



Carnegie Climate
Governance Initiative

An initiative of
CARNEGIE
COUNCIL for Ethics in
International Affairs

RÉSUMÉ DES PREUVES Gouvernance de la modification du rayonnement solaire

21 janvier 2020

Sommaire

Cette note résume les dernières données probantes sur le blanchiment des nuages marins (MCB pour Marine Cloud Brightening) et l'injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI pour Stratospheric Aerosol Injection), deux types importants de technologies d'intervention sur le climat par la modification du rayonnement solaire. Elle décrit les techniques, examine leur état de préparation technique, les recherches actuelles, les cadres de gouvernance applicables et prend en compte d'autres aspects sociopolitiques. Elle fournit une analyse des types de questions et préoccupations géopolitiques, notamment la sécurité, que ces technologies peuvent soulever et scrute la façon dont la gouvernance actuelle permet, ou non, de les résoudre. Elle donne également un aperçu des principaux instruments de gouvernance existants qui sont pertinents pour leur gouvernance.

À propos de C2G

La Carnegie Climate Governance Initiative (C2G) ne se positionne pas sur la question de savoir si la SAI ou le MCB doivent faire l'objet de recherches, de tests ou de déploiement. Elle cherche à sensibiliser les décideurs politiques et à leur fournir des informations impartiales sur les technologies de modification du climat proposées, et à entamer le débat sur leur future gouvernance. L'initiative C2G a préparé plusieurs autres mémoires qui passent en revue diverses technologies d'élimination du dioxyde de carbone (EDC) et de modification du rayonnement solaire (MRS), ainsi que les questions connexes. Vous pouvez consulter ces documents [sur notre site web](#).



Table des matières

Introduction	3
SECTION I : Blanchiment des nuages marins et Injection d'aerosols dans la stratosphère	4
Introduction	4
Blanchiment des nuages marins (MCB)	5
Injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI)	8
SECTION II : MRS, géopolitique et sécurité	14
Introduction	14
Comment le déploiement de la MRS pourrait-il évoluer et pourquoi pourrait-il créer des tensions ?	14
Répercussions asymétriques de la MRS	15
L'absence de pouvoir pour mettre un terme au déploiement	16
Déploiement unilatéral de la MRS	16
LA MRS ou le problème du « cavalier seul »	17
Contre-déploiement	17
Militarisation et intérêt militaire	18
Conflit et guerre	18
Choc terminal	19
Un positionnement géopolitique	19
Politique de l'État-nation	19
Aléa moral et diminution de la coopération internationale	20
Conseil de sécurité des Nations Unies	20
Secrétaire général des Nations Unies	21
Acteurs non étatiques	21
SECTION III: Instruments de gouvernance	22
Introduction	22
Convention sur la diversité biologique (CDB)	22
Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone et Protocole de Montréal de 1987	23
Convention sur la modification de l'environnement (ENMOD)	23
Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD)	23
Convention de Londres de 1972 et Protocole de Londres de 1996 (LC/LP)	24
Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM)	24
Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)	25
Accord de Paris de 2015	25
Gouvernance de la recherche	26
Autres forums ou processus	27
Conclusions	27
Références	28

Introduction

Quatre ans après l'Accord de Paris sur le changement climatique, on reconnaît de plus en plus que, faute d'une accélération rapide de l'action, il ne sera pas possible de respecter la limitation de la hausse de la température moyenne mondiale à 1,5-2 degrés Celsius (°C) par la seule réduction des émissions ou les pratiques d'élimination du carbone qui existent déjà. Les scientifiques ont commencé à examiner l'utilisation supplémentaire d'interventions à grande échelle pour limiter les impacts climatiques, notamment les techniques d'élimination du dioxyde de carbone (EDC) et de modification du rayonnement solaire (MRS) (pour passer en revue les approches potentielles, veuillez consulter Zhang et al., [2015]). Il existe de nombreuses méthodes de MRS proposées et un grand nombre de différences considérables entre elles. Le présent résumé porte sur les deux approches de la MRS qui sont considérées comme ayant le plus grand potentiel de refroidissement : le blanchiment des nuages marins (MCB) et l'injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI). Parmi les autres technologies de MRS proposées, mentionnons par exemple l'amincissement des cirrus et la modification de l'albédo de la surface.

L'objectif qui se profile derrière les technologies de MRS est d'augmenter la réflectivité, appelée « albédo », de la surface de la Terre ou de l'atmosphère. Une augmentation de la quantité de lumière solaire, nommée « rayonnement solaire », retournant dans l'espace modifierait l'équilibre du rayonnement de la Terre, fonctionnant comme une ombre. De ce fait, elle produirait un refroidissement et contrerait certains des effets du réchauffement des gaz à effet de serre.

Un doublement des concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère par rapport aux niveaux de l'ère préindustrielle à 550 parties par million dans l'air ambiant devrait créer un réchauffement mondial de l'ordre de 3°C (GIEC, 2007). Les estimations indiquent que si la MRS était déployée, il lui faudrait réfléchir 2 % de la lumière solaire dans l'espace pour contrer cette valeur du réchauffement (Shepherd, 2009). Toutefois, ni la SAI ni le MCB ne sauraient remplacer la réduction des émissions de gaz à effet de serre permettant d'atteindre la neutralité carbone, puis un bilan carbone négatif, car ces méthodes ne s'attaquent pas à la cause sous-jacente du réchauffement mondial, à savoir l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (Robock, 2018). Ces méthodes n'auraient que très peu d'effets sur l'acidification des océans. En outre, compte tenu de la complexité du système climatique, des conséquences imprévues du déploiement de l'une ou l'autre de ces technologies peuvent survenir si ces dernières sont déployées à des échelles susceptibles de modifier le climat (Russell et al., 2012, Robock, 2018).

Il existe un intérêt croissant pour le potentiel de la MRS pour refroidir le climat mondial ou pour réduire temporairement la quantité et la durée d'un dépassement des objectifs de température de l'Accord de Paris (Asayama, 2019). Il s'agirait d'une mesure à court terme, utilisée seulement dans le cas où la réduction et l'élimination des émissions de CO₂ n'auraient pas eu lieu assez rapidement. Un tel déploiement prendrait fin une fois que les actions de réduction ou d'élimination des GES excédentaires auraient réussi. La MRS demeure toutefois un défi complexe sur les plans technique, sociopolitique et de gouvernance. Par exemple, le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur le réchauffement mondial de 1,5°C (2018) mentionne : « Bien que certaines mesures de MRS puissent être théoriquement efficaces pour réduire un dépassement, elles sont confrontées à de grandes incertitudes et à des lacunes en termes de connaissances ainsi qu'à des risques importants, à des contraintes institutionnelles et sociales au déploiement liées à la gouvernance, à l'éthique et aux impacts sur le développement durable. Elles n'atténuent pas non plus l'acidification des océans ».


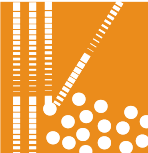
Ce résumé n'est pas une évaluation complète et détaillée de la MRS, ni des deux techniques exposées dans le présent document : la SAI et le MCB. Il fournit plutôt une description et une brève analyse de l'état de préparation technologique, du panorama de la recherche, ainsi que des questions de gouvernance, de géopolitique, de sécurité et de sociopolitique qui y sont associées. Dans la première section, les technologies sont décrites tour à tour et la deuxième section examine les questions et préoccupations géopolitiques qui peuvent surgir. Les outils et les instruments de gouvernance qui peuvent s'appliquer sont passés en revue dans la troisième section. Le GIEC a été chargé de rassembler les connaissances mondiales sur les techniques de MRS et sur leur manière d'influer sur les profils d'évolution dans son sixième rapport d'évaluation (AR6), qui pourrait fournir une analyse plus détaillée en temps voulu.

SECTION I : Blanchiment des nuages marins et Injection d'aérosols dans la stratosphère

Introduction

Cette section présente les deux principales approches de la MRS, en décrivant brièvement leur état de préparation technique, la recherche actuelle, les cadres de gouvernance applicable et d'autres aspects sociopolitiques. À titre d'information, C2G utilise la définition de la gouvernance du GIEC : « Un concept inclusif qui englobe l'ensemble des moyens permettant de décider, de gérer, de mettre en œuvre et de suivre les politiques et les mesures. Alors que le gouvernement se rapporte strictement à l'État-nation, le concept plus large de gouvernance recouvre les contributions des divers niveaux de gouvernement (mondial, international, régional et local), ainsi que le rôle du secteur privé, des acteurs non gouvernementaux et de la société civile, en vue de répondre aux diverses sortes de questions auxquelles fait face la communauté internationale » (GIEC, 2018).

Le tableau 1 donne un aperçu des deux technologies, de leur état de préparation technologique et de certains des défis en matière de gouvernance.

Technologie proposée	État de préparation technologique	Défis spécifiques en matière de gouvernance
 <p>Blanchiment des nuages marins (MCB)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensemencement et blanchiment des nuages au-dessus des surfaces océaniques, en injectant probablement des cristaux de sel marin, pour réfléchir le rayonnement solaire vers l'espace. • Cela pourrait se traduire par un refroidissement rapide à l'échelle régionale directement après le déploiement. • Le coût annuel estimé par unité de forçage radiatif ($W\ m^2$) est de 200 millions \$¹ (Shepherd, 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie encore théorique, basée sur des analogues naturels et des modèles informatiques. • Certain potentiel pour des expériences à petite échelle menées en plein air en 2020. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si elle est entreprise au sein d'une zone économique exclusive (ZEE), la gouvernance concernerait uniquement le pays. Dans les eaux internationales, la réglementation serait probablement couverte par le droit international coutumier. • Le sel marin, dont l'utilisation est envisagée, pourrait, au bout d'un certain temps, être considéré comme un polluant et la technique serait alors soumise au Protocole de Londres (LP). • Des variations régionales des répercussions (par exemple, température et hydrologie). • L'acceptabilité sociale demeure incertaine.
 <p>Injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des aérosols réfléchissants seraient déployés dans la stratosphère. • La modélisation laisse entendre qu'un refroidissement planétaire est possible en l'espace d'un an. • Le coût annuel de la réduction du forçage radiatif de $1\ W\ m^2$ est estimé à 5 milliards \$ par an¹ (Stavins & Stowe, 2019). Il est suggéré que les effets d'un doublement des concentrations de dioxyde de carbone pourraient être contrebalancés à hauteur de 25 à 50 milliards \$ par an. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a qu'une compréhension théorique de la technique. • Les mécanismes de prestation ne sont pas encore développés. • La détection de l'attribution pose problème. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les mesures de gouvernance peuvent englober le droit étatique et coutumier, la Convention sur la diversité biologique (CDB), la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et les instruments modifiés qui pourraient inclure des instruments sur la pollution atmosphérique, la Convention de Vienne et d'autres. • Les preuves suggèrent que des problèmes géopolitiques et de sécurité peuvent surgir et que la MRS peut fortement entraver les institutions et la coopération internationales. Possibles aléa moral et autres formes de dissuasion de l'atténuation.

¹ Un doublement du CO₂ par rapport à l'ère préindustrielle créerait un forçage radiatif de 3,7 $W\ m^2$ (Salter 2008). -1 $W\ m^2$ serait l'équivalent d'une réduction de 27 % de l'effet de réchauffement provoqué par un doublement des concentrations de CO₂.



Blanchiment des nuages marins (MCB)

Le principe

Le principe fondamental sur lequel s'appuie le MCB est le même que celui de la SAI, car les deux mesures chercheraient à augmenter l'albédo. Dans le cas du MCB, il y aurait une ingénierie pour que les nuages situés au-dessus des océans soient plus lumineux, ce qui augmenterait la quantité de lumière solaire renvoyée vers l'espace et produirait de ce fait un refroidissement. Comme dans le cas de la SAI, le MCB ne s'attaquerait pas à la cause du réchauffement, à savoir les concentrations de GES; la technique pourrait également soulever des questions d'aléa moral, c'est-à-dire que la MRS s'accompagne du risque de miner éventuellement les mesures d'incitation individuelles, collectives ou politiques à la mise en œuvre de mesures d'atténuation (Lin, 2012).

La technique et son état de préparation

Dans les parties relativement exemptes de poussière de l'atmosphère marine, il a été démontré que l'augmentation du nombre de noyaux de condensation des nuages (particules autour desquelles gravitent les gouttelettes d'eau pour former des nuages) renforce très nettement l'albédo des nuages et peut également accroître la durée de vie des nuages (Albrecht, 1989), comme le démontre sur son site le projet E-PEACE (Russell et al., 2013). Une intervention de MCB viserait à augmenter le nombre de noyaux de condensation des nuages en pulvérisant de fines particules - probablement de l'eau salée - dans les nuages.

