du CO₂ ; ou l'amplification artificielle de l'altération des roches, le carbone étant incorporé dans la roche. Il convient de noter que le CDR a un effet retardé en raison de l'inertie du système climatique, c'est-à-dire que les effets ne deviendront apparents qu'après quelques années ou décennies au plus tôt.

Quelle est la différence entre le CDR et les mesures « normales » de réduction des émissions dans la politique climatique actuelle ? Dans les deux cas, il s'agit d'influencer la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. L'objectif des mesures de réduction des émissions est d'empêcher le CO₂ de pénétrer dans l'atmosphère en premier lieu, tandis que le CDR élimine à nouveau le CO₂ de l'atmosphère. Pour cette raison, le captage du CO₂ à la source, par exemple dans les centrales électriques, et le stockage souterrain subséquent (connu sous le nom de captage et stockage du carbone, CCS) est généralement attribué aux mesures de réduction des émissions et non au CDR.

Tableau 1: Estimation du rôle des mesures de captage du CO₂ atmosphérique (CDR) dans la réalisation des objectifs de l'accord de Paris. (Source : EASAC 2018)

	Gt CO ₂
Fourchette des émissions totales de CO ₂ restantes estimées qui sont susceptibles d'être émises au maximum pour atteindre l'objectif de 1,5 degrés	130 à 700
Emissions mondiales actuelles de CO ₂ par an	36
Hypothèses d'émissions annuelles de CO ₂ après 2050 dans les modèles examinés dans le rapport du GIEC	-12
Fourchette d'hypothèses pour les émissions annuelles négatives de CO ₂ dans d'autres publications scientifiques	-7 à -70

La **gestion du rayonnement solaire** (« Solar Radiation Management », **SRM**), d'autre part, tente de lutter contre un symptôme du changement climatique, à savoir le réchauffement. Pour ce faire, on augmente artificiellement la réflexion du rayonnement solaire dans l'atmosphère ou à la surface de la terre, ce qui permet de contrer le changement climatique.¹ On peut y parvenir, par exemple, en introduisant des aérosols dans les couches supérieures de l'atmosphère. L'éclaircissement artificiel des nuages par l'ajout de germes de condensation et des surfaces du sol en changeant la couverture du sol ou même en plaçant des « parasols » ou des « miroirs » dans l'espace est également envisagé. Les mesures SRM pourraient, par exemple, servir à gagner du temps pour réduire les émissions ou à empêcher un dépassement temporaire des objectifs de température jusqu'à ce que l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère puisse être suffisamment ralentie. Les mesures de SRM pourraient également sembler attrayantes parce qu'elles fonctionnent beaucoup plus rapidement que le CRD et pourraient donc apporter un soulagement à court terme à mesure que le réchauffement de la planète progresse et que les effets sont d'autant plus graves. Toutefois, il convient de noter que les concentrations croissantes de gaz à effet de serre en tant que cause du changement climatique ne sont pas prises en compte, pas plus que les conséquences non liées à la température du changement climatique, comme l'acidification des mers.

La figure 1 et le tableau 2 résument les deux types de mesures et leurs caractéristiques les plus importantes. Ils sont également comparés aux mesures de réduction des émissions de la politique climatique actuelle. Une vue d'ensemble plus détaillée des différentes mesures et de leurs caractéristiques (les données sont une intégration de diverses études et rapports d'évaluation ; voir bibliographie) peut être trouvée dans les tableaux 3 (CDR) et 4 (SRM).

Etat actuel de la technique

En plus des mesures SRM et de nombreux CDR, les connaissances techniques concernant la faisabilité font souvent (encore) défaut, surtout dans une dimension assez importante pour qu'un effet mesurable puisse être obtenu. Le reboisement est pratiqué dans le secteur du CDR depuis longtemps et les défis sont bien connus. Les problèmes les plus importants ici sont les besoins en espace, qui sont en concurrence avec d'autres utilisations, et la gouvernance, qui doit être fortement locale. Le captage direct du CO₂ de l'air (DACCS) est très énergivore parce que le CO₂ hautement dilué dans l'air doit être séparé et ensuite comprimé dans des installations de stockage géologique appropriées et sûres. Il n'existe que quelques installations pilotes pour le DACS et une seule installation commerciale pour la production de bioénergie avec captage du CO₂ (BECCS). Outre le développement de la (des) technologie(s), la disponibilité d'énergie à faible teneur en CO₂ ou de biomasse produite de manière durable, la fiabilité du stockage géologique et les coûts d'installation et d'exploitation élevés sont des obstacles potentiels. D'autres techniques telles que la minéralisation accélérée ou la fertilisation des océans n'ont

¹ Dans le cas de l'éclaircissement des nuages d'eau glacée (cirrus ; voir tableau 4), qui est également attribué à ce type, ce n'est pas la réflexion du rayonnement solaire, mais le changement du rayonnement thermique.

