

Le paradigme de la compensation et les dettes climatiques : vers une normalisation du dépassement et de la géo-ingénierie solaire ?

The Paradigm of Offsetting and Climate Debt: Toward the Normalization of Overshoot and Solar Geoengineering?

Marine de Guglielmo Weber¹

¹ Institut de recherche stratégique de l'école militaire, France, marine.de-guglielmo@irsem.fr

RÉSUMÉ. Longtemps considérée comme une folie d'apprentis sorciers, la géo-ingénierie, qui renvoie à l'ensemble des projets d'intervention technique et à grande échelle sur le système climatique, a progressivement gagné en crédibilité au fil des dernières années, et commence à être sérieusement envisagée dans les débats internationaux sur le climat. Dans ce papier, nous nous proposons d'analyser le processus de normalisation de la géo-ingénierie dans les arènes de discussions internationales. Ce processus part de l'intégration, au prisme classique de la décarbonation, d'une logique de compensation : l'on distingue maintenant, dans les accords sur le climat, la réduction facultative des émissions qui peuvent être « atténuées », c'est-à-dire capturées par le recours à des techniques de capture du carbone, de la réduction obligatoire des émissions qui ne peuvent pas l'être. Or cette logique de compensation a tout à la fois pour effet de normaliser les CC(U)S et la géo-ingénierie du carbone et de rendre optionnelles une partie des mesures de décarbonation. La question que nous nous poserons dans ce papier est de savoir dans quelle mesure tout cela pointe vers un nouvel horizon : la normalisation de la perspective d'un dépassement du seuil fixé par l'Accord de Paris, mais aussi de la géo-ingénierie solaire, entendue comme un moyen de compenser, sur le plan thermique cette fois, la mise en échec ou, à minima, le report des mesures de décarbonation. Il s'agira, en somme, d'étudier le passage d'une économie de la promesse à celle de la dette.

ABSTRACT. Long considered as “playing the Sorcerer's Apprentice”, geoengineering, which refers to a wide range of large-scale technical interventions on the climate system, has gradually gained credibility over the past few years and is now being seriously considered in international climate debates. In this paper, we aim to analyze this process of normalizing geoengineering within international discussion arenas. This process stems from the integration of a compensation logic through the classical lens of decarbonization: climate agreements now distinguish between the optional reduction of emissions that can be 'mitigated,' that is, captured through carbon capture techniques, and the mandatory reduction of emissions that cannot be mitigated. This compensation logic has the dual effect of normalizing CC(U)S and carbon geoengineering, while rendering some decarbonization measures optional. The question we will address in this paper is to what extent all of this points to a new horizon: the normalization of the prospect of overshooting the threshold set by the Paris Agreement, and also the normalization of solar geoengineering, understood as a means of thermally compensating for the failure or, at the very least, the postponement of decarbonization measures. The aim, in essence, will be to study the shift from an economy of promise to one of debt.

MOTS-CLÉS. Décarbonation, capture carbone, CC(U)S, modification du bilan radiatif, géo-ingénierie.

KEYWORDS. Decarbonization, carbon capture, CC(U)S, solar radiation modification, geoengineering.

Introduction

Le terme « décarbonation » est couramment utilisé pour désigner le processus de transition énergétique, soit le passage d'un système de consommations fondé sur des énergies fossiles à un système fondé sur des énergies non-fossiles. Au-delà de ce seul processus, la décarbonation pointe aussi un horizon fonctionnel : le net zéro, objectif à atteindre pour une très large majorité d'Etats d'ici 2050. Cette « extrapolation » [BUC, 2018, p.2] de la transition énergétique aux objectifs de neutralité carbone est à l'origine d'une certaine instabilité, de certains écarts de sens dans ce que l'on entend par « décarbonation ». Loin de toujours désigner, de manière univoque, les stratégies de réduction *a priori*

des émissions, le terme intègre, bien souvent, des technologies ayant pour but de les faire disparaître *a posteriori*. Ces procédés, dits d'« émissions négatives », sont traditionnellement classés en deux grandes familles : d'une part, celle du captage, stockage, et utilisation du CO₂ ou CC(U)S pour *Carbon Capture, Utilization, and Storage*, qui consiste à séquestrer le CO₂ émis par les installations industrielles par l'ajout d'un filtre à la sortie de cheminée - puisqu'il s'agit d'intercepter le CO₂ à sa source, le CC(U)S est considéré comme une pratique d'atténuation, que l'historien Régis Briday rapproche de l'« ingénierie environnementale »¹; d'autre part, celle de l'extraction du dioxyde de carbone déjà présent dans l'atmosphère, ou CDR pour *Carbon Dioxide Removal*. Celle-ci est souvent rattachée à l'ensemble des procédés d'ingénierie climatique, ou de géo-ingénierie, entendus comme des procédés d'intervention sur l'atmosphère à grande échelle². On l'appelle parfois « géo-ingénierie du carbone », en contraste avec la « géo-ingénierie solaire », qui consiste à abaisser artificiellement la température globale par une modification du bilan radiatif terrestre.

Si l'extrapolation mentionnée plus haut induit une ambivalence, c'est parce que l'horizon fonctionnel de la décarbonation n'est pas celui du « zéro émission », mais bien du « zéro émission nette », ou de la « neutralité carbone », c'est-à-dire qu'il intègre la possibilité que des émissions qui n'ont pas pu être évitées puissent être compensées. L'apparition progressive de cette « norme internationale » du net zéro s'est faite à partir des années 2000 et ce jusqu'à la Conférence des Parties (COP) 21 de 2015 qui marque le début de son institutionnalisation [VAN, 2022, p.51³]. Le paradigme de la compensation qu'elle sous-tend est cependant plus ancien, et remonte au protocole de Kyoto. Il présente une dimension technologique - toute émission résiduelle peut et doit être compensée par des mécanismes de retrait via des puits de carbone - et une dimension financière - toute émission résiduelle peut être compensée par des échanges de crédits carbone (pour illustration, les mécanismes de marché prévus dans l'Article 6 de l'Accord de Paris)⁴.