Cette technique pourrait avoir un effet de très grande ampleur. Par exemple, un doublement de la concentration naturelle de gouttelettes de stratus marins au large des côtes occidentales de l'Amérique du Nord et du Sud et de la côte ouest de l'Afrique compenserait à peu près un doublement du CO₂ atmosphérique (Latham et al., 2009). Toutefois, la possibilité de faire passer le MCB à l'échelle régionale reste floue.

Les mécanismes de répartition pourraient ne pas comporter de complexité technique. Il a par exemple été suggéré que des navires ou des avions à énergie solaire pourraient apporter régulièrement les particules requises aux endroits précis où elles sont nécessaires (Wood et al., 2018). Cependant, la conception de buses de pulvérisation permettant d'acheminer constamment des particules de la bonne taille à la bonne altitude reste un défi pour la recherche.

La modélisation indique que le MCB pourrait être déployé dans la région de l'Arctique et produire ainsi un effet de refroidissement rapide (Parkes, 2012), ce qui ralentirait la fonte des glaces et refroidirait la Terre à plus grande échelle dans les délais impartis (Nalam et al., 2017). Cependant, un tel déploiement pourrait aussi provoquer un déplacement de chaleur des régions du sud de l'Arctique vers la région arctique, ce qui apporterait de l'air plus chaud dans la région, contrariant ainsi certains des effets directs du déploiement du MCB.

Comme pour l'amélioration de l'albédo, tel que l'éclaircissement des surfaces terrestres, le MCB pourrait aussi être déployé à l'échelle locale, ce qui garantirait des avantages au niveau régional. De telles interventions font actuellement l'objet de recherches au Sydney Institute of Marine Science (Ellis-Jones, 2017), comme celles financées par le gouvernement central australien et le gouvernement de l'État du Queensland qui examinent l'utilisation du MCB dans le cadre de la protection de la Grande Barrière de corail (BRF, 2018).

Risques potentiels et principales inconnues

Bien que les études de modélisation de la MRS permettent aux scientifiques de simuler - et d'expérimenter - d'autres conditions, scénarios et profils d'évolution d'une façon tout simplement impossible sur le plan empirique, elles obstruent également certaines dimensions qui pourraient être pertinentes, en particulier pour la gouvernance et la géopolitique. McLaren (2018) souligne les lacunes (en particulier pour ce qui est de la SAI) des « hypothèses souvent implicites de la documentation concernant l'efficacité, la précision et la contrôlabilité, ses mesures et méthodes d'agrégation, et son utilisation d'un raisonnement contrefactuel excessif sur le changement climatique à un rythme soutenu » (McLaren, 2018). Le premier élément de McLaren pourrait conduire à une sous-estimation des risques d'échec, de l'aléa moral et des effets d'une répartition incertaine. Le deuxième minimise l'importance de la vulnérabilité potentielle localisée et variée et des inégalités existantes qui pourraient être exacerbées. Et le dernier porte l'attention sur les « moyens technologiques d'éviter les

extrêmes des impacts climatiques et de s'éloigner des obligations morales découlant des émissions historiques et des autres injustices des systèmes énergétiques » (ibid.). Les principales conclusions de la modélisation de la façon dont la MRS peut influencer sur les risques climatiques sont donc conditionnées à l'omission de ces facteurs.

Pour ce qui est des variables incluses dans les travaux de modélisation, l'un des principaux défis techniques qui restent à relever est de déterminer quelles particules utiliser et comment en produire constamment une quantité suffisante d'un diamètre et d'une quantité adéquats en mer. La matière de base pouvant convenir le plus probablement est l'eau de mer, une matière qui, contrairement aux matériaux candidats pour la SAI (voir plus bas), n'aurait pas d'effets plus larges sur l'environnement ou la santé.

On ne sait pas comment le climat réagirait au forçage radiatif à grande échelle que le MCB pourrait avoir la capacité de fournir. Les modèles climatiques suggèrent que le MCB pourrait être très efficace pour réduire le réchauffement mondial (Kravitz et al., 2014). Toutefois, les risques pourraient vraisemblablement comporter des changements dans le transport dynamique de l'humidité et de l'air, ce qui affecterait les systèmes météorologiques et d'importants phénomènes climatiques locaux tels que les pluies de mousson et le fonctionnement des écosystèmes (Park et al., 2019, Keith et al., 2016, Mercado et al., 2009). De telles perturbations pourraient entraîner des problèmes tels que l'expansion des terres arides ou des inondations, la dégradation de l'environnement et des problèmes de sécurité alimentaire dans les États ou régions touchés.

Si un déploiement du MCB qui avait refroidi la planète était interrompu en un court laps de temps, il pourrait en découler une « remontée » rapide et important des températures, pendant que le climat se stabiliserait à nouveau (Kosgui, 2011). Cette augmentation rapide de la température, connue sous le nom de « choc terminal », pourrait faire monter les températures au-delà de celles qui auraient été enregistrées si le MCB n'avait pas été entrepris et elle pourrait être préjudiciable (Robock, 2018). Un tel choc terminal peut avoir des répercussions environnementales, économiques et sociales à grande échelle (Matthews et Caldeira, 2007). Toutefois, Parker et Irvine (2018) ont argumenté que, dans le cas de la SAI, qui est également en mesure de produire un choc terminal, il n'existe pas de scénarios évidents dans lesquels un système bien gouverné pourrait autoriser une interruption rapide. Cela sous-entend qu'une compréhension des conséquences d'une telle interruption pourrait être suffisante pour garantir la résilience du système de gouvernance mondiale. Ce point est examiné plus en détail dans la section II.

Activités de recherche actuelles

En décembre 2019, le gouvernement des États-Unis a, pour la première fois, autorisé un financement de 4 millions de dollars à l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) pour la recherche sur les « interventions solaires sur le climat », comprenant notamment les « propositions d'injection de matières pour influencer sur le climat » (Temple, 2019). Le champ d'application de cet investissement englobe le MCB et la SAI.

Dans le cadre d'une action connexe, une proposition de loi qui permettrait à la NOAA de fonder un programme officiel de recherche sur les technologies influant sur le climat a été présentée devant le Congrès des États-Unis par le membre californien du Congrès McNERNEY, le 19 décembre 2019. Cette loi, nommée « Atmospheric Climate Intervention Research Act » - H.R.5519 (ACIRA, 2019) vise à « améliorer les capacités de mesure et d'évaluation pour comprendre les interventions atmosphériques proposées dans le cadre du climat de la Terre, notamment et en premier lieu, les effets des interventions proposées dans la stratosphère et dans les processus d'aérosols dans les nuages » (ACIRA, 2019). Ce projet de loi vise à améliorer la connaissance de la chimie de la stratosphère et des effets et risques potentiels de la SAI et du MCB. Il faut souligner que cette loi octroierait également à la NOAA le pouvoir de surveillance nécessaire pour examiner les expériences de SAI et de MCB proposées par d'autres groupes de recherche aux États-Unis et pour en rendre compte.

Aucun programme de travail sur le terrain comprenant un déploiement à petite échelle n'est mené actuellement. Toutefois, le Marine Cloud Brightening Project (projet de blanchiment des nuages marins), basé à l'université de Washington, mène des activités de recherche dans ce domaine et a décrit un plan de recherche (Wood, 2018) pour aider à relever certains des défis restants, notamment : des expériences sur le terrain de MCB pour mieux comprendre les interactions nuages-aérosols et l'effet du MCB sur la physique des nuages ; la manière de générer, fournir et observer les particules d'une façon inoffensive sur le plan écologique ; et l'étude des conséquences régionales sur le climat. À l'échelle locale, des interventions font actuellement l'objet de recherches et d'un financement du gouvernement australien (BRF, 2018), dans le but de réduire le réchauffement saisonnier, qui provoque le blanchissement des coraux, sur certaines parties de la Grande Barrière de corail. Cette mesure pourrait bénéficier à l'industrie touristique liée à la Grande Barrière.

Considérations sociopolitiques

Il n'y a, ni en réalité ni en théorie, de marché pour mener des actions en vue du déploiement. Il n'y a actuellement pas d'infrastructures (véhicules de déploiement) pour ce faire. Les perceptions du public et les réactions probables au MCB sont incertaines, bien que des recherches menées au Royaume-Uni laissent entendre qu'une perception de la contrôlabilité du MCB pourrait réduire les préoccupations des citoyens quant à la gouvernance de la technique (Bellamy et al., 2017). Compte tenu des enjeux potentiels, ainsi que de la valeur reconnue de la participation du public à l'évolution technologique, des appels ont été lancés pour examiner les perceptions du public à l'égard du MCB sur la Grande Barrière de corail (McDonald et al., 2019).

Gouvernance

Le MCB a besoin d'une gouvernance, non seulement parce qu'une décision de déploiement reviendrait à une décision intentionnelle d'exercer une influence sur le climat de la Terre, et donc sur tous ses habitants, mais aussi parce qu'elle pourrait affecter d'autres systèmes tels que les océans, la météo, l'agriculture, les cycles hydrologiques régionaux et la productivité biologique (Shepherd, 2009), ce qui aurait une répercussion, tant positive que négative, et polymorphe, sur les États et les régions. Le MCB serait donc susceptible de générer des tensions géopolitiques et des défis de gouvernance liés à la sécurité (voir la section II pour l'exposé des questions géopolitiques et de sécurité soulevées par le MCB et la SAI). Par ailleurs, la possibilité d'un choc terminal peut soulever d'autres questions de gouvernance liées à la prise de décision, à la surveillance et à la validation (Kosgui, 2011). Tous ces effets sont liés à des questions de gouvernance de la recherche et du passage de la recherche aux essais sur le terrain et au déploiement (SRMGI selon l'anglais, 2011, Parker, 2014).

En partant du principe que des embruns sont utilisés dans le cadre du déploiement, les responsabilités au titre de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM), de la Convention de Londres et du Protocole de Londres (LC/LP) en matière de protection contre la pollution du milieu marin n'entraveraient pas le déploiement, à moins que, tel que le mentionne la section 24 d'un rapport du Groupe mixte d'experts chargé d'étudier les aspects scientifiques de la protection du milieu marin (GESAMP, 2018), le dépôt de particules de sel à la surface de l'océan ne soit interprété comme le dépôt de « déchets ou autres matières » au titre du Protocole de Londres. Sinon, les pays seraient libres en général de mener des opérations de MCB en haute mer, à condition que cela se fasse en « tenant dûment compte » des intérêts des autres États. Toutefois, si d'autres particules étaient utilisées, les Conventions et le Protocole pourraient devenir pertinents pour ceux qui cherchent à la fois à effectuer un travail sur le terrain et à déployer des actions à grande échelle. La surveillance des effets du déploiement se teinterait de connotations de gouvernance et la question de savoir comment surveiller le MCB (à la fois le déploiement et ses effets) n'est pas résolue.



Injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI)

Le principe

La SAI vise à abaisser la température mondiale moyenne en augmentant la quantité de particules d'aérosols réfléchissantes dans la basse stratosphère. Un aérosol est un ensemble de fines particules solides ou de gouttelettes liquides, en suspension dans l'air (ou dans un autre gaz). Parmi les exemples d'aérosols naturels, citons le brouillard et la poussière. Des preuves de l'effet de ces particules existent dans le milieu naturel. Par exemple, en 1991, le mont Pinatubo, un volcan des Philippines, est entré en éruption et a ainsi rejeté dans la stratosphère près de 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre (SO₂). Les particules de sulfate émanant du Pinatubo ont augmenté l'albédo mondial, en réfléchissant suffisamment d'énergie solaire dans l'espace pour refroidir le climat planétaire de 0,5 °C en moyenne au cours des deux années suivantes, à la suite desquelles les températures sont revenues à celles qui correspondent aux concentrations actuelles de GES.

La SAI consisterait à déployer des aérosols dans la stratosphère située entre 7 et 15 kilomètres au-dessus du niveau de la mer (Labitzke et Van Loon, 2012). La stratosphère est une zone relativement stable dans l'atmosphère, où il y a moins de mélange vertical qu'horizontal, ce qui signifie qu'une particule d'aérosol pourrait rester dans la stratosphère et y refléter le rayonnement solaire pendant une période mesurée en années (Keith, 2013). Si l'injection devait se produire dans la troposphère (la basse atmosphère), les particules seraient rapidement attrapées dans les turbulences de l'air et retomberaient au niveau du sol en quelques semaines. On s'attend à ce que la SAI puisse avoir des effets de refroidissement presque immédiats et directs et il est probable qu'elle soit en mesure d'apporter un refroidissement à l'échelle planétaire en l'espace d'un an (Keith, 2013).