été testées qu'à petite échelle, voire pas du tout, et leur efficacité et leurs effets secondaires possibles sont encore très incertains.

Toutes les approches décrites en rapport avec le SRM est encore plus éloignées d'une application pratique. Bien que l'injection d'aérosols dans l'atmosphère semble déjà possible avec les moyens techniques actuels, les expériences de test n'ont été jusqu'à présent qu'annoncées, mais pas encore réalisées. Les effets secondaires possibles sont en grande partie inexplorés, comme le risque d'un changement dans la distribution régionale des précipitations. Les éruptions volcaniques majeures telles que Pinatubo 1992 ou Tambora 1815, qui ont provoqué des changements significatifs dans les régimes de précipitations au moins sur une échelle de temps de quelques années, avec parfois des effets régionaux graves, offrent une idée des effets secondaires possibles du SRM.

Risques élevés et effets secondaires inconnus

Les risques élevés, souvent difficiles à évaluer et les nombreux effets secondaires indésirables possibles constituent un obstacle majeur à l'utilisation du CDR et, surtout, le SRM. Les calculs des modèles climatiques ne sont souvent pas suffisamment significatifs pour des sujets importants tels que la distribution régionale des précipitations ou les effets sur les écosystèmes. Il n'est pas facile d'utiliser les effets de petits projets-tests pour tirer des conclusions sur les effets de projets de plus grande envergure.

Dans le cas du CDR, les risques résident principalement dans les effets secondaires locaux ou régionaux possibles des mesures, par exemple les effets des modifications de la végétation ou de la consommation de terrains et d'eau (pour d'autres effets, voir également le tableau 3). Les risques et les effets secondaires possibles sont encore plus grands avec les SRM. Les SRM n'atténuent pas toute l'influence de l'homme sur le climat, mais créent plutôt une nouvelle intervention humaine qui, par exemple, conduit à de nouveaux changements difficilement prévisibles dans les régimes de précipitations. Un autre problème important des SRM est le fait qu'une fois que les mesures ont commencé, elles doivent être obligatoires et doivent être maintenues au moins jusqu'à ce que les concentrations de gaz à effet de serre dues au CDR ou à la dégradation naturelle soient revenues au niveau d'avant l'utilisation du SRM. Si les SRM étaient brusquement arrêtés, le système climatique se réchaufferait très rapidement pour atteindre les conditions qui auraient été présentes sans l'utilisation des SRM en raison de la concentration plus élevée de CO₂ dans l'atmosphère. Il en résulterait un réchauffement rapide et difficile à adapter.

Le piège de la consommation d'énergie

Outre les terrains, l'eau et les engrais (dans le cas des mesures fondées sur la biomasse), presque toutes les approches du CDR ont souvent une consommation d'énergie considérable, en particulier pour l'élimination technique du

CO₂ de l'air, le captage du CO₂ dans les usines de bioénergie et le broyage des roches en vue d'une meilleure résistance aux intempéries, mais aussi pour le boisement, la production d'engrais ou l'achat et le traitement de matériel biologique. Si l'énergie nécessaire n'est pas obtenue par une production à faible émission de CO₂, l'effet de la mesure correspondante est parfois considérablement réduit, puisqu'une partie du CO₂ éliminé est immédiatement remplacée par le fonctionnement de la mesure CDR. Tant que la majorité de l'énergie dans le monde est encore produite à partir de sources fossiles, il est donc généralement plus efficace d'utiliser l'énergie à faible teneur en CO₂ principalement pour la substitution des sources d'énergie fossile et non pour le CDR.