Dans cet article, nous retracerons brièvement l'histoire des techniques de CC(U)S et de CDR, et aborderons les liens entre leur promotion dans les arènes de négociations internationales, et les dynamiques de report des efforts d'atténuation sous l'égide du paradigme de la compensation. Puisque les promesses technoscientifiques liées aux procédés d'ingénierie environnementale et climatique ouvrent la voie à la contraction de dettes – des dettes carbone d'abord, et par la suite, des dettes thermiques – elle semble contribuer à la normalisation de l'idée de dépassement, ou *overshoot*⁵. Cette idée, de plus en plus présente dans les travaux des modélisateurs, mais aussi dans les rapports

¹ « En définitive, le CCS se présente comme une ingénierie environnementale aux deux sens du terme. D'un côté, il constitue une nouvelle ramifications de la branche de l'ingénierie qui se donne pour mission la protection et l'amélioration de l'environnement *per se* (ici, l'atténuation du changement climatique). D'un autre côté, il apparaît comme un type d'ingénierie qui pourrait étendre significativement l'empreinte de l'humanité sur l'environnement en cas de déploiement massif (...)» [BRI, 2024, p. 6].

² Certains chercheurs font une distinction. C'est le cas de l'historien Régis Briday, qui distingue les techniques d'ingénierie climatique locales, qui doivent permettre d'« agir sur le climat global par la multiplication progressive des initiatives individuelles », des techniques de géo-ingénierie, qui impliquent des effets rapides et à grande échelle du climat global [BRI, 2024, p.3]. Ainsi, on parlera d'ingénierie climatique concernant certaines techniques de séquestration du carbone locales, comme les usines de captage direct dont nous allons traiter plus tard, et plutôt de géo-ingénierie concernant des techniques pouvant entraîner des effets rapides et à grande échelle, telles que la fertilisation des océans.

³ L'adoption de cette norme par les Etats s'est faite cependant plus tardivement, à partir de la fin 2018, et, selon les auteurs, avec une rapidité « remarquable ». Selon eux, un groupe informel de négociatrices et de militantes, surnommées « les lionnes » ont joué un rôle structurant dans la promotion de cette norme, de même que le GIEC, dont le rapport spécial sur le réchauffement 1,5°C a constitué un « tournant » [VAN, 2022, p.49].

⁴ Cette approche comptable a notamment pour limite de faire du carbone une abstraction, décorrélée du contexte technique et socioéconomique de son émission ou de sa séquestration, et notamment des émissions, des enjeux de biodiversité, et des enjeux de justice climatique associés.

⁵ Entendu comme le dépassement du seuil de 1,5°C de réchauffement en comparaison à la période préindustrielle fixé par l'Accord de Paris.

institutionnels, semble favoriser l'apparition d'un continuum idéologique entre la capture du carbone et la modification du bilan radiatif, ainsi que la normalisation de cette dernière comme complément indispensable à la sortie du dépassement.

1. Le paradigme de la compensation

1.1. Décarboner l'industrie, décarboner la planète

Les premiers usages de technologies de CC(U)S datent des années 1920, lorsque l'on cherchait à séparer le CO₂ parfois présent dans les réservoirs de gaz naturel du gaz méthane commercialisable. Elles connaissent par la suite un nouvel essor dans les années 1970, et entrent alors dans le cadre de la « récupération assistée du pétrole » (*enhanced oil recovery*) : un ensemble de procédés consistant à augmenter la quantité de pétrole qui peut être extraite d'un gisement. Les techniques de capture sont utilisées pour récupérer le CO₂ émis lors de la production de pétrole et de gaz, et l'injecter dans les réservoirs épuisés pour les dépressuriser et en extraire davantage d'hydrocarbures. Encore à ce jour, chaque année, des millions de tonnes de CO₂ sont capturés sur des installations industrielles, transportés par pipeline et injectés dans des champs pétroliers.

La première mention d'un usage climatique des techniques de CC(U)S est attribuée au physicien italien Cesare Marchetti, qui se pose, en 1977, la question de « la quantité de combustibles fossiles que nous pouvons encore brûler sans nous brûler les doigts » [MAR, 1977, p. 1]. Sur la base des savoirs existants sur le lien entre combustion des énergies fossiles, augmentation du taux de carbone dans l'atmosphère, et dérèglement du système climatique global, il promeut le développement d'une solution technique qu'il appelle « géoingénierie»: non pas une ingénierie du sous-sol, mais bien plutôt une ingénierie de la Terre, qu'il définit comme « une sorte de "synthèse de système" où des solutions aux problèmes mondiaux sont tentées d'un point de vue global ». Il propose plus précisément « une sorte de "cycle du combustible" pour les combustibles fossiles, dans le cadre duquel le CO₂ est partiellement ou totalement collecté à certains points de transformation, et correctement éliminé » [MAR, 1977, v]. Les travaux de Marchetti ouvrent la voie à une mue de la capture carbone, qui devient une solution de stabilisation climatique, tout en relayant l'idée d'une économie circulaire du carbone qui consisterait à brûler, capturer, et stocker le carbone de manière cyclique. En dépit de ses usages carbonés, le CC(U)S⁶ est aujourd'hui devenu un élément structurant des stratégies d'atténuation et est identifié comme pouvant significativement contribuer aux transitions vers des systèmes énergétiques bas-carbone [INT, 2005]⁷. Au début de l'année 2024, on comptait 68 installations opérationnelles de CC(U)S dans le monde. Ces projets sont principalement situés en Amérique du Nord et en Europe, avec plus de 200 autres projets en développement ou en phase de planification [MCK, 2024]. En France, une usine pilote a par exemple été installée à Dunkerque dans le cadre du projet « 3D », l'objectif étant, à terme, de traiter les gaz issus de la production d'acier d'ArcelorMittal.

En ce qui concerne le CDR, ses principaux procédés apparaissent à la fin des années 1990. C'est le cas de la bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone, ou BECSC, concept évoqué pour la première fois en 1998 par Robert Williams, physicien à l'université de Princeton [WIL, 1998]. L'idée est la suivante : il est possible de générer de l'énergie en brûlant de la biomasse (qu'il s'agisse de résidus agricoles, forestiers, de déchets organiques...), tout en séquestrant, lors de la combustion, le

⁶ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

⁷ Malgré la légitimité croissante du CC(U)S en tant que potentielle solution climatique, notons que, selon l'Institute for Energy Economics and Financial Analysis, la très large majorité du dioxyde de carbone capturé tout au long de l'histoire a été utilisé dans la récupération assistée du pétrole, soit environ 80 à 90 %. Seule une petite proportion des projets de capture du carbone (environ 10 à 20 %) a stocké le carbone dans des structures géologiques dédiées sans l'utiliser pour la production de pétrole et de gaz [ROB, 2022]. Le CC(U)S n'est donc, toujours pas à ce jour, une mesure efficace de diminution du carbone atmosphérique, mais bien plutôt une mesure d'augmentation du carbone atmosphérique, en ce qu'il sert toujours très largement à maximiser l'exploitation des hydrocarbures.