La technique et son état de préparation

Les mécanismes de distribution des aérosols ne sont pas encore résolus, bien que la distribution par avion doit être la méthode la plus pratique et la plus économique (Robock et al., 2009, Keith, 2013, Stilgoe, 2015). Puisque la capacité de refroidissement des aérosols stratosphériques semble augmenter avec l'altitude (Krishnamohan et al., 2019), les avions devraient, pour être pleinement efficaces, voler à près de 20 000 mètres d'altitude et être équipés d'un kit de pulvérisation pour libérer les particules (Keith, 2013). Des buses permettant d'éjecter des aérosols de la taille souhaitée sont possibles, mais elles n'ont pas encore été mises au point ou testées (voir l'activité de recherche plus bas). Bien qu'ils soient en mesure de voler à 20 000 mètres d'altitude, les avions ne sont pas capables, à l'heure actuelle, de voler à cette hauteur avec une cargaison lourde pendant de longues périodes (Smith & Wagner 2018).

Deux facteurs clés suscitent l'intérêt pour la SAI : la rapidité avec laquelle elle peut prendre effet, couplée à la possible très grande efficacité du refroidissement et au faible coût direct de son déploiement. La SAI pourrait en théorie exercer un très grand pouvoir sur le forçage climatique du carbone d'origine anthropique. Il semblerait que 1 kg de soufre situé dans la stratosphère puisse compenser l'effet de réchauffement dû à plusieurs centaines de milliers de kilogrammes de CO₂. Keith (2013) a calculé que le forçage radiatif supplémentaire des 240 milliards de tonnes de carbone libérées par l'activité humaine depuis le début de l'ère industrielle pourrait être réduit de moitié grâce à une injection annuelle d'un million de tonnes d'aérosols. Si une flotte de 20 avions était déployée, il est sous-entendu qu'ils pourraient fournir suffisamment de forçage radiatif pour produire un refroidissement climatique détectable (Keith, 2013), et ce malgré le fait que les particules, qui tomberaient de la stratosphère au fil du temps (les estimations indiquent un ordre de trois ans), devraient être continuellement remplacées afin de maintenir le niveau de refroidissement. Les effets à plus grande échelle demanderaient que les avions offrent des solutions plus complexes, mais celles-ci peuvent être trouvées en adaptant la technologie aéronautique actuelle. Puisque seules des petites quantités de matière peuvent être nécessaires pour créer un effet détectable, il existe des préoccupations quant à la gouvernance de l'élargissement de tout essai futur sur le terrain, qu'il s'agisse de projets à petite échelle ou de recherches susceptibles de modifier le climat. Cette question est examinée plus en détail dans la section sur la gouvernance de la recherche ci-dessous.

La relative facilité théorique de la mise en œuvre, à laquelle s'ajoute l'efficacité radiative des aérosols, sous-entend que les coûts directs de la SAI pourraient être faibles, par rapport à la réduction des émissions (Brahic,

2009). Les évaluations indiquent que la SAI pourrait être réalisée en utilisant des avions à un coût inférieur à 10 milliards \$ par an pour 2 W m^{-2} (Stavins & Stowe, 2019). À titre de comparaison, un doublement de la concentration de CO_2 par rapport à sa valeur de l'ère préindustrielle à 550 parties par million de l'air ambiant (ppm) donnerait un forçage radiatif d'environ $3,7 \text{ W m}^{-2}$ et un réchauffement planétaire à l'équilibre estimé à près de $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ (oscillant entre $2,0^\circ\text{C}$ et $4,5^\circ\text{C}$) (IPCC, 2007 – acronyme anglais du GIEC).

Une étude de la Royal Society britannique a estimé que les coûts de déploiement de la SAI pourraient être de l'ordre de 1 000 fois moins élevés que ceux de certaines autres technologies de modification du climat (Shepherd, 2009). Toutefois, MacKerron (2014) a attiré l'attention sur l'importance des coûts économiques indirects par rapport aux estimations des coûts directs – en traçant un parallèle entre la SAI et l'industrie nucléaire qui devait initialement fournir une énergie « trop bon marché pour être mesurée » (Strauss, 1954), mais dont le maintien requiert désormais des subventions publiques. De nombreuses estimations des coûts de la SAI excluent, par exemple, les coûts indirects tels que les programmes d'indemnisation des « perdants » ou les coûts découlant des frictions sociales ou internationales liées à la MRS (voir plus bas). Les évaluations qui comprennent des estimations des coûts plus complètes, indiquent qu'il serait possible de réduire de moitié le taux de réchauffement (en réduisant le forçage radiatif de $-0,25 \text{ W m}^{-2}$) à un coût de 2,25 milliards \$ par an, à la suite d'un investissement préalable de 3,5 milliards \$ dans l'infrastructure – y compris la recherche et la conception des avions (Smith et Wagner, 2018).

Risques potentiels et principales inconnues

Le choix des particules n'est pas résolu. La taille des particules est importante car l'aérosol doit être le plus « réfléchissant » qui soit et rester in situ et stable le plus longtemps possible (Rasch et al., 2008). Plus les particules sont grosses (plus de deux dixièmes de micron), moins elles sont efficaces pour diffuser la lumière, pour une masse déployée donnée (Keith, 2013). Par ailleurs, les grandes particules se condensent, coagulent et augmentent de taille plus rapidement que les petites particules et elles tomberaient donc de la stratosphère plus vite que les petites particules.

L'introduction de sulfates, l'une des nombreuses particules candidates, ne créerait pas un changement unique dans la chimie atmosphérique, car les sulfates sont continuellement introduits naturellement dans l'atmosphère. Par exemple, la poussière météorique, les éjectas volcaniques et les émissions de sources marines, terrestres, chimiques et industrielles contiennent toutes des sulfates (Keith, 2013). L'interaction des sulfates dans l'atmosphère se produit déjà et a fait l'objet de recherches. On sait par exemple que les émissions sulfuriques provenant de la navigation maritime ont un effet refroidissant et, selon Eyring et al., (2010), les températures moyennes mondiales pourraient être $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ plus basses de ce qu'elles auraient été autrement. Ces connaissances jouent un rôle important dans l'élaboration du cas du choix des sulfates par rapport aux autres particules (Shepherd, 2009, Stiggoe, 2015).

Le comportement et les interactions dans l'atmosphère d'autres aérosols pouvant être utilisés pour la SAI sont compris de façon moins détaillée. L'impact de l'oxyde d'aluminium (alumine) sur la stratosphère est en partie compris à la suite d'études de la NASA motivées par des intérêts sur la façon dont le panache de la fusée de la navette spatiale américaine, qui comprenait des quantités d'alumine, aurait pu avoir une incidence sur l'ozone (Ross et Sheaffer, 2014). Les oxydes d'aluminium sont courants dans les poussières minérales naturelles, ce qui constitue une donnée précieuse pour les recherches futures sur leurs impacts (Lawrence et Neff, 2009). Il existe en outre un ensemble de connaissances plus large sur l'alumine, grâce à l'utilisation de celle-ci comme matériau industriel (Weisenstein et al., 2015). Il existe une base de preuves moins pointues pour le diamant, un matériau suggéré par Keith et al. (2016) en vue de la SAI, bien que certains faits corroborent que les nanoparticules de diamant ne sont pas toxiques pour les systèmes biologiques (Schrand et al., 2007).

La possibilité que la SAI entraîne une perte d'ozone est considérée comme un risque important du déploiement de la SAI (Morton, 2015, Robock, 2018). L'ozone protège toutes les formes de vie sur Terre contre les rayons ultraviolets nocifs (GES-DISC, 2016). Les changements des aérosols dans la stratosphère pourraient influencer sur la chimie de celle-ci et réduire l'abondance de l'ozone dans la stratosphère (Tilmes et Mills, 2014). Cet effet a été mesuré après l'éruption du mont Pinatubo en 1991 (McCormick, 1995), un exemple qui illustre la façon dont les connaissances actuelles peuvent éclairer la compréhension de la SAI. Alors que la couche d'ozone se remet encore des effets des chlorofluorocarbures (CFC) qui l'avaient appauvrie, des études sous-entendent que toute nouvelle pression sur la colonne d'ozone totale, en particulier aux hautes et moyennes latitudes, avant 2050, entraînerait une augmentation considérable de la lumière ultraviolette à la surface de la Terre (Heckendorn et al., 2009) et que la récupération suite au trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique pourrait être retardé d'au moins 40 ans (Tilmes et Mills, 2014).

Certaines particules envisagées par la SAI seraient susceptibles de renforcer la couche d'ozone. L'alumine est un aérosol solide qui, en soi, n'augmenterait pas le volume de l'acide sulfurique aqueux qui entraîne les réactions dans les sulfates à l'origine de la perte d'ozone (Keith, 2013). Toutefois, elles s'accompagnent de nouveaux risques, notamment celui d'agir comme catalyseur causant des réactions pouvant avoir une incidence sur l'ozone (Keith et al., 2016).

Certains aérosols envisagés pourraient être nocifs lorsqu'ils tombent de la stratosphère dans la troposphère et forment des pluies acides ou de la pollution atmosphérique, ce qui a des répercussions sur l'environnement terrestre (Keith, 2013). Le nombre de décès ou de maladies qui en résulterait reste flou, car les « retombées » seraient réparties dans le monde entier, y compris dans les régions éloignées et non peuplées. Keith (2013) soutient pourtant que le taux de mortalité serait nettement inférieur au nombre de décès liés au changement climatique d'origine anthropique, qui seraient évités grâce au refroidissement apporté par la SAI.

On ne connaît pas précisément la façon dont le climat réagirait au forçage radiatif à grande échelle que la SAI pourrait être en mesure d'apporter. Les modèles climatiques suggèrent qu'un composé idéal théorique de la SAI pourrait être très efficace pour réduire le réchauffement mondial simulé par les modèles (Kravitz et al., 2014). Malgré tout, les risques pourraient vraisemblablement comporter des changements accélérés dans le transport dynamique de l'humidité et de l'air, ayant une répercussion sur les systèmes météorologiques et d'importants phénomènes climatiques locaux, comme par exemple les pluies de mousson et le fonctionnement des écosystèmes (Keith et al., 2016, Mercado et al., 2009). Simpson et al. (2019) laissent par exemple entendre si la SAI était déployée dans un environnement où les GES sont élevés, il pourrait y avoir un assèchement important en Amazonie, dans certaines régions d'Afrique et d'Inde, ce qui pourrait avoir des conséquences sérieuses sur les écosystèmes et la productivité des cultures. Dans un environnement où les GES sont élevés, la SAI pourrait également modifier le cycle saisonnier dans les régions situées dans les hautes latitudes ; cela entraînerait des hivers plus chauds et des étés plus frais (Jiang et al., 2019), ce qui pourrait avoir des répercussions importantes sur l'environnement et d'autres aspects.

Comme c'est le cas avec le MCB, il existe un possible choc terminal associé à la SAI. Bien que le taux de changement du forçage radiatif créé par l'arrêt de la SAI doive être plus lent qu'avec le MCB, car les aérosols resteraient in situ plus longtemps que dans les nuages éclaircis, il est possible que le taux de choc terminal ne soit pas très différent en raison du temps que prend le réchauffement du climat mondial.

Si elle est déployée à une échelle assez grande, la SAI pourrait modifier l'apparence du ciel. Le bleu caractéristique d'une journée sans nuages pourrait ne plus être visible. Au lieu de cela, le ciel pourrait sembler couvert d'un mince voile de brume ou de nuages en altitude (Kravitz et al., 2012). Bien que l'on sache que la lumière diffuse aide les plantes, dont les cultures, à pousser plus rapidement, on ignore quels pourraient être les effets émotionnels et psychologiques sur les êtres humains et les autres formes de vie.

Comme dans le cas du MCB, il a été sous-entendu que la SAI pourrait être déployée dans la région arctique. La modélisation indique que la SAI pourrait réduire rapidement l'amplification polaire, ralentir la fonte des glaces et réduire le réchauffement mondial (Nalam et al., 2017). Toutefois, elle pourrait aussi avoir des effets secondaires semblables à ceux du MCB, notamment en générant un déplacement de chaleur des régions du sud vers l'Arctique, ce qui pourrait contrecarrer certains effets du déploiement de la SAI (Tilmes et al., 2014). Qui plus est, la modélisation indique que le déploiement de la SAI dans l'Arctique pourrait entraîner un déplacement de la zone de convergence intertropicale vers le sud, ce qui aurait des effets négatifs sur les climats de cette région, notamment sur la mousson (Nalam et al., 2017), à moins qu'elle ne soit compensée par un déploiement comparable de la SAI dans l'hémisphère Sud (Nalam et al., 2018).