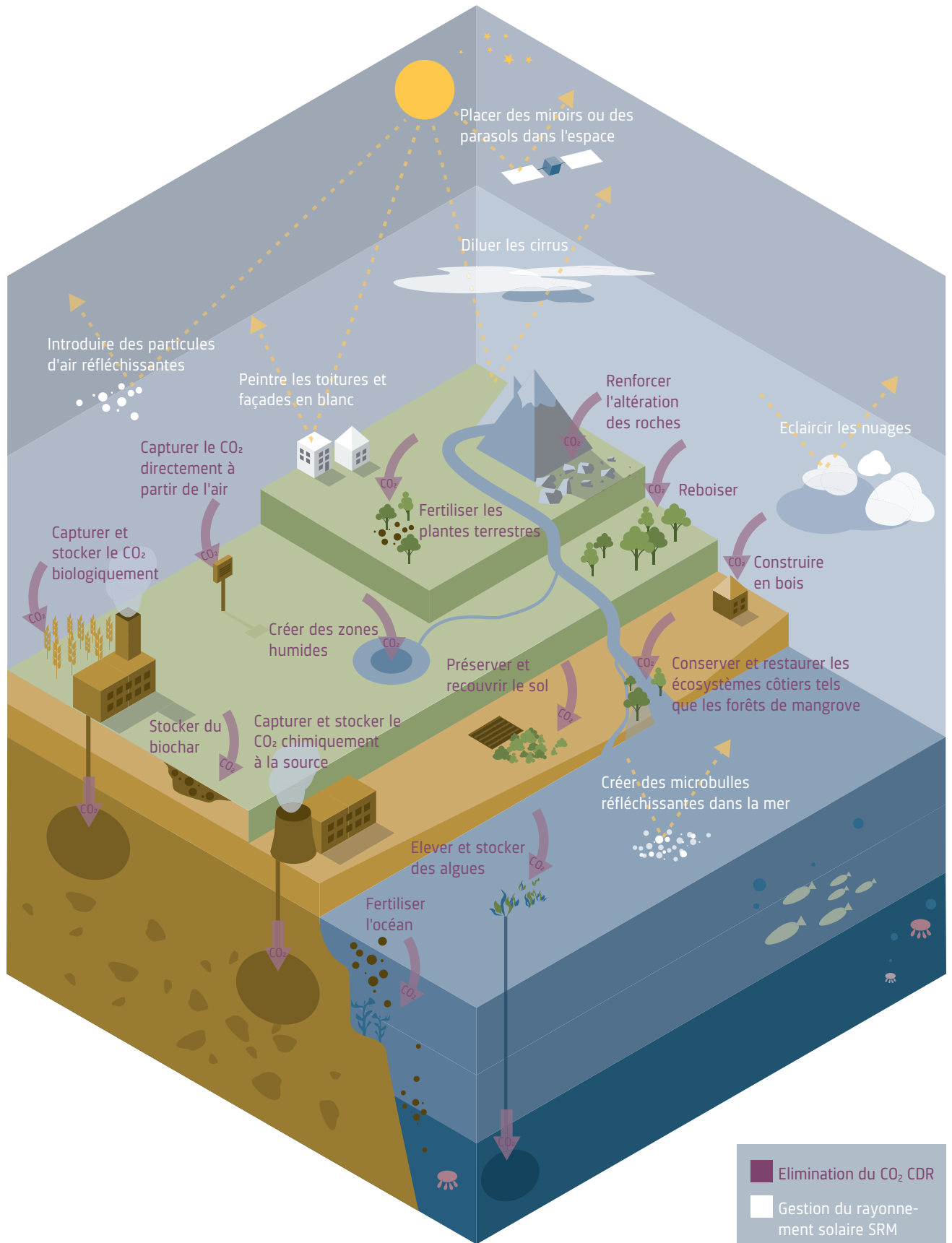
Défis de gouvernance et problèmes éthiques

Comment l'application du CDR et du SRM devrait-elle être réglementée à l'échelle internationale? Tous les pays ne bénéficieraient pas d'un climat « plus favorable » grâce à une de la température mondiale par le SRM. Qui détermine la température « correcte » qui ne doit pas être dépassée? Comment les pays touchés par les effets secondaires négatifs d'une mesure – par exemple, des changements défavorables dans les précipitations – sont-ils compensés? Qui finance les mesures? Comment et par qui la technologie nécessaire est-elle mise à la disposition des pays pauvres? Où et comment le CO₂ extrait de l'atmosphère doit-il être stocké à long terme et dans quelles conditions ces installations de stockage sont-elles acceptables pour la population? Les négociations sur le climat et les plans nationaux de réduction des émissions ont montré combien il est difficile de trouver des solutions mondiales à ces problèmes. Dans l'application à grande échelle du captage technique du CO₂, les coûts engendrés seraient d'une importance jusqu'alors inconnue dans les questions de distribution mondiale. La gouvernance du CDR et du SRM présente donc à la communauté mondiale des défis similaires aux mesures d'atténuation.

Outre les questions de gouvernance, des questions d'éthique et de justice se posent également. Avec le CDR biologique comme le boisement ou les BECCS, la concurrence avec la production alimentaire peut devenir un problème central d'éthique et de justice. Les mesures de captage du CO₂ (dans l'atmosphère ou dans la centrale électrique) se font concurrence en termes de volumes de stockage disponibles. Cette compétition mène aussi à des défis éthiques et de justice.