CO₂ qu'elle a absorbé au cours de sa croissance. C'est aussi le cas de la capture directe du carbone (*Direct Air Capture*, DAC), évoquée un an plus tard par Klaus Lackner, qui fondera en 2014 le Center for Negative Carbon Emissions : « il semble extrêmement difficile d'arrêter la croissance de la demande d'énergie fossile (...). La seule issue semble être un moyen de collecter et de disposer ultérieurement du gaz après sa génération », affirme-t-il lors d'une conférence [LAC, 1999]. En imaginant à cette fin la mise en place d'« arbres artificiels », Lackner pose alors les bases conceptuelles de la DAC telle qu'elle est déployée aujourd'hui, qui consiste à aspirer l'air ambiant et le filtrer pour capturer son CO₂. Que ce soit chez Marchetti, qui souhaite éviter toute « restriction substantielle » de la combustion des énergies fossiles [MAR, 1977, p. 1], ou chez Lackner, qui considère qu'il est plus « difficile » d'« arrêter la croissance de la demande d'énergie fossile » que de « disposer ultérieurement du gaz », les techniques de capture du carbone sur site de production comme les techniques de capture directe du carbone sont considérées, dès leur conception, comme des substituts aux politiques climatiques de réduction des émissions. Le paradigme de la compensation prend, ici, la forme d'une économie circulaire du carbone : tout ce qui est extrait des sous-sols pourra y être enfoui à nouveau.

1.2. Le paradigme de la compensation dans les négociations internationales sur le climat

Si les premières esquisses théoriques des CC(U)S et des CDR sont réalisées dans les années 1970 et 1990, elles ne sont pas tout de suite intégrées aux discussions internationales sur le climat. Au début des négociations de la CCNUCC, l'idée d'une économie circulaire du carbone fait son chemin dans les discussions, poussée cependant par la promotion d'une autre solution : les puits de carbone naturels, c'est-à-dire les systèmes naturels absorbant une partie du carbone atmosphérique, à l'instar des forêts. La promotion de cette solution joue un rôle fondamental dans la légitimation des techniques citées plus tôt, puisqu'elle contribue à deux phénomènes : d'une part, à la diffusion de l'idée selon laquelle on peut réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre par le biais de techniques et pratiques de séquestration du carbone et ainsi s'exonérer d'une part importante des efforts plus classiques d'atténuation ; d'autre part, à une sorte de territorialisation du cycle du carbone, qui se traduit par la comptabilisation des émissions nationales [LOV, 2006].

A partir du début des années 1990, les négociations climatiques formulent comme objectif explicite la stabilisation de la concentration de carbone atmosphérique. Cependant, la réduction *a priori* des émissions est très rapidement perçue comme trop coûteuse, et incertaine puisque dépendant d'une restructuration majeure des modèles de consommation et de production en place. Dans ce contexte, les États-Unis, mais aussi la Norvège, la Russie, le Canada, l'Australie, la Nouvelle-Zélande, avancent la séquestration du carbone par les terres comme une stratégie tout aussi efficace, et surtout plus accessible. Ils proposent que des objectifs quantitatifs de réduction des émissions soient négociés sur la base d'un concept encore aujourd'hui structurant pour la gouvernance internationale du climat : *un système comptable net*, qui consisterait à soustraire, aux émissions nationales, les quantités de carbone éliminées par les puits nationaux [LOV, 2006, pp. 227-228]. Motivés par la promesse d'alternatives rentables aux réductions d'émissions, ils ont fait de l'inclusion des puits une condition préalable à la signature de l'accord [DOO, 2017], qui invite ainsi à mettre en place un système national de mesure des sources et puits anthropiques⁸ de gaz à effet de serre. A Kyoto, les émissions sont donc territorialisées, et la séquestration du carbone devient un rouage indispensable des stratégies de réduction des émissions. Sa normalisation, et la naissance simultanée de l'idée de « comptabilité nette », vont être structurantes pour la suite des négociations climatiques, *a fortiori* à partir des années 2000, quand l'ensemble des techniques de capture carbone, qu'il s'agisse des techniques de CC(U)S comme de CDR, connaissent un réel essor. Le CC(U)S émerge alors sous la forme d'une multitude de programmes publics-privés, sous l'égide de cinq pays leaders : États-Unis, Chine, Norvège, Canada et Australie [BRI, 2020]. Parallèlement à cette concrétisation technique, le CC(U)S est définitivement

⁸ Les puits de carbone gérés par les sociétés humaines, soit la très grande majorité des puits naturels à l'exception des forêts primaires et des océans.

légitimé en tant que solution d'atténuation lors de la publication, en 2005, d'un rapport spécial⁹ sur la question par le GIEC¹⁰ [INT, 2005]. Il va en être de même pour les techniques d'extraction du carbone atmosphérique, qui vont se diversifier et être explorées dans le cadre d'une série de rapports consacrés à l'ensemble des solutions de géo-ingénierie [ROY, 2009, GIEC, 2012¹¹...]. Le développement du CDR demeure cependant plus limité que celui du CC(U)S : on recense 27 projets pilotes et installations en développement de DAC dans le monde (Climeworks en Suisse et en Islande, Carbon Engineering aux Etats-Unis [IEA, 2022], et vingt installations de BECCS [GLO, 2022]).