Activités de recherche actuelles

Jusqu'à présent, toutes les recherches sur la SAI ont été théoriques - soit l'exploration des effets sur le climat, sur la base de modèles climatiques (Berdahl et al., 2014, Irvine et al., 2009), les possibles solutions d'ingénierie et, en particulier, la recherche d'une meilleure compréhension des questions de gouvernance (Horton et al., 2018, Macnaghten et Owen, 2011, Stavins et Stowe, 2019, Rouse, 2018) et l'évaluation sociale de la technologie (Bellamy et al., 2012, Stilgoe, 2015). Les travaux dans ces domaines se poursuivent par le biais d'efforts de recherche répartis à l'échelle mondiale (bien que la plupart des universitaires travaillant dans ce domaine soient basés aux États-Unis et en Europe).

Comme il a été mentionné plus haut, en décembre 2019, le gouvernement des États-Unis a autorisé un financement de 4 millions \$ à la NOAA pour la recherche, qui pourrait inclure des recherches sur la SAI (Temple,

2019). Par ailleurs, le projet de loi Atmospheric Climate Intervention Research Act (ACIRA, 2019) qui, s'il est adopté, financerait la recherche sur la SAI et octroierait à la NOAA le pouvoir de superviser l'examen des expériences de SAI aux États-Unis et d'en rendre compte, pourrait constituer une avancée importante.

Actuellement, la plupart des recherches en sciences physiques pour la SAI sont axées sur la modélisation des expériences de SAI, dont un grand nombre sont menées dans le cadre du « Geoengineering Model Intercomparison Project » (GeoMIP, 2020) – Projet d'inter-comparaison des modèles de géo-ingénierie – un projet communautaire coordonné par le Programme mondial de recherches sur le climat (Tilmes et al., 2015). La toute première expérience de SAI menée en dehors du laboratoire est en cours de développement. Annoncée le 24 mars 2017 (Temple, 2017), l'Expérience de perturbation stratosphérique contrôlée (ScoPEX) prévoit de faire avancer les connaissances sur la façon dont les aérosols stratosphériques peuvent être utiles dans le cadre de la SAI (ScoPEX, 2019). Le projet vise à déployer un ensemble d'instruments, sous un ballon dirigeable contrôlé, dans la stratosphère où il libérera entre 0,1 et 2 kg de carbonate de calcium, et éventuellement de sulfates, pour créer une masse d'air perturbé de 1 km sur 100 m. L'instrument mesurera ensuite les changements dans l'air perturbé, notamment les changements dans la chimie, la densité de l'aérosol et la façon dont la lumière est diffusée (ScoPEX, 2019). Le projet est financé par l'université Harvard à partir d'un fonds provenant de dons philanthropiques. Le projet vise à en savoir plus sur la possible efficacité de la SAI et sur les risques qu'elle présente. Les résultats pourraient améliorer la capacité des modèles à mieux prédire comment un déploiement à plus grande échelle pourrait perturber l'ozone stratosphérique (ScoPEX, 2019). Dans le cadre de la propre gouvernance du projet, un comité consultatif d'experts a été créé en partie pour reconnaître et identifier les conséquences sociales et politiques de la conduite de la recherche proposée. Le projet devrait permettre de tester le ballon dirigeable et l'ensemble des instruments à haute altitude, sans charge utile, en 2020.

Compte tenu des incertitudes décrites ci-dessus, des recherches plus pointues pourraient aider à mieux comprendre comment la SAI pratiquée dans l'Arctique et d'autres régions pourrait avoir des répercussions sur les climats d'autres régions de la planète.

Les possibles effets négatifs sur la santé qui ont été associés à la SAI (Effiong et Neitzel, 2016), sous-entendent que des recherches plus approfondies sur la SAI devraient chercher à mieux comprendre les conséquences de l'exposition aux possibles sulfates et autres matières et l'évaluation de leurs propriétés toxicologiques.

Considérations sociopolitiques

Bien qu'il n'y ait eu qu'un nombre limité d'études, les réactions du public à la SAI ont généralement été négatives. Les études ont laissé entendre, par exemple, que le public exprime probablement le plus de préoccupations à l'égard de l'incertitude des effets du déploiement et des risques de résultats nocifs et de ce qu'ils peuvent signifier. Les études ont également indiqué que le public perçoit la MRS, et en particulier la SAI, comme une technologie très puissante, qui s'accompagne d'effets de très grande portée, et avec laquelle les scientifiques « jouent le rôle de Dieu » (Macnaghten et Szerszynski, 2013, Pidgeon et al., 2012, Merk et al., 2015, Braun et al., 2018).

Certains chercheurs de la SAI reconnaissent qu'ils risquent de manquer d'humilité ou d'être perçus comme tels, tandis qu'ils œuvrent à développer les moyens de contrôler le climat, une ambition que Keith (2013) qualifie comme susceptible d'être apparentée à l'orgueil démesuré. Il a été suggéré que la sensibilisation des chercheurs à l'acceptabilité sociale d'autres domaines de recherche controversés, tels que la nanotechnologie et la biologie de synthèse, pourrait avoir éclairé leur réflexion et encouragé une approche prudente à l'égard du développement de la technique (Sarewitz, 2010).

Jusqu'à présent, peu de non-spécialistes ont participé aux débats sur l'avenir de la MRS. Par exemple, les peuples autochtones sont largement représentés dans la documentation sur les technologies de modification du climat en tant que groupe clé touché, par exemple dans l'Arctique. Toutefois, certains ont fait remarquer qu'ils n'ont pas encore eu de visibilité dans les débats sur l'avenir de la MRS (Buck, 2018). De façon plus générale, il y a eu peu de « tentatives d'examiner les préoccupations que les populations pourraient entretenir et la façon dont ces préoccupations pourraient éclairer les discussions sur l'éthique et les politiques » (Carr et Preston, 2017). Cette participation limitée au dialogue sur la SAI et les faibles niveaux de compréhension qui s'y rapportent (Pidgeon et al., 2012) pourraient toutefois être surmontés par « une formation rapide et délibérée des divers publics et des personnes impliquées dans le processus politique sur ce qu'est la MRS, sur ses avantages et ses risques potentiels et sur les raisons pour lesquelles les scientifiques examinent cet ensemble de technologies envisagées » (Wagner et Zizzamia 2019).

Il existe une incertitude quant aux acteurs qui pourraient choisir de déployer la SAI, de la financer ou de subir une perte ou un préjudice susceptible de découler du déploiement (Reynolds, 2019). Il a été établi que la MRS n'est

pas nécessairement un projet purement et simplement humanitaire mais, comme le suggère Buck (2012), qu'elle pourrait être mise au service d'une large gamme d'intérêts. La participation de philanthropes au financement de la recherche et les débats sur le financement public ont en soi soulevé d'importantes questions sur la façon dont la recherche et le développement pourraient ou devraient être menés (Nisbet, 2019). Des discussions sur les intérêts qui pourraient s'inscrire dans la MRS ou s'y opposer ont lieu actuellement. Certains craignent que les climato-sceptiques puissent passer rapidement d'une position de négation du changement climatique à un plaidoyer fort en faveur de la MRS (Morton, 2015) et certains groupes déjà soupçonnés de dépenser des sommes importantes pour éviter ou reporter l'atténuation, pourraient choisir d'encourager la MRS comme moyen de réaliser ou de protéger leurs modèles commerciaux (McLaren, 2016).

Un récent sondage effectué auprès de groupes de réflexion libertaires montre que la plupart d'entre eux ne connaissent pas la MRS, bien qu'une majorité de ceux qui se prononcent soient favorables au financement de la recherche sur la MRS comme solution de rechange à l'atténuation (Collomb, 2019). Dans une déclaration détaillée, Climate Action Network International (CAN), le plus grand réseau mondial d'organisations de la société civile (OSC) travaillant à encourager l'action gouvernementale pour faire face au changement climatique, a recommandé à l'unanimité l'adaptation et l'atténuation comme solutions de première intention en faveur de la MRS. Le CAN est aussi fortement opposé à l'expérimentation et au déploiement de la MRS en plein air, eu égard aux risques qui y sont associés (CAN, 2019).

Parmi les publics, il existe un groupe hasardeusement structuré, appelé « chemtrailers », qui pense que les traînées de condensation laissées par le passage des avions sont des traînées de produits chimiques inconnus pulvérisés dans l'atmosphère dans le cadre d'un programme à grande échelle de modification de la météo et du climat, ou de contrôle de la population (Cairns, 2014). Ce groupe associe étroitement ces croyances à la SAI. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène marginal, en 2017, la Cooperative Congressional Election Study (Étude collaborative sur les élections au Congrès) laissait entendre que 10 % de la population américaine était persuadée que « la conspiration des traînées de produits chimiques était complètement vraie » et que 20 à 30 % supplémentaires pensaient que la théorie avait un « certain fonds de vérité » (Tingley et Wagner, 2017). Cet exemple illustre l'existence de questions plus larges concernant la confiance, la politique et la communication et montre comment des technologies conçues dans un contexte abstrait entrent invariablement dans des conditions sociétales – et inter-sociétales – complexes qui peuvent être difficiles à intégrer dans une gouvernance équilibrée de la MRS à l'avenir.

Gouvernance

Le besoin d'une gouvernance de la SAI découle non seulement de la capacité de celle-ci à influencer intentionnellement sur le climat de la Terre, mais aussi parce que cette technologie peut avoir des répercussions sur d'autres systèmes tels que les océans, la météo, l'agriculture, les cycles hydrologiques régionaux, l'ozone stratosphérique, les nuages de la troposphère en haute altitude et la productivité biologique (Shepherd, 2009), ainsi que les systèmes et structures sociaux et les valeurs profondément ancrées. Étant donné que ces effets sont susceptibles d'affecter différemment les États et les régions, tant positivement que négativement, le déploiement de la SAI pourrait éventuellement donner lieu à des défis géopolitiques et à des défis de gouvernance liés à la sécurité. Il a été sous-entendu que ces défis pourraient compter des risques de conflit, qui sont exposés dans la section II. Par ailleurs, les effets, connus et inconnus, sur le plan humain, social et économique rendent les questions de gouvernance plus complexes. En outre, la possibilité d'un choc terminal ou les problèmes d'aléa moral ou de dissuasion de l'atténuation soulèvent également des questions importantes sur la prise de décision, la surveillance et la validation (Kosgui, 2011). À tous ces effets s'ajoutent des questions sur la façon de gouverner la recherche sur la SAI, qui passe de la modélisation et du laboratoire au plein air (SRMGI, 2011 ; Parker, 2014).

Puisque la SAI s'accompagne de questions sur les risques, les avantages, la justice et les incertitudes, qu'elle est complexe sur les plans politique et économique et qu'elle peut également avoir des effets sur l'environnement qui ne s'exercent pas de la même façon sur les communautés, il est indiqué (Stilgoe, 2015, Macnaghten et Owen, 2011, Buck, 2019) que le point de vue des citoyens sur la façon dont la SAI se développe devrait être intégré dans les processus de délibération sur la gouvernance dès le premier stade, dans un mode de production conjointe.

Il a été démontré qu'inclure le public améliore non seulement le processus d'innovation (Genus et Stirling, 2018) mais, dans le cas de la SAI, il semblerait pouvoir produire de nouvelles connaissances sur la façon dont les technologies et les techniques peuvent affecter la vulnérabilité et la résilience au changement climatique à l'échelle communautaire et régionale (Buck, 2018). Il est donc suggéré, tel que le recommande le gouvernement américain (Parthasarathy et al., 2010), que les possibilités de faire participer les citoyens à l'évolution de toute planification devraient être considérées comme un élément essentiel du processus.

Le projet de recherche sur l'injection de particules dans la stratosphère pour le génie climatique (SPICE) est une étude de cas utile sur les réactions inattendues du public à la SAI et sur l'incertitude et la complexité de la gouvernance de la recherche sur la SAI. L'annonce du projet a été largement diffusée dans les médias en termes négatifs (Cooper, 2011 ; Ruz, 2011 ; Monbiot, 2011 ; Daily Mail, 2011) et certains éléments du projet ont été retardés, tout d'abord de six mois pour permettre un engagement plus poussé avec les acteurs concernés. Le jour de l'annonce du report du projet, une pétition (ETC, 2011) a été présentée au secrétaire d'État britannique à l'Énergie et au Changement climatique, demandant la suspension du projet en raison de préoccupations et d'un éventuel conflit d'intérêts avec la Convention sur la diversité biologique (CDB), la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et la Conférence des Nations Unies sur le développement durable. Après consultation, les donateurs ont décidé de retarder davantage certains éléments du projet pour permettre à l'équipe de celui-ci d'entreprendre un travail d'engagement plus large (Macnaghten et Owen, 2011).