Avec le SRM, la question générationnelle se pose également: un « contrôle des symptômes » par la réduction du rayonnement solaire doit être maintenu en permanence par les générations suivantes, sinon une augmentation de température beaucoup plus rapide par rapport au réchauffement actuel menace avec des problèmes d'adaptation majeurs pour la société et les écosystèmes. Un tel « fardeau » pour les générations futures devrait être pris en compte lors de l'évaluation de l'avantage net des SRM. En outre, la répartition des risques dans l'application du CDR et du SRM est un problème éthique aux implications profondes pour l'équité qu'il ne faut pas sous-estimer.

Figure 1 : Aperçu des différentes méthodes d'élimination du CO₂ de l'air (CDR) et pour influencer le rayonnement solaire (SRM).



Faut-il plus de recherche ?

On s'inquiète généralement du fait qu'une plus grande attention portée aux mesures du CDR et du SRM pourrait conduire à négliger les efforts d'adaptation et de réduction des émissions ou encourager les essais à grande échelle à utiliser le CDR ou le SRM sans que les risques encourus soient suffisamment connus ou pris en compte. Les deux sont cités comme arguments contre leur recherche. Néanmoins, il n'y aura pas de discussion sur la question à l'avenir. Elle fait l'objet de discussions et de travaux à l'échelle internationale. Il est donc indispensable de poursuivre les recherches sur le CDR et le SRM pour s'assurer que les coûts, les risques et les effets secondaires correspondants

sont connus dans le cas de projets d'application concrets. Cependant, il ne devrait pas s'agir uniquement de recherche au sens technique, c'est-à-dire de recherche qui étudie les effets écologiques et climatiques et les effets secondaires du CDR et du SRM. Il est également important que cette recherche s'accompagne d'une réflexion politique, sociale et éthique sur les risques sociaux, sociétaux et juridiques de telles mesures aux niveaux national et international. Il ne faut pas oublier non plus que les développements actuels de la politique climatique internationale soulèvent la question de savoir si les risques et les conséquences du réchauffement climatique à 3, 4 ou 5 degrés Celsius ne pourraient pas être plus grands que les risques des mesures du CDR, par exemple.

Tableau 2 : Propriétés ou différences des différents types de mesures.

	Réduction des émissions (Atténuation)	Élimination du CO ₂ de l'atmosphère (CDR)	Influencer le rayonnement solaire (SRM)
Combattre les causes ou les symptômes	Réduire les émissions de CO ₂ (combattre directement la cause du changement climatique)	Réduire la concentration de CO ₂ dans l'atmosphère (s'attaquer à la cause du changement climatique)	Augmenter la réflexion du rayonnement solaire (ne considérer le réchauffement que comme un symptôme du changement climatique)
Effet	Réduire l'augmentation de l'effet de serre	Réduire l'augmentation de l'effet de serre	Avoir un effet de refroidissement quasi-immédiat
Risques	Éviter les nouveaux risques climatiques mondiaux	Éviter les nouveaux risques climatiques mondiaux. Peut causer des changements positifs ou négatifs dans le climat régional	Peut causer des risques nouveaux et supplémentaires pour le climat mondial
Coûts	Large gamme de coûts	Large gamme de coûts, mais généralement beaucoup plus coûteux que la réduction des émissions	Large gamme de coûts, mais généralement moins chère que le CDR
Obstacles	Les questions de coûts sont importantes, souvent des co-bénéfices surviennent	Coûts élevés comme obstacle principal, des co-bénéfices sont possibles	Les questions de risque et de faisabilité sont au premier plan
Gouvernance	Peut souvent être mis en œuvre localement. Questions de gouvernance mondiale en matière d'engagements et de financement	Principales questions de gouvernance locale, éventuellement des questions d'engagement mondial et de financement	Difficultés de gouvernance mondiale en matière de responsabilité, de financement et de responsabilité
Coopération	Effet perceptible uniquement dans le cadre d'une coopération internationale de grande envergure	Effet perceptible uniquement dans le cadre d'une coopération internationale de grande envergure	Peut aussi se faire unilatéralement, mais ce serait conflictuel
Durabilité de l'effet	Les mesures ont un effet durable si elles ne sont pas inversées	Les mesures ont un effet durable si elles ne sont pas inversées	La plupart des mesures doivent être constamment renouvelées, sinon une rechute dans un état sans ces mesures, avec des conséquences graves
Principaux problèmes	La faisabilité politique et l'acceptation en tant que problème principal	Des besoins d'investissement élevés, des besoins élevés en espace, la saturation et la concurrence avec d'autres utilisations comme principaux problèmes	Les questions de gouvernance et d'équité et les risques élevés sont des questions clés
Consommation de ressources	Consommation de ressources par le biais de mesures peu coûteuses	Demande souvent élevée d'énergie à faible teneur en CO ₂ , souvent forte demande de terrains, d'eau ou de volume de stockage géologique	Consommation d'énergie et de ressources plutôt faible

Résultat

En principe, il convient de noter que le CDR et le SRM ne peuvent en aucun cas se substituer aux efforts visant à réduire les émissions aussi rapidement et durablement que possible. Celles-ci restent au premier plan. Le CDR et, plus encore, le SRM ne peuvent servir que de mesures supplémentaires qui complètent au mieux les efforts de réduction des émissions afin d'atteindre les objectifs socio-politiques souhaitables.