Bien que toujours en retrait comparativement aux techniques d'atténuation « conventionnelles », la capture du carbone est donc une composante des discussions climatiques depuis la fin des années 1990, et surtout depuis le milieu des années 2000. La promotion de cet ensemble de techniques a notamment donné lieu à une distinction structurante entre les énergies « atténuées » et « non atténuées » - « *abated* » et « *unabated* ». Les énergies « atténuées » sont des énergies dont les émissions sont capturées par des procédés de séquestration du carbone, tandis que les énergies « non-atténuées » sont des énergies dont les émissions ne sont pas capturées et finissent dans l'atmosphère – il est donc entendu que seules les émissions non compensables posent problème. Cette distinction est apparue pour la première fois dans le champ des négociations internationales trente ans après le Protocole de Kyoto, en mai 2021, la déclaration finale de la réunion des ministres du climat et de l'énergie du G7 au Royaume-Uni s'étant close sur un engagement des gouvernements à mettre fin au soutien direct des centrales à charbon « unabated ». Quelques mois plus tard, le Pacte climatique de Glasgow, résumant les accords clés de la COP26, appelait les pays à réduire progressivement le charbon « non atténué ». L'expression fut ensuite utilisée en 2022, dans l'engagement des Etats du G7, celui des Etats du G20, et des deux COP qui ont suivi.

C'est cependant à l'occasion de la COP28, accueillie par les Emirats Arabes Unis et présidée par le Sultan Al Jaber, que cet élément de langage est devenu le plus structurant. Quelques mois avant la COP 28, les 2 et 3 mai 2023, à l'occasion du Dialogue de Petersberg sur le climat, une quarantaine de dirigeants internationaux se sont réunis afin de préparer le sommet. À cette occasion, le sultan Ahmed Al Jaber a souligné le défi que constitue l'augmentation mondiale de la demande d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour les accords de Paris. Il appelait alors à l'accélération du développement des énergies renouvelables, sans toutefois prôner la réduction de la consommation des énergies fossiles. Celles-ci étant durablement appelées à jouer un rôle majeur dans la réponse aux besoins énergétiques mondiaux, il ne s'agissait pas selon lui de s'en détourner, mais bien plutôt de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées, par le biais des technologies de capture du carbone. Des propos cohérents avec ceux tenus dans sa Lettre aux Parties du 13 juillet 2023, dans laquelle il appelait de ses vœux un « système énergétique exempt de combustibles fossiles non atténués au milieu de ce siècle » et « une réduction responsable des combustibles fossiles non atténués ». [ALJ, 2023, 13 juillet]. Par ailleurs, selon le Center for International Environmental Law (CIEL), au moins 475 lobbyistes spécialisés dans les CC(U)S étaient présents à la COP 28, à l'instar de Darren Woods, PDG d'ExxonMobil et fervent promoteur de la capture du carbone (CIEL, 2023, 9 décembre). En outre, la capture du carbone a été promue dans le cadre d'un certain nombre d'événements annexes à la COP, à l'instar d'une table-ronde intitulée « Carbon management : essential pillar to keep 1.5°C alive » tenue le 5 décembre. A cette occasion, les représentants gouvernementaux ont affirmé que les techniques de capture du carbone étaient « essentielles pour maintenir l'objectif de 1,5°C à portée ». L'Australie, le Canada, l'Égypte, l'Union européenne, le Japon, le Royaume d'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis, les États-Unis, la Norvège et le Danemark ont annoncé un soutien gouvernemental accru au développement et au déploiement de ces technologies. L'initiative fixait un objectif de stockage de 1,2 Gt de CO2 d'ici 2030, soit une augmentation de 26 fois par rapport à la capacité de

⁹ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf

¹⁰ GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat.

¹¹ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

stockage CCS existante de 45 Mt. Le fossé entre les objectifs affichés et la réalité des capacités dans ce domaine, de même qu'entre ces objectifs de capture et la quantité d'émissions qu'ils devraient compenser - même si le seuil de 1,2 Gt était atteint, il ne représenterait que 3% des émissions de l'année 2022 - ne sont pas sans nous rappeler les analyses d'Amy Dahan et de Stefan [AYK, 2015] sur le « schisme de réalité» qui frappe la gouvernance internationale du climat¹². Ce schisme entre l'importance accordée aux CC(U)S dans le cadre des événements climatiques internationaux et le faible rôle que ces techniques peuvent jouer dans l'immédiat alimente et est alimenté par une économie des promesses technoscientifiques. Celles-ci sont relayées par certains secteurs industriels, notamment énergétiques, dans leur quête de solutions techniques alternatives aux politiques climatiques [LOW, 2020], et tendent à fragiliser les engagements en matière d'atténuation auxquels elles proposent un substitut [ASA, 2019].

Outre leur faisabilité, la performativité de ces objectifs peut en effet être questionnée, de manière analogue à la performativité de certains scénarii mis en avant par le GIEC - on pensera notamment au RCP2.6¹³, s'appuyant très largement sur les technologies d'émissions négatives, malgré leur faible niveau de maturité, pour aboutir à une stabilisation rapide des émissions et ayant suscité une réelle controverse scientifique [BEC, 2017 ; AND, 2016]. Les jalons temporels fixés par ce groupe d'Etats présentent de fait des effets de cadrage intéressants : il s'agit non seulement de juxtaposer aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre ou de maintien des températures planétaires des objectifs en matière de développement technologique des émissions négatives ; mais il s'agit également de juxtaposer à l'horizon du 1,5°C fixé par l'Accord de Paris, ou à l'horizon de la baisse des émissions, celui de la maturité technologique de ces procédés, et de leur mise à l'échelle. Se pose alors la question du délai entre ces horizons : et si la maturité technologique des CC(U)S et des CDR était plus tardive que la baisse des émissions, et si elle était postérieure au franchissement du seuil fixé par l'Accord de Paris ? Cette perspective mène à un dédoublement de l'impératif de compensation : non seulement nous faudra-t-il à l'avenir compenser la « dette carbone » que nous sommes en train de contracter par un déploiement massif de technologies d'émissions négatives, mais en plus, il faudra, d'ici à ce qu'elles soient opérationnelles, compenser le délai d'attente, le décalage entre l'horizon temporel climatique et l'horizon temporel technologique. L'enjeu est, plus précisément, de stabiliser le climat, de le sécuriser, de ralentir les dérèglements en cours le temps qu'on puisse les traiter à leur source. C'est ici que la modification du bilan radiatif intervient, en réponse à la perspective de l'*overshoot*.