Tableau 2 – Résumé des forces, des faiblesses et des risques liés au MCB et à la SAI

FORCES	FAIBLESSES	RISQUES
Grand potentiel d'efficacité pour ce projet qui devrait être à même d'apporter un refroidissement à l'échelle planétaire.	Bien que les recherches laissent entendre que l'exécution est techniquement possible, le détail des mécanismes d'exécution n'est pas encore finalisé.	Les essais sur le terrain, le déploiement ou la menace que pose le déploiement peuvent créer des tensions entre États et entre régions (voir la section II plus bas).
Compte tenu de l'efficacité potentielle, les coûts sont bas.	Il n'y a actuellement pas de clarté sur le mode de gouvernance de ces deux technologies.	Si le choix se portait sur les sulfates comme agent actif de prédilection pour la SAI, ceux-ci pourraient réduire l'ozone atmosphérique. Le MCB utilisant de l'eau de mer ne présenterait pas de tels risques.
Le fonctionnement des nuages dans l'atmosphère est relativement bien compris. La compréhension des interactions des aérosols dans la stratosphère est moins bien définie, bien que les études sur les éruptions volcaniques fournissent certaines idées.	Les réponses du climat au MCB et à la SAI sont incertaines. Par exemple, il pourrait se produire un changement dans les modèles de précipitation.	Une possible migration à grande échelle à la suite de changements dans les phénomènes météorologiques.
Si des navires et des véhicules de déploiement à grande altitude (vraisemblablement des avions) étaient nécessaires, aucune restructuration des infrastructures mondiales ou des systèmes d'approvisionnement en énergie ne serait requise.	Il faudrait plus de données probantes sur la recherche pour éclairer les discussions sur la gouvernance.	Le choc terminal climatique, donnant lieu à une augmentation rapide des températures, pourrait survenir si les déploiements étaient interrompus d'une manière abrupte.
	Il se pourrait qu'aucune des deux approches ne soit socialement acceptable.	L'acidification des océans serait toujours aussi intense si les technologies se substituaient aux mesures d'atténuation du changement climatique.

D'autres discussions ont conduit au postérieur retrait complet des éléments expérimentaux du projet en mai 2012. Cette décision a été prise, selon le site Web du projet SPICE (Watson, 2012), en raison de problèmes de gouvernance et de propriété intellectuelle.

Compte tenu des possibles répercussions transfrontalières de la SAI, un certain niveau de gouvernance réglementaire internationale sera essentiel, et plusieurs instruments actuels ont un effet d'entraînement sur la SAI (ainsi que sur d'autres technologies de modification du climat exposées dans le présent document). La section III de ce résumé passe en revue certains de ces instruments, principes non contraignants ou codes de conduite qui s'appliqueraient en partie à la SAI. Avant d'aborder cette question, la section II examine plus en détail les questions géopolitiques et de sécurité liées à la MRS.

SECTION II : MRS, géopolitique et sécurité

Introduction

Cette section passe en revue les questions géopolitiques et de sécurité, notamment les menaces, l'utilisation et le contrôle des forces militaires, les questions plus larges d'habileté politique et de stratégie étatique et les questions plus générales de sécurité sur les plans sociaux, humains et environnementaux, dans le contexte des risques et des incertitudes identifiés dans les évaluations technologiques mentionnés plus haut.

Le changement climatique soulève déjà des questions de sécurité mondiale, notamment des tensions dues à la migration climatique liée à l'épuisement des ressources alimentaires et en eau et à l'évolution des vecteurs et des ampleurs des maladies. Il crée de nouveaux risques que les gouvernements, les institutions et les communautés ne sont pas en mesure de prévoir ou de gérer. Ces risques et les tensions qui y en résultent agissent comme des facteurs de multiplication des menaces qui aggravent des situations déjà fragiles et ont la capacité de contribuer à des bouleversements sociaux, voire à des conflits violents (Ruttinger et al., 2015). Le changement climatique a, par exemple, été identifié comme un facteur de multiplication des menaces pendant la période qui a précédé l'explosion de la guerre civile syrienne (Kelley, 2015), où les pénuries d'eau liées au climat en Syrie, en Irak et en Turquie ont tué le bétail, fait grimper les prix des aliments et affecté la santé des populations. En réaction, 1,5 million de citoyens ruraux se sont installés dans les villes syriennes, qui accueillait déjà un grand nombre de migrants de la guerre en Irak, ce qui a créé des tensions très délicates (Kelley, 2015).

Comment le déploiement de la MRS pourrait-il évoluer et pourquoi pourrait-il créer des tensions ?

Bien que la SAI et le MCB aient, en théorie, la capacité de changer rapidement le climat, il n'est pas certain qu'un déploiement futur puisse refroidir la planète très rapidement. La SAI, par exemple, exigerait que des avions (ou d'autres moyens) dispersent lentement et continuellement des aérosols dans la stratosphère (Keith, 2013). En théorie, cela exigerait un processus progressif, le volume et la densité des aérosols augmentant sur une période de plusieurs mois avant que leur accumulation ne commence à avoir un effet mesurable sur la température (Morton, 2015). Dans le cas du MCB, même s'il est possible qu'un seul bateau ou un petit nombre de bateaux se déploient rapidement et blanchissent les nuages, il faudrait une grande flotte pour avoir un effet à l'échelle du climat qui pourrait entraîner des tensions politiques (Shepherd, 2009). Toutefois, le MCB demanderait un déploiement à plus petite échelle pour obtenir un refroidissement localisé, par exemple pour protéger les écosystèmes menacés, tels que les récifs coralliens, ou pour refroidir les villes côtières. Si ces villes se trouvaient dans des régions faisant l'objet de disputes ou connaissant de fortes tensions, un déploiement unilatéral, sans avertissement ni dialogue, pourrait déclencher des tensions - même si le refroidissement était bénéfique pour toutes les parties.

L'ordre de procéder à tout déploiement potentiel de la MRS par rapport à d'autres mesures de lutte contre le changement climatique est incertain. Le déploiement de la MRS pourrait par exemple commencer après que tous les efforts de réduction des émissions ont été mis en œuvre. La MRS pourrait alors être déployée pour assurer le refroidissement pendant une période intermédiaire, tandis que les capacités d'élimination du dioxyde de carbone (EDC) (tant en termes de technologies que d'échelle) seraient augmentées jusqu'à ce qu'elles modifient le climat. À ce stade, la MRS pourrait être diminuée au fur et à mesure que l'EDC prend effet. Un scénario différent, par exemple, pourrait voir le déploiement de la MRS se faire simultanément aux réductions d'émissions. Dans un tel scénario, les techniques d'EDC seraient introduites et augmentées et, lorsqu'elles auraient des effets à l'échelle du climat, la MRS serait diminuée. Il a également été suggéré d'utiliser la MRS comme un outil « d'urgence » pour assurer le refroidissement en temps de crise. Chacun de ces scénarios génère un ensemble différent de défis pour la gouvernance. Par exemple : qui, et sur la base de quelles preuves, décide que les réductions d'émissions et l'EDC ont échoué et que le temps est venu de déployer la MRS ; ou comment l'EDC pourrait-elle être surveillée et vérifiée et qui ferait autorité pour évaluer la MRS et décider quand il est temps soit de la déployer, soit de réduire son déploiement ? On ignore encore la façon de démêler cette complexité dans le contexte de gouvernance actuel. Qui, par exemple, devrait organiser les discussions sur l'ordre de déploiement des technologies imaginées et d'où proviendrait l'autorité de ces personnes ou entités ?

La nature progressive de l'effet sur la température de toute action de MRS à grande échelle est utile dans le contexte de la sécurité. Les erreurs menaçant la sécurité, dont les conflits, surviennent fréquemment lorsque les informations et les renseignements sont peu fournis et qu'il faut réagir de toute urgence, ce qui se caractérise par une prise de décision stratégique rapide au cours de laquelle des erreurs et des mauvais calculs peuvent être faits (Chalecki et Ferrari, 2018).

Toutefois, les politiques mondiales en termes de MRS et de changement climatique sont complexes et incertaines. Dans le cas de la MRS, elles ne sont pas étayées par un cadre de gouvernance éprouvé (Reynolds, 2019), ni par une compréhension universellement acceptée de l'objectif ou du fonctionnement des technologies. La gamme des préférences et les perspectives des pays en matière de climat, de développement, de sécurité et d'autres objectifs interdépendants et de grande ampleur est d'ores et déjà vaste et diversifiée. Dans ce contexte, la MRS peut être comprise de manière extrêmement diverse, et pas forcément comme une mesure d'urgence nécessaire pour arrêter un changement climatique mondial dangereux. Elle pourrait, par exemple, être considérée comme une menace pour les ressources nouvellement accessibles dans l'Arctique, comme un prolongement ou une extension du colonialisme, ou comme un moyen de poursuivre ou même d'élargir les économies actuelles de combustibles fossiles et d'extraction.

Par ailleurs, si la MRS offre la capacité, réelle ou supposée, d'adapter le climat, la promesse de gains (ou de maux évités) pour les pays et les régions pourrait être importante - ce qui pourrait créer davantage de tensions et de contestations (Parker et al., 2018). Si la capacité de refroidissement du climat se concrétisait grâce à la MRS, il faudrait peut-être prendre des décisions sur le type de climat que les sociétés souhaitent créer collectivement. Quelle serait la bonne température, à quel coût et sur quelle base se mettrait-on d'accord ? En d'autres termes, « qui fixerait le thermostat mondial - ou local ? » Quels pourraient être les processus stratégiques et géopolitiques de cette prise de décision et quelles seraient les logiques d'action les plus courantes ?

Certains pays pourraient être sensibles à une température beaucoup plus fraîche que d'autres, accepter des types ou des niveaux de risques différents de ceux des autres, ou appliquer des cadres généraux différents et les relations de pouvoir détermineraient la façon dont ces questions se jouent (Schellnhuber, 2011). Quel rôle les scientifiques devraient-ils jouer à cet égard ? Doivent-ils être la police mondiale de la protection du climat, ou des conseillers dans un processus beaucoup plus vaste dans lequel leurs indices ne sont qu'un élément comme un autre ? Les régions ou les États puissants seront-ils prêts à engager des débats sur le partage ou l'abandon du contrôle du thermostat et les pays plus faibles consentiront-ils à le faire ? Ou devrions-nous, comme le suggère Macnaghten (2013), rechercher un dialogue mondial véritablement garant de la pluralité sur la future conception de notre planète ? Si oui, comment cela fonctionnerait-il et qui, en fin de compte, prendrait les décisions et endosserait la responsabilité ?

On ne sait pas très bien qui pourrait choisir de déployer la MRS et dans quelles circonstances (Barrett, 2014), pas plus qu'on ne sait si l'avenir du système international pourrait être caractérisé par la consolidation, la continuité ou laisser place à un ordre moindre. Les questions soulevées par les différents scénarios varient. Si un consensus mondial en faveur du déploiement était atteint, et étayé par un processus de dialogue multilatéral aboutissant à un consentement et à un consensus non seulement sur la décision de déployer, mais aussi sur le lieu, la quantité, la durée et les objectifs, et que cela s'accompagnait d'un programme de surveillance et de vérification rigoureux et légitime, les tensions en matière de sécurité pourraient être légères. Sinon, si un déploiement unilatéral (ou « mini-latéral ») de la MRS, sans consultation internationale et avec des buts et objectifs incertains, était proposé ou avait lieu, la communauté mondiale pourrait bien réagir négativement (Barrett, 2014).

Répercussions asymétriques de la MRS

Un déploiement pourrait améliorer le climat pour certains, et le détériorer pour d'autres (Robock et al, 2009). À l'heure actuelle, il n'y a pas assez de preuves pour fournir des connaissances solides sur les asymétries qui pourraient se produire dans différents scénarios de déploiement, ce qui pourrait justifier des recherches plus approfondies. Si, après un déploiement, des asymétries négatives se produisaient et qu'un préjudice ou une perte survenait, la manière dont cela pourrait être compensé - dans le cas où cela puisse l'être - par qui et sous quelle juridiction n'a pas été débattue sur la scène politique, bien que cela soit examiné dans certains ouvrages universitaires, par exemple, Parker et al. (2018) et Chalecki & Ferrari (2018). Le thème de l'attribution complique encore davantage la question. Actuellement, la modélisation du climat n'est pas suffisamment sensible pour

attribuer avec assurance les récents épisodes climatiques extrêmes aux émissions de GES d'origine anthropique (Pielke, 2019), bien que la science fasse de rapides progrès.