Pour l'instant, l'utilisation du SRM au-delà des applications locales ne peut être justifiée en raison des risques et incertitudes majeurs et des questions d'éthique et de gou-

vernance mondiales liées à la lutte contre le changement climatique mondial. L'utilisation du CDR à petite échelle semble plus réalisable. Dans la plupart des scénarios modèles, cependant, l'utilisation généralisée des CDR individuels pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat n'est guère possible ou souhaitable étant donné le niveau très limité des connaissances et les nombreuses questions ouvertes. Des bases scientifiques sur le mode d'utilisation, l'efficacité, les risques et les coûts sont nécessaires – même si le but est de justifier la raison pour laquelle certaines options ne devraient pas être appliquées.

BIBLIOGRAPHIE

Boettcher M, Parker A, Schäfer S, Honegger M, Low S, Lawrence MG (2017) **Solar Radiation Management**. IASS Fact Sheet: 2/2017.

EASAC (2018) **Negative emission technologies. What role in meeting Paris Agreement targets?** EASAC policy report 35.

Honegger M, Derwent H, Harrison N, Michaelowa A, Schäfer S (2018) **Carbon Removal and Solar Geoengineering: Potential implications for delivery of the Sustainable Development Goals**. Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative, May 2018, New York, U.S.

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)**. Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)**. Chapter 7 «Clouds and Aerosols». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 7 «Food security and food production systems». www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 19 «Emergent risks and key vulnerabilities». www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 3 «Social, Economic and Ethical Concepts and Methods». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 6 «Assessing Transformation Pathways». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

Minx JC, Lamb WF, Callaghan MW, Fuss S, Hilaire J, Creutzig F, Amann T, Beringer T, de Oliveira Garcia W, Hartmann J, Khanna T, Lenzi D, Luderer G, Nemet GF, Rogelj J, Smith P, Vicente Vicente JL, Wilcox J, del Mar Zamora Dominguez M (2018) **Negative emissions – Part 1. Research landscape and synthesis**. Environmental Research Letters 13: 063001.

National Research Council. (2015) **Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration**. Washington DC: The National Academies Press.

National Research Council (2015) **Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth**. Washington DC: The National Academies Press.

Schäfer S, Lawrence M, Stelzer H, Born W, Low S, Aaheim A, Adriáola P, Betz G, Boucher O, Cariou A, Devine-Right P, Gullberg AT, Haszeldine S, Haywood J, Houghton K, Ibarrola R, Irvine P, Kristjansson J-E, Lenton T, Link JSA, Maas A, Meyer L, Muri H, Oeschle A, Proelss A, Rayner T, Rickels W, Ruthner L, Scheffran J, Schmidt H, Schulz M, Scott V, Shackley S, Tänzler D, Watson M, Vaughan N (2015) **The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE): Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth**.

ODD: Les objectifs internationaux de l'ONU en matière de développement durable

Dans cette publication, les Académies suisses des sciences fournissent des informations sur les mesures visant à éliminer le CO₂ de l'atmosphère ou à limiter le réchauffement du système climatique par des mesures techniques visant à réduire le rayonnement solaire (la «géo-ingénierie») et les risques associés. Elle contribue ainsi au ODD 13: «Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.»

> <https://sustainabledevelopment.un.org>

> <https://www.eda.admin.ch/agenda2030/fr/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html>



IMPRESSUM

EDITRICE ET CONTACT Académies suisses des sciences
SCNAT | ProClim | Maison des Académies | Laupenstrasse 7 | Case postale |
3001 Berne | proclim@scnat.ch

REDACTION Urs Neu

CONSEIL D'EXPERTS SCIENTIFIQUES Conseil consultatif du ProClim

EXPERTS Christoph Beuttler, La Fondation Dialogue Risque | Matthias Honegger, IASS Potsdam | Jens Leifeld, Agroscope | Ulrike Lohmann, Institute for Atmospheric and Climate Science, EPF de Zurich | Axel Michaelowa, Science politique, Université de Zurich | Anthony Patt, Politique climatique, EPF de Zurich | Thomas Peter, Institute for Atmospheric and Climate Science, EPF de Zurich | Gian-Kasper Plattner, WSL | Mischa Repmann, FirstClimate | Renate Schubert, Institute for Environmental Decisions, EPF de Zurich | Ivo Wallimann-Helmer, Center for Ethics, Université de Zurich