2. De la compensation carbone à la compensation thermique : éviter l'*overshoot*

2.1. Modification du bilan radiatif

Tout comme l'idée d'une élimination *a posteriori* des émissions carbone, l'idée d'un refroidissement artificiel de la planète est elle aussi théorisée dans les années 1970, par la formulation d'une technique bien précise : l'injection de soufre dans la stratosphère. Cette technique est proposée par le chercheur soviétique Mikhaïl Budyko qui, après avoir exploré le potentiel de la fonte des glaces arctiques pour l'économie soviétique - et donc souligné les intérêts d'un réchauffement climatique pour certaines régions [OLD, 2023] - commence à s'inquiéter de l'effet réchauffant des émissions de gaz à effet de serre, et avance la nécessité de stabiliser les conditions climatiques pour éviter des bouleversements socio-économiques. En 1974, Budyko consacre ainsi, avec des collègues de l'Observatoire principal de géophysique de Leningrad, un article à la possibilité de modifier le climat mondial en injectant des aérosols dans la basse stratosphère par avion, une proposition s'appuyant sur

¹² Schisme observé entre l'impression de progrès qui règne dans les arènes de négociations internationales sur le climat, et l'immobilisme qui caractérise en réalité les décisions, alors même que l'aggravation de la situation climatique poursuit son cours.

¹³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/3-scenarios-et-projections-climatiques>

l'effet de refroidissement observé des aérosols émis par les éruptions volcaniques et par l'activité industrielle. Ces aérosols ont de fait pour effet de réfléchir la lumière solaire entrante et de réduire la température à la surface de la Terre. L'article, cependant, se clôt sur une invitation à la prudence, soulignant le caractère incertain des conséquences qu'une intervention sur la stratosphère pourrait avoir pour un certain nombre de pays [BUD, 1974, p. 22]. La même année, il écrit dans une monographie qui sera traduite en anglais en 1977 qu'une réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre est compromise, et présente l'injection d'aérosols dans la stratosphère comme l'une des méthodes les plus现实的 pour atténuer les changements climatiques [BUD, 1977]. Ces travaux seront repris en Russie par un collègue de Budyko, Yuri Izraël, mais feront également leur chemin aux Etats-Unis, et susciteront surtout, quelques décennies plus tard, l'intérêt du prix Nobel de Chimie Paul Crutzen.

En 2006, celui-ci publie un article intitulé « Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections : A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? ». Dans cet article, il défend l'idée selon laquelle l'injection d'aérosols stratosphériques serait peut-être la solution aux changements climatiques, face à notre incapacité collective à faire baisser les émissions de gaz à effet de serre [CRU, 2006]. Il s'appuie sur l'argument suivant : la combustion des énergies fossiles libère du CO₂ dans l'atmosphère, ce qui entraîne un réchauffement, mais elle émet également du soufre, qui, par son effet réfléchissant, compenserait une partie du réchauffement entraîné par le CO₂. [CRU, 2006, p. 211]. Les politiques de lutte contre la pollution de l'air, en réduisant la quantité de soufre présente dans l'atmosphère, sont donc un facteur d'aggravation des changements climatiques, par l'amplification du réchauffement global. Puisque la pollution au soufre actuelle est néfaste, il faut reproduire une pollution contrôlée qui n'affecterait pas la santé humaine. S'inspirant lui aussi des éruptions volcaniques - et notamment de l'éruption du Mont Pinatubo qui, en 1991, provoqua un refroidissement moyen de la surface planétaire d'un demi-degré l'année qui a suivi - il propose donc de compenser le réchauffement climatique par l'injection continue d'1 à 2 téragrammes (Tg) de soufre par an. Cet article crée une véritable rupture dans l'histoire de la géo-ingénierie solaire¹⁴. Jusque-là marginale, peu étudiée depuis les ambitions de contrôle militaire de l'environnement de la guerre froide¹⁵, la géo-ingénierie solaire est remise sur le devant de la scène par un prix Nobel de Chimie, déjà bien connu pour la popularisation d'un néologisme structurant pour l'appréhension occidentale des changements climatiques : l'Anthropocène¹⁶.

Durant les années qui ont suivi la publication de l'article de Crutzen, les différentes techniques de modification du bilan radiatif ont fait l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique, notamment aux États-Unis, où de nombreux projets de recherche universitaires sont financés par des philanthropes et des mécènes privés sur le sujet [STE, 2022]. Face au retard pris par les politiques d'atténuation, des promoteurs de la géo-ingénierie solaire, tels que Gernot Wagner ou David Keith, affirment qu'il est impératif de maîtriser de telles techniques pour qu'elles puissent

¹⁴ L'injection d'aérosols dans la stratosphère n'est pas la seule technique possible de géo-ingénierie solaire, ou modification du bilan radiatif. D'autres techniques, comme le blanchiment des nuages marins, l'amincissement des cirrus, l'éclaircissement des océans, sont à l'étude.

¹⁵ Les premiers travaux sur la possibilité de contrôler la température planétaire datent du début du XXe siècle, époque à laquelle les scientifiques, craignant l'avènement d'une nouvelle ère glaciaire, cherchaient bien plutôt un moyen de réchauffer la planète [DEG, 2024]. Cependant, la modification du bilan radiatif, à l'instar de l'ensemble des projets de modification du temps et du climat, fait surtout l'objet de recherches actives dans le contexte hautement militarisé de la guerre froide, où la mobilisation des chercheurs états-uniens et soviétiques pour le contrôle atmosphérique est significative.

¹⁶ Sous l'égide de ce concept, le récit des changements climatiques est celui d'une altération chimique involontaire des conditions atmosphériques. Son caractère tout à la fois descriptif et normatif est, selon Jeremy Baskin, l'un des facteurs qui en ont fait le fondement des discours tenus par les promoteurs de la géo-ingénierie, ce dans le cadre d'un « imaginaire impérial », de conquête, maîtrise du système climatique [BAS, 2019]. L'idée selon laquelle nous sommes entrés dans l'ère géologique des humains est non seulement un constat, mais aussi une invitation à concrétiser l'altération anthropique des conditions atmosphériques, ou bien plutôt à la renouveler, cette fois de manière consciente et éclairée.

rapidement être mises en place dans le cas, de plus en plus probable, d'un échec politique. Si la modification du rayonnement solaire demeure moins populaire que la capture carbone, et si elle suscite encore une certaine méfiance, elle fait néanmoins l'objet d'un processus de normalisation, et est de plus en plus perçue une initiative de recherche légitime [BIE, 2022]. Nous postulons que cette normalisation est en partie liée à la normalisation d'une perspective bien précise : celle du dépassement, ou de l'overshoot.