Il y a encore moins de capacité, ou même de méthodologie théorique, qui pourrait déterminer si un épisode extrême, ou une série d'épisodes qui ont suivi un déploiement de la MRS, ont été causés par le déploiement, le changement climatique que la MRS cherchait à traiter ou même s'il s'agissait d'événements normaux, quoique dommageables. En l'absence d'une capacité d'attribution - et même avec cette capacité - on peut s'attendre à ce qu'un pays ou une région, ou leurs citoyens, qui ont vécu des épisodes extrêmes après un déploiement de la MRS puissent percevoir ces derniers comme étant directement liés au déploiement et tenir pour responsables les acteurs de la MRS de tout dommage et toute perte (Chalecki, 2018). Si un tel scénario voyait le jour entre des pays ou des régions qui connaissent déjà des tensions politiques, les conséquences pourraient être importantes. Par exemple, si deux pays limitrophes, tous deux dotés d'une capacité d'armement nucléaire et vivant de fortes tensions, étaient impliqués dans un tel scénario, une escalade des tensions pourrait être très dommageable.

L'absence de pouvoir pour mettre un terme au déploiement

À l'heure actuelle, il n'existe aucun mécanisme de gouvernance in situ, y compris dans les cadres réglementaires ou le droit international, qui soit adapté ou capable de fournir un cadre pour la MRS (Reynolds, 2019). Il n'existe donc aucune obligation juridique en tant que telle qui empêcherait un État (ou un autre acteur) de choisir de déployer le MCB ou la SAI. Bien qu'il existe une série d'instruments et de mécanismes internationaux susceptibles d'être modifiés ou mis en œuvre pour fournir un cadre, cela n'a pas encore commencé (la section III examine ces instruments et mécanismes plus en détail).

La question de savoir si un système de gouvernance international, transparent et responsable, efficace à l'échelle mondiale, ou un modèle hétérogène et polycentrique d'instruments et de mesures, serait le plus approprié pour la MRS fait l'objet de disputes (Nicholson, 2018 ; Redgwell, 2011 ; Armeni et Redgwell, 2015). Le présent résumé n'examine pas ces questions en détail, mais il peut être utile de souligner certaines questions clés qui restent sans réponse. Il s'agit notamment de savoir comment l'on pourrait, ou devrait, parvenir à un consensus mondial soutenu par de multiples gouvernements, organisations internationales, organisations de la société civile, groupes environnementaux et critiques et autres (Macnaghten et Owen, 2011). Il s'agit aussi de savoir comment l'on pourrait, ou devrait, mettre en place des systèmes de gouvernance mondiaux, transparents et responsables, où tous les acteurs peuvent participer librement de manière démocratique, avec la pleine participation de la société civile, dans le contexte d'une intervention individuelle à l'échelle planétaire ? (Bellamy et al., 2012).

Déploiement unilatéral de la MRS

L'absence actuelle de gouvernance pour arrêter un acteur du déploiement déterminé suscite des inquiétudes quant au déploiement unilatéral. Alors que les petits États ayant une puissance géopolitique et/ou des atouts économiques limités peuvent être dissuadés de passer au déploiement par la menace de sanctions, voire d'une intervention militaire, les États puissants ou une coalition d'États travaillant de concert pourraient ne pas aussi facilement en être dissuadés. Un tel scénario de déploiement unilatéral et sans gouvernance, si jamais la SAI ou le MCB devaient être techniquement à même d'être déployés, pourrait alors présenter une menace sérieuse pour la sécurité mondiale.

Certaines personnes travaillant sur le déploiement théorique de la MRS laissent entendre qu'un déploiement unilatéral est peu probable (Parson et Ernst, 2013) et prétendent que cela exigerait des capacités physiques et techniques plus importantes que celles qui seraient accessibles à grand nombre de pays, à l'exception des plus grands et des plus puissants. En outre, Horton (2011) laisse entendre que les interdépendances géopolitiques normales, la confiance mutuelle et le besoin de coopérer dans un monde globalisé dissiperaient la volonté d'un seul pays d'agir seul et de déployer la MRS. Toutefois, d'autres considèrent que les grands pays puissants et les coalitions de petits États, notamment ceux qui sont les plus touchés par le changement climatique, par exemple à cause de l'élévation du niveau de la mer, pourraient avoir la capacité et la motivation nécessaires pour passer à l'action (Ricke, et al., 2010 ; Chalecki et Ferrari, 2018).

Selon Parker et al. (2018), il serait possible à un grand État puissant de déployer seul la MRS, ce qui, compte tenu de la gouvernance minimale disponible à l'heure actuelle et du pouvoir politique et économique plus large d'un tel État, pourrait être impossible à arrêter, tout au moins au début. Une telle action pourrait être contestée

et créer de nouveaux problèmes géopolitiques. Si un tel État mettait en œuvre la MRS et que des pertes et des dommages importants devaient survenir ou être perçus comme le résultat de ce déploiement, une situation de crise géopolitique pourrait survenir en raison des perceptions de causalité, soient-elles correctes ou non. On ignore comment la communauté mondiale résoudrait cette situation, à moins qu'une forme de gouvernance efficace de la MRS n'ait évolué à l'avance. Barrett (2019) a laissé entendre que si un seul État envisageait de déployer la MRS, tout traité l'interdisant aurait peu d'effet, puisque les États susceptibles d'envisager une mise en œuvre unilatérale seraient aussi peu susceptibles d'être signataires d'un tel traité.

Dans le cas d'une « coalition de bonnes volontés » de petits États, quand bien même ne serait-elle pas unilatérale au vrai sens du terme, elles formeraient ce que Parker et al. (2018) qualifient de groupe « mini-latéral », qui serait plus résistant à toute pression susceptible d'être exercée sur des États individuels. Une telle coalition pourrait ne pas être considérée comme plus légitime qu'un déploiement à petite échelle de la MRS par un seul État, ce qui créerait des tensions internationales similaires à celles qui se produisent dans le scénario d'un grand déploiement de la MRS par un seul État. Si un groupe mini-latéral devait se former, il a été sous-entendu (Lloyd & Oppenheimer, 2014) qu'un tel groupe pourrait exercer un attrait sur les autres et devenir un acteur plus légitime et plus puissant.

LA MRS ou le problème du « cavalier seul »

La MRS s'accompagne d'un nouveau problème d'action collective, en désaccord avec l'atténuation traditionnelle du climat qui est comprise comme un bien public. Les avantages de l'atténuation dans un seul pays ne se font pas concurrence et ne peuvent pas être exclus car, lorsque le pays qui agit paie les coûts économiques et autres pour ses activités d'atténuation, les avantages sur l'environnement qui en découlent sont partagés dans le monde entier. Cela crée un problème de « parasite » (Stavins et al., 2014), car les pays sont incités à profiter des efforts d'atténuation d'autres pays, tout en choisissant de ne pas prendre eux-mêmes des mesures d'atténuation similaires. La MRS, toutefois, crée ce que Weitzman (2015) décrit comme un problème de « cavalier seul ».

Comme le ratio coûts-bénéfices de la MRS est élevé, un pays qui la déploie, ou un « collectif de MRS » pourrait choisir de déployer celle-ci pour satisfaire au mieux à ses propres besoins climatiques perçus, ce qui déterminerait à son tour le niveau de refroidissement pour tous les autres pays du monde. Ce problème de « cavalier seul » est sérieux parce que le climat nouvellement créé qui est idéal pour la partie qui met en œuvre, soit-elle une coalition ou un seul État, peut ne pas être souhaitable pour les autres et le processus par lequel il se produit violerait les normes communes de justice procédurale. Par exemple, certains bénéficient actuellement des changements climatiques et préféreraient conserver ces avantages. Sinon, un déploiement de la MRS pourrait provoquer, ou menacer de provoquer, des changements dans le climat des pays qui ne mettent pas ces mesures en œuvre, notamment des changements dans les précipitations susceptibles de déboucher sur des problèmes de ressources en eau ou de production alimentaire.

La nature de « cavalier seul » de la MRS attire l'attention sur les défis créés par cette technologie de rupture à l'échelle mondiale qui, faute d'un débat sur la gouvernance pendant la phase de développement actuelle, restera un contexte géopolitique fragmenté et sans gouvernance. Les avantages qu'un seul pays ou une coalition peut tirer de la mise en œuvre de la MRS peuvent être trop attirants sur le plan politique pour dissuader la décision de déployer la technologie (Parker et al., 2018). Cela pourrait se produire s'ils avaient connu plus fréquemment des épisodes météorologiques extrêmes liés au changement climatique et/ou s'ils étaient sujets à des pressions politiques de la part de citoyens ou d'alliés, ou d'autres pressions politiques au sein de leur pays ou de leur région, pour faire face au changement climatique. Dans un tel contexte politique, un pays, y compris des États encore plus petits, peut être tenté de ne pas chercher à conclure un accord multilatéral et à déployer la MRS. Dans un tel scénario, la communauté internationale ne pourrait pas faire grand-chose, voire rien, pour arrêter la mise en œuvre, à l'exception des interventions militaires, qui pourraient en elles-mêmes être illégales (voir le chapitre « Conflit et guerre » plus bas). Barrett et al. , et Gertner (respectivement 2014 et 2017) ont laissé entendre que le contre-déploiement pourrait être une alternative à la réponse militaire.

Contre-déploiement

Le contre-déploiement a été défini par Parker et al. (2018) comme « l'utilisation de moyens techniques pour annuler le changement de forçage radiatif provoqué par le déploiement de la MRS ». L'idée laisse entendre qu'un pays, ou un groupe de pays, pourrait menacer d'empêcher tout effet de refroidissement causé par les

déploiements de MRS dans d'autres pays, soit pour dissuader le déploiement en premier lieu, soit pour inverser ou ralentir les effets de tout déploiement réel. Les moyens techniques qui pourraient être utilisés à cette fin sont incertains et ne font actuellement pas l'objet de la moindre démarche de recherche. Toutefois, ils pourraient vraisemblablement englober l'utilisation d'un agent de réchauffement (par exemple le rejet à grande échelle d'un GES ou l'arrêt délibéré des mesures d'atténuation) ou la recherche d'une neutralisation avec perturbation physique (comme l'élimination ou la modification chimique des aérosols répandus, ou la modification des caractéristiques des nuages éclaircis à l'aide de très gros noyaux de condensation des nuages). Une troisième option serait une action militaire directe contre les infrastructures de mise en œuvre, une mesure qui pourrait être interprétée comme un acte de guerre.

Les résultats des contre-mesures sont très incertains (Parker et al., 2018). Pourraient-ils, par exemple, conduire à un nouveau type de conflit climatique ou encourager une « course aux armements » de déploiement toujours plus rapide et de contre-déploiement ? Une capacité de contre-déploiement pourrait être un outil politique utile, tant dans le cadre du contrôle de la MRS que dans le cadre plus large du processus politique mondial, et la menace de recourir à des contre-mesures pourrait être dissuasive. Qui devrait, ou pourrait, contrôler l'accès à toute contre-mesure future - les pays individuels qui se sentent menacés ou peut-être un service international sur le climat sous les auspices d'un traité ou d'un accord ?

Militarisation et intérêt militaire

Les techniques de modification de la météo ont toujours suscité l'intérêt des militaires. Par exemple, l'opération Popeye, menée pendant la guerre du Vietnam, a cherché à influencer sur le régime des précipitations pour perturber les capacités de transport et de communication. Briggs (2013) suggère que la nature moins « contrôlable » ou facile à cibler de la SAI, alliée à la controverse associée à la MRS, ternit l'attrait de ces techniques en tant qu'armes militaires. Il se peut toutefois que si un déploiement devait avoir lieu à l'avenir, il soit assuré par des organes militaires utilisant les infrastructures militaires. La MRS peut donc s'inscrire dans des intérêts stratégiques et géopolitiques internationaux plus grands (Nightingale et Cairns, 2014). Cela pourrait poser une kyrielle de problèmes à la MRS, même si elle était utilisée sans la moindre intention malveillante ou stratégique. En tant qu'élément potentiel d'une infrastructure vraiment essentielle sur laquelle le climat mondial reposait (compte tenu de la menace du problème lié à une brusque interruption), la MRS pourrait devenir la cible de mesures de sécurité visant à se protéger contre les groupes civils cruciaux, les éco-saboteurs, les terroristes, les opérations de l'État ou les catastrophes naturelles. Le lien entre la MRS et les institutions et acteurs de la sécurité se trouverait probablement renforcé par cette dynamique.