ILLUSTRATION Sarah Arnold

MISE EN PAGE Sanja Hosi, Olivia Zwygart

IMAGE DE TITRE Fotolia



PROPOSITION DE CITATION Académies suisses des sciences (2018)
Inverser les émissions ou influencer le rayonnement solaire:
La «géo-ingénierie» est-elle raisonnable, réalisable et, si oui, à quel prix?
Swiss Academies Factsheets 13 (4).

Un projet de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)

sc | nat 

www.academies-suisse.ch/factsheets

ISSN (print): 2297-1602

ISSN (online): 2297-1610

DOI: 10.5281/zenodo.1409025

Imprimé comme la nature le ferait. Cradle to Cradle™-factsheet certifiée et climatiquement neutre, imprimée par Vögel AG à Langnau.

Tableau 3: Caractéristiques des mesures d'élimination du CO₂ de l'atmosphère (CDR).

Aproche du CDR	Méthode / Mesure	Procédé / Stabilité	Echelle de temps de stockage (années)	Potentiel théorique ¹	Effets secondaires positifs/négatifs et risques	Coûts par tonne de CO ₂	Etat d'avancement du développement technique	Questions d'éthique et de justice; gouvernance
Capture biologique et stockage sous forme de biomasse	Reboisement, amélioration de la gestion forestière	Absorption du CO ₂ par l'augmentation de la production de biomasse; réversible (p.ex. incendies de forêt, ravageurs, déforestation), nécessite une gestion constante	~ 50-500	0,5-10	Augmentation possible de la qualité du sol et de la capacité de rétention d'eau; réchauffement local (surtout aux latitudes élevées) ou refroidissement (endroits secs), modifie le cycle de l'eau et la biodiversité; émissions de N ₂ O réellement plus élevées grâce à la fertilisation; concurrence avec la production alimentaire	1-100 \$; 0,1 ha de terrain	Les techniques sont connues et utilisées (même sur de grandes surfaces)	concurrence possible avec la production alimentaire; compensation
	Stockage du biochar dans le sol	Stockage du carbone par stockage du biochar dans le sol; stable pendant des décennies à plusieurs siècles; limité par la capacité d'absorption du sol	~ 50-500	0,5-5	Réduit les émissions de N ₂ O et de méthane; réduit les besoins en engrais et éventuellement en eau; augmente la fertilité des sols et la production agricole; peut-être plus d'absorption de chaleur par les sols plus foncés; moins bon bilan CO ₂ que la biomasse pour la production d'énergie	10-135 \$; 0,02-0,1 ha de terrain	Capacité de production très limitée	
	Stockage du carbone dans le sol (p.ex. culture conservatrice du sol; cultures intermédiaires)	Augmentation de la teneur en carbone dans le sol par des méthodes de culture favorables; réversible; limitée par la capacité d'absorption du sol	~ 50-500	1,5-10	Augmente la fertilité des sols et la production agricole, améliore la qualité de l'eau et de l'air; modifie l'équilibre énergétique local et l'évaporation à la surface de la terre, a besoin d'engrais	0-80 \$	Techniques bien connues	
	Stockage du carbone dans des bâtiments en bois	Stockage du carbone dans des piscines avec de longs cycles de résidence; réversible	~ 50-500	?		?	Le bois est connu comme matériau de construction	
	Fertilisation des plantes terrestres	Absorption du CO ₂ par l'augmentation de la production de biomasse; réversible	~ 50-500	?	Modifie le bilan énergétique local et l'évaporation; les émissions de N ₂ O et de CO ₂ (production d'engrais) sont réellement plus élevées	?	Techniques les plus connues	
	Création de zones humides	Stockage du CO ₂ dans des bassins de carbone avec de longs cycles de résidence	~ 500-5000	?	Nécessite peu d'espace pour beaucoup de stockage de carbone; modifie le bilan énergétique local et l'évaporation; émissions de méthane réellement plus élevées	?	Technologie connue (mouillage)	Redressements
	Gestion des écosystèmes côtiers (« blue carbon »)	Augmentation de la teneur en CO ₂ dans l'écosystème côtier (en particulier les forêts de mangrove) grâce à une gestion favorable	~ 50-500	0,15-0,3		?	Pas testé	