2.2. Sur le concept de dépassement

En 2023, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) publiait un rapport suggérant que, pour la première fois, il était probable que la température de surface mondiale dépasse le seuil de +1,5 °C par rapport aux températures préindustrielles au moins une fois au cours des cinq années suivantes [ORG, 2023]. Si la perspective d'un dépassement sur le long terme peut toujours être évitée par une réduction drastique des émissions, sa probabilité, au regard du rythme actuel des stratégies d'atténuation, augmente de jour en jour, ce qui explique la multiplication des scénarios de dépassement envisagés par les modélisateurs [RIC, 2017]. Deux autres facteurs semblent cependant y avoir contribué. Le premier est l'accord de Paris, qui aurait, en fixant un objectif inatteignable (lors de l'annonce du seuil à 1,5°C, une large partie de la communauté scientifique l'estimait hors de portée), banalisé l'idée qu'il serait dépassé, au moins temporairement, avant que l'on puisse à nouveau ramener les températures à des niveaux inférieurs [REI, 2023]. Un deuxième facteur peut être trouvé dans l'essor des recherches et des investissements dans les émissions négatives, qui ouvrent théoriquement la possibilité d'un dépassement du seuil avant un retour rapide au niveau cible par une séquestration massive de CO₂. [ASA, 2019]. La perspective d'un dépassement temporaire n'est de fait pas envisageable sans de telles technologies, seules à même de nous en sortir. Il s'agirait précisément d'« emprunter des émissions de carbone (...) pour éviter une réduction des émissions à court terme, une dette qui sera remboursée plus tard par la CDR » [ASA, 2019, p.939].

En 2023, la Climate Overshoot Commission, ou « Commission du Dépassement Climatique », rendait également son premier rapport. Cette structure, créée en mai 2022 dans le cadre du Forum de Paris sur la Paix, se définit comme une « instance indépendante, réunissant douze éminents leaders mondiaux, qui souhaitent proposer des stratégies pour atténuer les risques dans le cas où le réchauffement planétaire dépasserait l'objectif de 1,5°C » [CLI, 2023, p.6]. Son approche est résumée par l'acronyme « CARE » : « - Couper les émissions - S'Adapter - Retirer le carbone - Explorer la MRS (modification du rayonnement solaire) ». Ici, l'on observe un continuum explicite entre l'atténuation et la modification du bilan radiatif, continuum fondé sur ce qui semble être un report de dette. Dans un premier temps, le retard du volet « Couper les émissions » motive un report de la dette sur le volet « Retirer le carbone » ; dans un second temps, les délais de maturation technologique du volet « Retirer le carbone » motivent un nouveau report de la dette, cette fois sous la forme d'une dette thermique, sur le volet « Explorer la MRS » dont le but est d'« annuler le réchauffement au-delà du seuil cible jusqu'à ce qu'il ne soit plus nécessaire d'emprunter » [ASA, 2019, p. 939]. Cette idée n'est pas nouvelle, on pouvait déjà la trouver, dix ans plus tôt, dans un rapport de la Royal Society : « la gestion du rayonnement solaire pourrait avoir le potentiel de stabiliser temporairement la température mondiale et ses effets associés, tout en donnant du temps pour réduire les émissions de GES » [ROY, 2011, p.19].

La fonction de la modification du rayonnement solaire, dans ce cadre, est celle de « l'écrêtage du pic » (« *peak shaving* ») : elle doit lisser la température globale jusqu'à ce que celle-ci revienne sous des seuils acceptables sous l'effet de la baisse des émissions. C'est ainsi qu'en 2016, la climatologue Simone Tilmes et ses collègues écrivent dans un article scientifique :

Nous constatons que la décarbonation tardive dans le CESM¹⁷, sans application de l'injection de soufre stratosphérique (SSI), conduit à une augmentation maximale de la

¹⁷ Community Earth System Model.

température de 3°C, et la GMT reste au-dessus de 2°C pendant 160 ans. Une augmentation progressive puis une diminution de la SSI sur cette période, atteignant environ 1,5 fois la charge d'aérosol résultant de l'éruption du mont Pinatubo en 1992, limiterait l'augmentation de la GMT à 2,0°C pour cette trajectoire et ce modèle spécifiques. La SSI produit des températures moyennes et extrêmes dans le CESM comparables à celles d'une trajectoire de décarbonisation précoce, mais l'aridité n'est pas atténuée dans la même mesure [TIL, 2016, p.8222].

Dans le cadre du « peak shaving », l'intervention sur l'atmosphère est non seulement ponctuelle, mais elle est également modérée. Il s'agit d'en limiter l'ampleur, de compenser le dépassement tout en limitant les risques associés aux techniques déployées. David Keith et Peter Irvine estiment ainsi que la géo-ingénierie solaire pourrait « compenser la moitié de l'augmentation de la température moyenne globale » seulement, ce qui « réduirait considérablement les risques globaux liés au changement climatique » tout en ne provoquant que de « faibles effets secondaires » [KEI, 2016, p. 549]. Contrairement aux perspectives de compensation totale des changements climatiques qui étaient encore envisagées dans les années 2000, la modification du bilan radiatif entre à présent dans une dynamique de compensation partielle et temporaire.

Les simulations menées dans le cadre du projet GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project), un projet permettant de confronter la réponse de différents modèles climatiques à une même expérience, traduisent, de manière éloquente, l'évolution du sens et de la fonction qui ont été donnés à la géo-ingénierie solaire au cours des dernières années. Son expérience la plus ancienne, G1, consiste à quadrupler, d'un seul coup, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ainsi qu'à compenser l'intégralité du forçage radiatif occasionné en appliquant une réduction de la constante solaire [KRA, 2011]. L'expérience G4, plus tardive, ne cherche déjà plus à compenser entièrement le réchauffement, mais à ramener la température moyenne globale aux valeurs de 1980 [KRA, 2011]. Enfin, l'expérience la plus récente, G6, réduit drastiquement ces ambitions, jusqu'à amorcer une réelle rupture : il s'agit, à présent, de ne déployer la modification du rayonnement solaire que pour stabiliser le réchauffement à +1,5°C [VIS, 2024]. La normalisation de la géo-ingénierie solaire est solidaire d'un processus de revue à la baisse de ses ambitions : elle doit être utilisée avec parcimonie et précaution, dans un portefeuille de solutions diversifiées.