Conflit et guerre

Si la MRS était déployée de manière unilatérale, ou par un groupe d'États ou autres et qu'elle provoquait, ou était perçue comme ayant provoqué des dommages environnementaux à grande échelle, par exemple, en modifiant de manière néfaste la mousson et en affectant des millions de personnes. Il n'existe pas d'instruments juridiques qui légitimeraient des actions militaires contre ceux qui ont mis ces mesures en œuvre et ont causé des dégâts (Chalecki et Ferrari, 2018).

La moindre riposte, conduite en vertu de la doctrine de la guerre juste, aurait une validité contestable. Bien que les États aient le droit de défendre leur souveraineté, il existe actuellement une incertitude quant aux droits des États à la souveraineté écologique, bien qu'il existe certaines limites à la souveraineté des États individuels qui découlent du devoir d'éviter de porter atteinte à la souveraineté des autres. Par ailleurs, alors que dans un scénario extrême, la MRS pourrait créer une guerre en raison de dommages environnementaux, cela se serait produit sans qu'il y ait eu le moindre évènement reconnu comme une guerre selon les termes du Protocole de Genève - créant une contradiction pour les principes actuels du « droit de la guerre » (Chalecki et Ferrari, 2018). Toutes représailles menées par les forces de sécurité s'avèreraient difficiles à justifier sur le plan juridique et demanderaient de nouvelles interprétations des principes qui se profilent derrière la guerre juste, c'est-à-dire la juste cause, la bonne intention, l'autorité appropriée, les chances de succès, la proportionnalité, les non-combattants, le dernier recours et la justice relative. Aucun de ces principes, dans le cas des dommages causés par la MRS, ne peut être abordé par une compréhension normale du conflit (Chalecki et Ferrari, 2018). Qui sont, par exemple, les non-combattants et comment la justice relative pourrait-elle s'exercer ? Toutefois, les normes et innovations juridiques surgissent de manière inattendue, souvent en réponse à des évènements dramatiques, par exemple, comme on l'a vu à la suite des attentats terroristes du 11 septembre 2001. La communauté internationale peut donc être en mesure de résoudre rapidement une situation juridique à la lumière d'une menace de riposte militaire à la MRS ou de représailles réelles.

Choc terminal

Comme nous l'avons indiqué plus haut, le MCB et la SAI s'accompagnent tous deux d'un risque potentiel appelé choc terminal (Jones et coll., 2013). Si l'on mettait fin brusquement au déploiement de l'une ou l'autre des approches de MRS, la modélisation du climat indique que les températures mondiales « auraient un effet rebond », ce qui réchaufferait rapidement le climat mondial. Un tel réchauffement rapide pourrait avoir des répercussions importantes sur, par exemple, les conditions météorologiques, les régimes de précipitations, ainsi que le nombre et l'ampleur des épisodes extrêmes (Jones et al., 2013). Par ailleurs, la biodiversité serait touchée car les espèces, bien que capables de s'adapter à des changements climatiques lents, sont gravement stressées par des changements rapides (Shah, 2014). Cet effet est déjà observé dans certaines parties du monde où les taux de réchauffement actuels sont beaucoup plus lents que les changements susceptibles de se produire avec l'arrêt brutal de la MRS (Shah, 2014). Le dérèglement du climat et des écosystèmes associés à une échelle plausible créerait des défis importants pour l'humanité, beaucoup plus éprouvants que ceux que pose le changement climatique jusqu'à présent et serait susceptible de donner lieu à des tensions géopolitiques sérieuses. Toutefois, une interruption brutale serait un scénario improbable.

Si un État qui déploie la MRS devait mettre fin à son programme de MRS, il subirait certaines des conséquences de l'interruption subie par d'autres pays. Dans le cas où un pays qui déploie des techniques de MRS serait confronté à une menace sérieuse de la part d'autres pays, il pourrait considérer une interruption rapide comme une contre-menace. Sinon, le réchauffement mutuel immanquable et les dommages qui y en découleraient, ainsi que les possibles mesures compensatoires telles que les sanctions économiques et autres imposées par la communauté mondiale, donnent à penser qu'il y a très peu de circonstances, voire aucune, dans lesquelles un État qui déploie la MRS choisirait d'y mettre fin (Parker et Irvine, 2018). Toutefois, cette propension à éviter l'interruption risque d'être affaiblie si les États qui déploient la MRS sont également plus riches et plus avancés sur le plan technologique et figurent donc aussi parmi ceux qui sont plus aptes à s'adapter aux effets des changements soudains de température. Néanmoins, la menace de choc terminal serait moindre si plus d'un État avait accès à la capacité de MRS. Si tel était le cas, toute décision d'interruption prise par un pays pourrait être contrée par un deuxième pays compétent en termes de MRS et qui choisirait de déployer celle-ci pour stabiliser le climat.

Baum et al. (2013) ont suggéré qu'un effondrement total de la société conduisant à une crise existentielle ou extrême pour l'humanité, déclenchée par exemple par une guerre nucléaire, pourrait laisser les survivants sans les capacités de maintenir la MRS. Le choc dû à une brusque interruption qui en résulterait pourrait alors exercer une pression encore plus forte sur la population restante, créant ainsi une « double catastrophe » (Cairns, 2014). Un monde qui déploie la MRS pourrait donc être moins résistant aux chocs systémiques. Il est ardu d'imaginer un système de gouvernance qui serait capable de faire face à des circonstances aussi extrêmes.

Un positionnement géopolitique

Des risques pour la sécurité peuvent résulter des compétences en MRS si les pays ou les alliances choisissent d'utiliser la suggestion ou la menace de déploiement pour obtenir un avantage stratégique. Un tel positionnement géopolitique pourrait, par exemple, être utilisé pour créer des pressions sur certaines régions de grande valeur faisant l'objet de disputes comme l'Arctique, l'Himalaya ou le Moyen-Orient, dressant les acteurs régionaux ou même mondiaux les uns contre les autres (Cairns, 2014). Les coûts relativement bas et le grand effet de levier, que certains estiment aller de pair avec les méthodes de MRS, pourraient en théorie en faire une alternative aux menaces traditionnelles, en particulier pour les puissances autrement incapables de projeter leur pouvoir, même si l'imprécision des effets contribuait à rendre cette solution risquée. Dans de tels scénarios, le MCB serait peut-être la technique de prédilection en raison de ses capacités plus contrôlables qui ne sont pas inhérentes à la SAI. Un déploiement du MCB qui est capable ou pressenti capable de créer une sécheresse au Moyen-Orient, par exemple, si la demande est effectivement précise, pourrait créer une pression sur la région pour que celle-ci réponde, soit en accédant à toute demande faite, soit en exerçant des représailles sous une forme ou une autre. Si aucune forme de cadre de gouvernance n'est mise en place, il est difficile de percevoir comment de tels scénarios pourraient être évités ou résolus.

Politique de l'État-nation

Un pays peut choisir d'investir dans la MRS non seulement pour faire face au changement climatique, mais aussi pour des raisons politiques internes (Morton, 2015). La MRS pourrait, par exemple, être considérée comme une option politique séduisante en tant qu'expression du pouvoir de l'État en raison de son possible impact de

grande envergure, même si son déploiement s'avérait irréalisable (de la même manière que pour les capacités d'armement nucléaire) (Corry, 2017). Compte tenu des coûts attendus du MCB et de la MRS, il se pourrait que le retour sur investissement en termes de prestige national soit considéré comme une bonne opération par certains gouvernements (Symons, 2019). Ensuite, après avoir investi dans des capacités nationales de MRS et les avoir développées, certains gouvernements pourraient avoir des difficultés à ignorer les pressions s'exerçant en vue du déploiement (Gardiner, 2010). C'est une situation qui pourrait créer de l'incertitude dans la communauté de la gouvernance mondiale du climat.

Lockley (2019) a suggéré que l'utilisation, réelle ou proposée, de la MRS pourrait entraîner des troubles civils, susceptibles d'aller de la protestation à l'action directe contre les infrastructures et les chaînes logistiques de la MRS. De telles activités pourraient être coordonnées à l'échelle internationale et s'étendre aux actions terroristes. Toute réponse terroriste pourrait être dirigée contre des opérations de MRS, des concentrations de population, des personnalités politiques ou des monuments et lieux emblématiques, les terroristes agissant au « nom » de ceux qui subissent les effets négatifs du déploiement de la MRS. Lockley (2019) suggère également que les terroristes pourraient opter pour chercher à endommager les infrastructures de MRS afin de protester contre d'autres injustices perçues, qui ne sont pas liées à la MRS ni au changement climatique.

Aléa moral et diminution de la coopération internationale

Stilgoe (2015) et d'autres ont abordé le thème de l'aléa moral. L'idée est que l'effet de refroidissement de la MRS pourrait fournir à certains groupes d'intérêt une excuse pour continuer à utiliser les combustibles fossiles aux taux actuels, voire à des taux plus rapides. Cela pourrait également se révéler être le résultat d'une modélisation théorique si la promesse de la MRS identifiée dans les études de modélisation dissuadait les réductions d'émissions à court terme en diminuant le coût social futur perçu du carbone.

Le travail qu'effectue la communauté internationale depuis de nombreuses années pour développer des compréhensions, des principes, des règles et des objectifs communs, comme la CCNUCC en termes de changement climatique, a été un mécanisme puissant pour la diplomatie mondiale (Depledge, 2005). Bien que ces acteurs n'aient pas encore trouvé de solutions exhaustives au changement climatique, ils ont joué un rôle important dans la géopolitique en aidant à rassembler les États autour d'un défi commun et, par ce biais, à créer de nouvelles compréhensions et relations (Bulkeley, 2010). Si, comme le suggère Morton (2015), la MRS devait conduire à une dégradation de la diplomatie climatique internationale et à un nouveau cadre de la relation de la communauté mondiale avec le CO₂ et la nécessité de le réduire, ces puissants mécanismes de discussion mondiale pourraient être réduits. Il pourrait y avoir un besoin perçu de discussions multilatérales moins urgentes, ou alors la MRS pourrait déclencher une attitude de confrontation vis-à-vis des dommages climatiques et de la responsabilité des épisodes météorologiques si la MRS introduit un « responsable » plus direct dans les négociations mondiales sur le climat, ou si elle atténue autrement la force des relations et la compréhension mutuelle. Inversement, la MRS peut en théorie fortement encourager la diplomatie climatique mondiale (Keith et Parker, 2013), mais en introduisant de nouveaux antagonismes, elle risque davantage d'éroder la future capacité à œuvrer à la protection du climat mondial ou d'autres environnements et questions connexes. Un tel scénario pourrait s'accompagner d'implications incertaines pour les futures politiques mondiales, non seulement en termes d'environnement, mais aussi plus largement. Toutefois, Morrow (2019) laisse entendre que les programmes de recherche sur la SAI axés sur les missions pourraient, s'ils sont bien conçus, non seulement faire progresser les connaissances sur les effets du déploiement de la SAI, mais aussi promouvoir la justice, la légitimité et réduire la probabilité qu'un scénario de danger mortel se produise.

Conseil de sécurité des Nations Unies

Dans le contexte de l'éventail des scénarios potentiels qui pourraient théoriquement se produire à la suite de menaces de déploiement ou de tout déploiement réel de la MRS, le Secrétaire général des Nations Unies et le Conseil de sécurité des Nations Unies peuvent être amenés à participer au processus de gouvernance (Jamieson, 2013). La responsabilité du Conseil de sécurité d'œuvrer au maintien de la paix et de la sécurité internationales est fixée au chapitre VII de la Charte des Nations Unies qui permet au Conseil de « définir l'existence de toute menace contre la paix, de toute rupture de la paix ou de tout acte d'agression et de prendre des mesures militaires et non militaires pour rétablir la paix et la sécurité internationales » (ONU, 2019).

Dans l'exercice de son rôle, le Conseil peut, sous les auspices de l'article 42 de la Charte des Nations Unies, recommander des méthodes d'ajustement ou des conditions de règlement et peut imposer des sanctions ou le recours à la force pour maintenir ou rétablir la paix.