Capture chimique ou biologique avec stockage géologique permanent	Capture biologique du CO ₂ avec stockage géologique (BECCS)	Production d'énergie à partir de la biomasse (si possible des déchets) et capture du CO ₂ résultant; stabilité élevée dans des installations de stockage adéquates; limitée par la biomasse disponible	permanent ou > 10 000	0,5-5	Opportunités commerciales, diversification économique, indépendance énergétique; changements dans le réchauffement local et l'évaporation; diminution de la biodiversité et de la production alimentaire lorsque les cultures énergétiques sont cultivées sur des terres agricoles; pollution atmosphérique pendant la combustion; augmentation des émissions de N ₂ O; consommation d'énergie élevée	50-250 \$; 0,03-0,1 ha + 60 m ³ d'eau pour les cultures énergétiques	1 installation de démonstration à travers le monde; réalisabilité douteuse à grande échelle	Concurrence avec la production alimentaire, compensation; gestion de stockage à long terme
	Capture directe à partir de l'air (surtout chimique) (DACs)	Capture chimique du CO ₂ de l'air et stockage géologique; stabilité élevée dans des installations de stockage adéquates.	permanent ou > 10 000	0,5-10	Opportunités d'affaires; coûts élevés et consommation d'énergie (faible impact CO ₂ selon la source d'énergie) ainsi que la consommation d'eau	40-1000 \$; 3500 kWh; 1-25 m ³ d'eau	Prototypes en phase de test; techniquement pas très mature	Gestion de stockage à long terme
Augmenter l'absorption de CO ₂ dans l'océan	Fertilisation des océans avec du fer, du phosphate ou de la nitrogène	Augmentation de la croissance du plancton, augmentation de l'enfoncement et du dépôt de plancton sur le plancher océanique; stabilité dangereuse, saturation variable dans l'océan	~ 500-5000	1-4	Possible augmentation de la pêche, augmentation de la production de biomasse; augmentation de la production de gaz à effet de serre autres que le CO ₂ ; perturbation possible des écosystèmes marins et diminution de la production de biomasse dans les zones en aval; acidification/déficience en oxygène dans les grands fonds marins; algues toxiques possibles; effets secondaires régionaux négatifs pour les aliments d'origine océanique	50-500 \$	Quelques expériences à petite échelle; aucun consensus sur les effets à long terme	Contrôle international, responsabilité; accords existants ²
	Fertilisation des océans par flottabilité artificielle des eaux profondes	Augmentation de la croissance du plancton, de l'enfoncement et du dépôt de plancton au fond de l'océan	~ 500-5000	?	Modifie probablement le cycle régulier du carbone, ce qui contrebalance le stockage du CO ₂ ; compense le déclin dans d'autres régions; effets secondaires régionaux négatifs possibles pour les aliments d'origine océanique	?	Pas testé	Contrôle international, responsabilité; accords existants ²
	Elevage et stockage d'algues	Accroître la production et le stockage de la biomasse	~ 500-5000	?	?	?	Pas testé	Contrôle international, responsabilité
Intensification de la résistance aux intempéries	Ajout de silicates dans les sols et les océans	Augmentation de l'altération des roches silicatées et carbonatées (fixation du CO ₂) par concassage et distribution au sol ou dans l'océan; stable	~ 500-5000 pour les carbonates, permanent pour les silicates	0,5-4	Diminution de l'acidité des sols et des rivières ou de l'océan; effets sur les écosystèmes terrestres, aquatiques et marins; libération de métaux lourds et de nutriments végétaux dans le sol; apport énergétique élevé pour l'approvisionnement; effets secondaires négatifs possibles au niveau régional	20 - > 1000 \$	Pas testé	

¹ Potentiel technique théorique en gigatonnes (= 1'000'000'000 tonnes) de CO₂ par an. Les aspects sociaux, économiques et sociaux (tels que l'acceptation, l'éthique ou la gouvernance) ne sont pas pris en compte.

² Relève de la Convention de Londres sur la prévention de la pollution marine par la mise en décharge des déchets et autres substances; la fertilisation du fer relève de la Convention sur la diversité biologique (autorisée uniquement sur une base scientifique suffisante).

Tableau 4 : Caractéristiques des mesures d'influence du rayonnement solaire (SRM).