Sous cette forme, la géo-ingénierie solaire n'est plus seulement défendue par ses promoteurs historiques, à l'instar de physiciens comme David Keith ou Michael MacCracken. L'on observe, dans des cercles scientifiques élargis, une occurrence de plus en plus forte de ce que l'on appelle le *buying time argument*, selon lequel il est de plus en plus probable que l'on ait besoin de déployer l'une de ses techniques temporairement, uniquement le temps que l'atténuation se mette en place [NEU, 2020]. Cet argument est par ailleurs défendu par des acteurs issus de sphères sociales de plus en plus diversifiées : c'est le cas de la géographe Holly Buck, sur le principe défavorable à la géo-ingénierie, mais considérant qu'un déploiement temporaire sera sans doute nécessaire à la sortie des énergies fossiles [BUC, 2019]. Un autre exemple peut être trouvé dans le collectif finlandais Operaatio Arktis, composé d'anciens membres du groupe d'Extinction Rebellion, qui considère que la modification du bilan radiatif est indispensable à la préservation des calottes glaciaires polaires. Son argument est le suivant : « La stratégie climatique actuelle a été inventée dans les années 1990. Aujourd'hui, les calottes glaciaires polaires s'effondrent. Une nouvelle stratégie est nécessaire. » [OPE, 2024]. Il ne s'agit pas seulement de mettre en avant l'urgence de la situation, mais aussi de mettre en avant la nécessité de « combiner » la modification du bilan radiatif « à la réduction des émissions et au captage du carbone » pour « garantir une société stable ». La circulation et la normalisation des scénarios de dépassement contribuent manifestement à la normalisation de la modification du bilan radiatif.

Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes penchés sur le paradigme de la compensation qui, dominant dans les arènes de négociations internationales sur le climat, ouvre la possibilité que des émissions

carbonées qui ne peuvent pas être évitées puissent être compensées. L'essor de ce paradigme de la compensation s'est fait conjointement à l'émergence d'une comptabilité carbone territorialisée, intégrant les puits de carbone naturels nationaux. Il s'est aussi fait conjointement à l'émergence de solutions technologiques pouvant compléter les efforts d'atténuation, et parfois s'y substituer : les CC(U)S, qui élargissent une première fois le spectre de la décarbonation – les émissions ne sont plus seulement réduites par un évitement des activités industrielles carbonées mais aussi par des dispositifs de capture en sortie de cheminée – et les CDR, qui l'élargissent une seconde fois puisqu'elles consistent à décarboner directement l'atmosphère. L'intégration de ces technologies dans les stratégies climatiques s'accompagne nécessairement de logiques de report de dettes, ce à deux égards : d'une part, elle témoigne d'une volonté de retarder une restructuration en profondeur de nos modes de consommation et de production, d'un retard qui pourra par la suite être compensé par une séquestration massive des émissions – en somme, nous pouvons continuer d'accumuler du carbone dans l'atmosphère car nous aurons bientôt les moyens de l'en retirer ; d'autre part, du fait de la faible maturité technologique des CC(U)S et des CDR, leur intégration dans les stratégies climatiques s'accompagne nécessairement d'un second report de dette, opérant cette fois la traduction d'une dette carbone en dette thermique – puisque nos technologies de séquestration ne sont pas encore matures, il nous faut emprunter une augmentation de la température globale, que nous pouvons compenser, cette fois, par des opérations de géo-ingénierie solaire. Aussi postulons nous que le paradigme de la compensation mentionné plus haut a participé de l'établissement d'un continuum idéologique liant l'atténuation aux CC(U)S, au CDR et à la modification du rayonnement solaire. Dans un contexte dans lequel les émissions ne sont plus strictement réduites, mais compensées – qu'il s'agisse d'une compensation carbone ou d'une compensation thermique – la perspective d'un dépassement des seuils fixés par l'Accord de Paris semble être banalisée, car appréhendée sous la forme d'une dette que l'on pourra rembourser *a posteriori*. Ce processus de banalisation touche également la modification du rayonnement solaire, puisque la dette carbone contractée dans l'attente de la pleine maturité technologique des CC(U)S et des CDR semble compromettre la faisabilité de la décarbonation sans recours à la modification du rayonnement solaire.

Bibliographie

- [ALJ, 2023] Al Jaber, A. (2023, 13 juillet). *Lettre aux parties*. <https://www.cop28.com/en/letter-to-parties>.
- [AND, 2016] Anderson, K. & Peters, G. (2016). The trouble with negative emissions. *Science*. 354, 6309, pp.182-183.
- [ASA, 2019] Asayama, S., & Hulme, M. (2019). Engineering climate debt: temperature overshoot and peak-shaving as risky subprime mortgage lending. *Climate Policy*, 19(8), 937–946. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1623165>
- [AYK, 2015] Aykut, S. C., & Dahan, A. (2015). *Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales*. Presses de Sciences Po.
- [BAS, 2019] Baskin, J. (2019). *Geoengineering, the Anthropocene and the End of Nature*. Palgrave Macmillan.
- [BEC, 2017] Beck, S., Mahony, M. (2017). The IPCC and the politics of anticipation. *Nature Climate Change* 7, pp.311-313.
- [BIE, 2022] Biermann, F. et al. (2022). Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIRE's Climate Change*. 13,3. <https://doi.org/10.1002/wcc.754>
- [BRI, 2024] Briday, R. (2024). Les développements poussifs des technologies de captage et stockage industriels du CO₂ (CCS). Acteurs et enjeux. In Langlais, A. & Lemoine-Schonne, M. *Construire le droit des ingénieries climatiques. Au croisement des enjeux climatiques et écosystémiques*, UGA éditions, collection Écotopiques, chapitre 2, pp. 119-145, <https://books.openedition.org/ugaeditions/33872?lang=fr>
- [BRI, 2024] Briday, R. (2020). Miser sur les technologies de captage du CO₂ industriel (CCUS)? Discutons-en! *SiloMag*, <https://silogora.org/miser-sur-les-technologies-de-captage-du-co2-industriel-ccus-discutons-en/>
- [BUC, 2019] Buck, H. (2019). *After geoengineering*. Verso Books.
- [BUD, 1974] Budyko, M. I., Gandin, L. S., Drozdov, O. A., Karol, I. L., & Pivovarova, Z. I. (1974). Perspectives on influences on the global environment. *Trans Acad Sci SSSR*.
- [BUD, 1977] Budyko, M. I. (1977). *Climatic changes. Special publication series*. American Geophysical Union.

[BUC, 2018] Buck HJ (2018). The politics of negative emissions technologies and decarbonization in rural communities. *Global Sustainability* 1, e2, pp.1–7.

[CEN, 2023] Center for international environmental law (CIEL). (2023, 9 décembre). *475 Carbon Capture Lobbyists at COP28 Exposes Fossil Fuels' Grip.* <https://www.ciel.org/news/475-carbon-capture-lobbyists-at-cop28-exposes-fossil-fuels-grip/>

[CLI, 2023] Climate overshoot commission. (2023). *Reducing the Risks of Climate Overshoot.*

[CRU, 2006] Crutzen, P.J. (2006). Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma?. *Climatic Change*, 77, pp. 211–220.

[DEG, 2024] De Guglielmo Weber, M. & Noyon, R. (2023). *Le grand retournement. Comment la géo-ingénierie s'inflitre dans les politiques climatiques.* Les Liens qui libèrent.

[DOO, 2017] Dooley, K., Gupta, A. (2017). Governing by expertise: the contested politics of (accounting for) land-based mitigation in a new climate agreement. *International Environmental Agreements*, 17, pp. 483–500.

[FAN, 2022] Fankhauser, S., Smith, S.M., Allen, M. et al. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change* 12, pp.15–21.

[GLO, 2022] Global CCS Institute (2022). *Global status of CCS.*

[INT, 2022] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.* Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

[INT, 2012] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). *IPCC Expert Meeting on Geoengineering Lima, Peru 20-22 June 2011 Meeting Report.*

[INT, 2005] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.* Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, & L. Meyer (Eds.)]. Cambridge University Press.

[INT, 2022] International Energy Agency. (2022). *Direct air capture: A key technology for net zero.*

[KEI, 2016] Keith, D. W., and P. J. Irvine (2016), Solargeoengineering could substantially reduce climate risks—A research hypothesis for the next decade, *Earth's Future*, 4, pp. 549–559.

[KRA, 2011] Kravitz, B., Robock, A., et al., (2011). The Geoengineering Model Inter-comparison Project (GeoMIP), *Atmospheric Science Letter*, 12.

[LAC, 19] Lackner, K., Ziock, H.-J., & Grimes, P. (1999, 1er février). *Carbon Dioxide Extraction from Air: Is It An Option?* Conference: 24th Annual Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems,

[LOV, 2006] Lövbrand, E., & Stripple, J. (2006). The Climate as Political Space: On the Territorialisation of the Global Carbon Cycle. *Review of International Studies*, 32,2, pp. 217–235.

[LOW, 2020] Low, S., & Boettcher, M. (2020). Delaying decarbonization: climate governmentality and sociotechnical strategies from Copenhagen to Paris. *Earth System Governance*. 5, 100073.

[MAC, 2009] MacCracken, M. (2009). On the possible use of geoengineering to moderate specific climate change impacts. *Environmental Research Letters*, 4, 4. DOI 10.1088/1748-9326/4/4/045107

[MAR, 1977] Marchetti, C. (1977). On geoengineering and the CO₂ problem. *Climatic Change*, 1, pp. 59–68. <https://doi.org/10.1007/BF00162777>

[MCK, 2024] McKinsey & Company. (2024, 24 janvier). *Global Energy Perspective 2023: CCUS outlook.* <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-ccus-outlook>

[NEU, 2020] Neuber, F. & Ott, K. (2020). The Buying Time Argument within the Solar Radiation Management Discourse. *Applied Sciences*, 10(13), 4637, <https://doi.org/10.3390/app10134637>

[OLD, 2022] Oldfield, J.D & Poberezhskaya, M. (2022). Soviet and Russian perspectives on geoengineering and climate management. *WIREs Climate Change*. pp.1-14.

[OPE, 2024] Operaatio Arktis, site web. Consulté le 14 septembre 2024 à l'adresse suivante : <https://www.operaatioarktis.fi/>

[ORG, 2023] Organisation météorologique mondiale. (2023). *Global Annual to Decadal Climate Update*

[REI, 2023] Reisinger, A. & Geden, O. (2023). Temporary overshoot: Origins, prospects, and a long path ahead. *One Earth*, 6, 12, pp. 1631-1637.

- [RIC, 2017] Ricke, K.L., Millar, R.J. & MacMartin, D.G. (2017). Constraints on global temperature target overshoot. *Scientific Reports* 7, 14743. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14503-9>
- [ROB, 2022] Robertson, B. & Mousavian, M. (2022, septembre). *The Carbon Capture Crux*. IEEFA.
- [ROY, 2011] Royal Society. (2011). *Solar radiation management: the governance of research*.
- [ROY, 2009] Royal Society. (2009). *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*.
- [STE, 2022] Stephens, J.C., Kashwan, P., McLaren, D. & Surprise, K. (2022). Towards dangerous US unilateralism on solar geoengineering. *Environmental Politics*, 32, 1, pp. 171-173,
- [TIL, 2016] Tilmes, S., Sanderson, B. M., & O'Neill, B. C. (2016). *Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario*. *Geophysical Research Letters*, 43, pp. 8222–8229.
- [VAN, 2022] Van Coppenolle H., Blondeel M., & Van de Graaf T. (2022); Reframing the climate debate: The origins and diffusion of net zero pledges, *Global Policy*, 14(1), pp. 48-60. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.13161>
- [VIS, 2024] Visioni, D., Robock , A.et al., (2024). G6-1.5 K-SAI: a New Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment integrating recent advances in solar radiation modification studies, *Geoscientific Model Development*, vol. 17, pp. 2583-2596. <https://gmd.copernicus.org/articles/17/2583/2024/>
- [WIL, 1998] Williams, R. (1998). Fuel decarbonisation for fuel cell applications and sequestration of the separated CO₂. In Ayres, R.U., Weaver, P.M., *Eco-restructuring Implications for Sustainable Development*, UN University.