SRM Méthode / Mesure	Procès	Échelle de temps de l'effet	Investisse- ment	Effets secondaires / risques	Coûts par tonne de CO ₂	Etat d'avancement du développement technique	Questions d'éthique et de justice	Problème de gouvernance	Acceptation sociopoli- tique
Miroirs ou parasols dans l'espace	Réflexion du rayonnement solaire par des miroirs ou des parasols dans l'espace, réduisant ainsi le rayonnement	Durée de vie des installations	Pas de connaissances	Atténuation du cycle mondial de l'eau avec des effets variables selon les régions; augmentation possible de l'absorption du carbone par la terre et l'océan	Enormes	Pas testé; il est peu probable qu'il soit disponible au cours de ce siècle	Pas d'option de retour; effets (secondaires) inégaux au niveau régional; déplacement des risques à l'avenir	Contrôle, responsabilité	Incertain
Injection d'aérosols dans la stratosphère	Introduction de particules d'air dans une couche atmosphérique supérieure (15-20 km de hauteur), réduisant ainsi le rayonnement solaire (effet similaire à celui des volcans); l'effet dépend du type et de la taille des particules; il y a saturation - pas de refroidissement arbitraire possible.	Agit très rapidement (< 10 ans), mais doit être constamment renouvelé (en cas de démolition après quelques années de condition sans mesure)	2-8 millions de tonnes de S par an pour un refroidissement de 1 °C	Epuisement de la couche d'ozone dans les régions polaires (ou retard de 30 à 70 ans dans le rétablissement de la couche d'ozone); augmentation de l'activité photosynthétique; modification des régimes de précipitations mondiales; augmentation régionale de l'acidification des océans; une autre composante anthropique du système climatique aux conséquences inconnues; si la mesure est abandonnée, augmentation rapide de la température jusqu'au niveau sans SRM, avec de nombreux problèmes d'adaptation	1-10 milliards de \$ pour un refroidissement de 1-2 W/m ² (selon le taux d'actualisation choisi, la dynamique ou les risques d'effets secondaires)	Pas testé, mais les technologies sont disponibles en principe; les éruptions volcaniques peuvent être utilisées dans une certaine mesure comme analogues; des expériences à grande échelle sur des décennies seraient nécessaires pour estimer les effets secondaires	Questions multinationales; pas d'option de retour; effets (secondaires) inégaux au niveau régional; transfert des risques aux générations futures; effets des mesures unilatérales; moral de la prise de contrôle de la température mondiale.	Contrôle (qui contrôle? qui détermine la température désirée?); Responsabilité (qui est responsable du déploiement, des coûts, de la compensation); Conventions internationales (p. ex. Protocole de Montreal)	Grand scepticisme
Eclaircissement du nuage par injection de noyaux de condensation	Incorporation du sel marin dans les nuages au-dessus de la mer (surtout dans les régions tropicales et subtropicales). Il en résulte des gouttelettes d'eau plus nombreuses et plus petites, des nuages plus brillants et une réflexion plus forte de la lumière du soleil; effet de saturation (la luminosité des nuages est limitée)	Agit très rapidement (< 10 ans), mais doit être renouvelé constamment (après quelques jours dans l'état sans aucune mesure)	100-300 millions de tonnes de sel sec supplémentaire par an pour un refroidissement de 1°C	Différents effets régionaux; modifie le bilan énergétique local et l'évaporation ainsi que les courants océaniques et atmosphériques possibles; signifie une autre composante anthropique du système climatique aux conséquences inconnues	1-10 milliards de \$ pour un refroidissement de 1-2 W/m ²	Pas testé; certains résultats d'observations de routes maritimes; l'effet de la mesure est controversé, puisque très peu de navires atteignent l'effet désiré	Pas d'option de retour; effets (secondaires) inégaux au niveau régional; déplacement des risques vers l'avenir.	Contrôle, responsabilité	Incertain
Eclaircissement de l'albédo à la surface de la terre (dans les villes, l'agriculture, les déserts)	Réflexion plus élevée du rayonnement solaire par des surfaces plus brillantes; possible dans les villes, sur l'herbe et les zones agricoles ou dans l'océan (p. ex. par plus de microbulles)	Tant que la mesure est maintenue	Insignifiante à l'échelle mondiale, il y a surtout un impact régional	Refroidissement principalement dans la région de la mesure; influence possible sur les précipitations dans les régions de mousson	Pas encore évalué	Pas testé; des simulations du modèle confirment le mécanisme	Pas d'option de retour; effets (secondaires) inégaux au niveau régional; déplacement des risques vers l'avenir	Contrôle, responsabilité	Incertain
Augmentation du rayonnement de chaleur sortant par modification des cirrus	L'éclaircissement des hauts cirrus par l'injection de noyaux de glace et l'affaiblissement de leur effet de serre. L'effet est controversé.	Tant que la mesure est maintenue	Inconnu	Changements dans les régimes de précipitations; appauvrissement de la couche d'ozone (plus de rayonnement UV)	Inconnu	Jusqu'à présent, ce n'est possible qu'en théorie	Pas d'option de retour; effets (secondaires) inégaux au niveau régional; déplacement des risques vers l'avenir	Contrôle, responsabilité	Incertain