Savoir si le Conseil est un organe adapté pour débattre du changement climatique a été un sujet de contestation depuis que la question a été soulevée pour la première fois en avril 2007, lorsque le Conseil a tenu son premier débat public pour parler des conséquences possibles du changement climatique sur la paix et la sécurité internationales (Chalecki et Ferrari, 2018). La question n'est toujours pas clairement résolue, malgré le débat ouvert qui a eu lieu en janvier 2019 au Conseil de sécurité et qui a examiné les répercussions des catastrophes liées au climat sur la paix et la sécurité internationales (ONU, 2019). Toute décision du Conseil d'agir contre une menace de MRS ou un déploiement effectif pourrait alors créer des tensions au sein du système des Nations Unies.

Secrétaire général des Nations Unies

À ce jour, la MRS ne s'est pas encore frayé un chemin dans la réflexion actuelle des Nations Unies. Par exemple, le rapport du Secrétaire général des Nations Unies de 2018, intitulé « Lacunes du droit international de l'environnement et des textes relatifs à l'environnement : vers un pacte mondial pour l'environnement » (UNSG, 2018), demandé par la résolution de l'Assemblée générale (A/RES/72/277) en réponse à une demande de la France en 2017 pour que les Nations Unies crée un « Pacte mondial pour l'environnement », ne fait qu'une brève mention des technologies qui modifient le climat dans une discussion sur la diversité biologique et il n'y a aucune référence à la MRS.

Compte tenu de cette référence réduite à la MRS dans le système des Nations Unies à ce jour, il est peu probable que le Département des opérations de paix (DPO), le département des Nations Unies chargé de la planification, de la préparation, de la gestion et de la direction des opérations de maintien de la paix, ni que le Département des affaires politiques et de la consolidation de la paix (DPPA), qui cherche à prévenir et à résoudre les conflits meurtriers dans le monde, aient la MRS sur la liste de leurs priorités. Assurément, aucun de ces deux départements n'a publié de documents sur la question à ce jour. Il est donc difficile de prévoir comment le Secrétaire général des Nations Unies ou le Conseil de sécurité pourrait réagir à la disponibilité de la MRS ou à tout scénario envisageable qui soulèverait des questions ou des préoccupations d'ordre géopolitique ou sécuritaire.

Acteurs non étatiques

Les estimations actuelles des coûts de la MRS portent à croire que le déploiement peut être abordable pour des acteurs autres que les pays (Crutzen, 2006 ; Smith et Wagner, 2018). Il a été donné à entendre que les grandes entreprises, un individu appelé « Greenfinger » (littéralement « Le doigt vert ») (Victor, 2008) agissant seul ou même une initiative bénéficiant d'un financement participatif pourraient avoir une capacité de déployer la MRS à l'avenir (Morton, 2015). Les motivations d'un tel déploiement ou la manière dont la communauté internationale pourrait réagir aux déploiements de ces groupes et, le cas échéant, les éventuelles conséquences géopolitiques, ne sont pas claires (Horton, 2019). Comment, par exemple, la communauté mondiale réagirait-elle à un collectif international de militants bénéficiant d'un financement participatif ou sponsorisé par des philanthropes, qui lancerait individuellement et de manière autonome des ballons dirigeables répandant des micro-aérosols, faciles à construire à partir de composants disponibles gratuitement ? Quelles pourraient être les réponses si le refroidissement ne s'accompagnait que d'effets positifs ou s'il causait de sérieux problèmes pour l'environnement, la politique ou même la sécurité ? Une situation plus complexe pourrait survenir si seuls les militants d'un pays se déployaient et qu'un second pays, hostile, subissait des effets négatifs.

SECTION III: Instruments de gouvernance

Introduction

Les outils et instruments de gouvernance de la MRS ont fait l'objet d'une pléthore de débats génériques pendant la décennie qui vient de s'achever. Parmi ceux-ci, les techniques qui visent à avoir un effet mondial, comme la SAI et le MCB, ont été un sujet central. Cette partie met l'accent sur la législation actuelle et sur certains principes ou codes de conduite clés non contraignants qui s'appliquent. Cette partie vise à mettre en évidence les dispositions les plus importantes, mais ne prétend pas les analyser en profondeur. Reynolds (2018), Scott (2013 et 2015) et Redgwell (2011) ont produit des descriptions approfondies du droit international applicable aux technologies de modification du climat pour les personnes désireuses d'en savoir plus sur le sujet. Un bref résumé est fourni dans le tableau 3.

Tableau 3 – L'applicabilité des instruments juridiques de MCB et de SAI

Instruments juridiques	Applicable actuellement	
	MCB	SAI
Convention sur la diversité biologique (CDB)	Oui	Oui
Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone et Protocole de Montréal de 1987	Non	Oui, uniquement en ce qui concerne les aérosols nuisibles à l'ozone
Convention sur la modification de l'environnement (ENMOD)	Uniquement en cas d'utilisation comme arme militaire	Uniquement en cas d'utilisation comme arme militaire
Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD) Convention de Londres de 1972 et Protocole de Londres 1996	Non	Non
Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM)	Oui	Non
Convention de Londres de 1972 et Protocole de Londres 1996	Non	Non
Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)	Peu clair	Peu clair
Accord de Paris de 2015	Éventuellement comme un instrument pour aider à améliorer la transparence et discuter des mécanismes du marché	Éventuellement comme un instrument pour aider à améliorer la transparence et discuter des mécanismes du marché
Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution marine par les navires telle que modifiée par le Protocole de 1978 (MARPOL)	Non	Non

Convention sur la diversité biologique (CDB)

La CDB de 1993, qui compte 196 parties, a trois objectifs principaux :

- la conservation de la diversité biologique ;
- l'utilisation durable de la biodiversité ; et,
- le partage juste et équitable des avantages découlant des ressources génétiques.

La CDB est l'une des rares conventions à avoir abordé directement les technologies de modification du climat. L'accent a tout d'abord été mis sur les activités de fertilisation des océans lorsque, lors de la neuvième conférence des parties (COP) à la Convention, elle a adopté la décision IX/16 qui exhortait les signataires « à veiller à ce que les activités de fertilisation des océans ne soient pas faites tant qu'il n'existe pas de base scientifique adéquate pour justifier ces activités, notamment l'évaluation des risques connexes, et qu'un mécanisme mondial, transparent et efficace de contrôle et de réglementation n'est pas en place pour ces activités, à l'exception des études de recherche scientifique à petite échelle menées dans les eaux côtières » (CBD, acronyme anglais de la CDB, 2008, p.7).

En 2010, en vue de protéger la biodiversité, la CDB est allée plus loin lorsque la dixième Conférence des Parties a encouragé les Parties, d'autres gouvernements et les organisations concernées, et a demandé au Secrétaire exécutif de prendre sa décision (X/33(8)(w)) selon laquelle « aucune activité de géo-ingénierie liée au climat susceptible d'affecter la biodiversité ne se fera tant qu'il n'existera pas de base scientifique adéquate pour justifier de telles activités et que les risques associés pour l'environnement et la biodiversité et les impacts sociaux, économiques et culturels associés n'auront pas dûment été pris en compte... (CBD, 2010, p.5) sont prises en considération, le cas échéant, lors de la réalisation de travaux sur la biodiversité et le changement climatique. Il convient toutefois de remarquer que la recommandation de la CDB n'incluait pas les études de recherche scientifique à petite échelle menées dans des environnements contrôlés qui permettraient d'identifier les répercussions possibles sur l'environnement. Par la suite, la COP 11 et la COP 13 ont réaffirmé cette décision.

Même si la position de la CDB semble forte, elle n'est pas contraignante pour les Parties, et les États-Unis n'en constituent pas non plus une partie. Le langage utilisé est « modéré » et invite seulement les parties à envisager des orientations plutôt que d'exiger que les parties ne s'y conforment et cela ne s'applique que dans le cadre du mandat de la CDB pour ce qui est de la conservation de la biodiversité et l'utilisation durable des ressources biologiques (Reynolds, 2018). L'évocation du principe de précaution par la CDB peut toutefois témoigner fortement de la bonne volonté du droit international à prendre de telles mesures à temps. Cependant, les limites de la CDB soulignent également que les différents protocoles et conventions individuels qui subsistent, tels qu'ils sont actuellement élaborés, ne pourraient constituer qu'une base incomplète pour une réglementation mondiale (Redgwell, 2011), qui constitue un élément important de la gouvernance, car ils s'appliquent chacun à des sujets et à des questions distincts et spécifiques, alors que la SAI fonctionnerait à grande échelle, au-delà des frontières des traités actuels.

Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone et Protocole de Montréal de 1987

La Convention de Vienne de 1985 sur la protection de la couche d'ozone (UNEP, acronyme anglais du PNUE, 1985) et le Protocole de Montréal de 1987 (UNEP, 1987), qui ont été ratifiés par 197 États (tous les membres des Nations unies et l'UE, le Saint-Siège, Niue et les îles Cook), visent à protéger contre la dégradation de la couche d'ozone. Étant donné que l'injection d'aérosols et, en particulier, de sulfates pourrait nuire à l'ozone atmosphérique, ces deux Conventions peuvent être applicables à la SAI. Toutefois, on ne sait pas à ce stade si, ou dans quelle mesure, la couche d'ozone pourrait être endommagée par la SAI (Keith, 2018), d'où l'incertitude quant à leur champ d'application à la SAI. Une demande récente adressée au protocole de Montréal pour qu'il prépare un rapport examinant les répercussions potentielles de la SAI sur l'ozone pourrait aider à clarifier cette question.

Convention sur la modification de l'environnement (ENMOD)

L'ENMOD de 1977 (UN, 1977), officiellement Convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles de 1976, interdit l'utilisation intentionnelle de la techniques de modification de l'environnement par une partie contre une autre à des fins hostiles et elle interdit formellement le recours à la guerre météorologique, à savoir des activités qui ont été précédemment entreprises par les États-Unis pendant la guerre du Vietnam (Hersh, 1972). L'ENMOD ne devrait pas être applicable à la SAI, sauf si celle-ci elle est utilisée comme arme militaire en premier chef. Bien que la SAI soit susceptible d'être utilisée comme telle (Brzoska et al., 2012), elle est généralement considérée comme peu probable (Rayner, 2017). Deuxièmement, la Convention a une portée limitée - n'ayant été signée que par 73 pays, elle laisse de nombreux pays non signataires libres d'agir, dont la France, membre permanent du Conseil de sécurité des Nations Unies.

Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD)

La CPATLD (CLRTAP, acronyme anglais de la CPATLD, 1979) est entrée en vigueur en 1983. Elle est mise en œuvre par le Programme européen de surveillance et d'évaluation (EMEP), sous la direction de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe. La Convention couvre 22 polluants, dont la majorité sont des pesticides et des insecticides. Elle compte actuellement 51 signataires et, en tant que telle, la Convention souffre des mêmes problèmes de couverture que l'ENMOD. Par ailleurs, ni les sulfates, ni d'autres aérosols envisagés pour la SAI, ni les possibles particules de MCB ne sont répertoriés comme des polluants interdits. En outre,

la Convention définit la pollution atmosphérique transfrontalière comme « la pollution atmosphérique dont l'origine physique est située en intégralité ou en partie dans la zone relevant de la juridiction nationale d'un État et qui a des effets nocifs dans la région relevant de la juridiction d'un autre État à une distance telle qu'il n'est généralement pas possible de distinguer la contribution de sources d'émission individuelles ou de groupes de sources » (CLRTAP, 1979, p.2). Étant donné que si la SAI ou le MCB étaient déployés, il serait possible d'identifier les sources des particules (même s'il faut reconnaître que cela pourrait être une tâche complexe), la Convention, telle qu'elle est rédigée, serait difficile à appliquer. Compte tenu du fait que la Convention vise à protéger contre les polluants, cela crée un paradoxe dans la mesure où le MCB et la SAI peuvent ne pas être polluants et peuvent, ou non, être considérés comme des polluants dans le cadre de leur fonction d'atténuation des effets des GES d'origine anthropique, eux-mêmes considérés comme des polluants, bien qu'ils ne figurent pas sur la liste de la Convention.

Convention de Londres de 1972 et Protocole de Londres de 1996 (LC/LP)

Communément appelée « Convention de Londres », la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets ou autres matières a été adoptée en 1972 et est entrée en vigueur en 1975. Le Protocole de Londres de 1996 est entré en vigueur en 2006. Ces deux instruments fonctionnent en parallèle et lorsque le Protocole a été adopté, les parties ont convenu de ne plus apporter de modifications à la Convention. Le Protocole traite directement de la MRS (ainsi que des technologies d'EDC) et il évolue dans le contexte du débat en cours sur la « géo-ingénierie » marine. L'article essentiel est l'article 3.1 qui exige que les Parties « ... appliquent une approche de précaution en matière de protection de l'environnement contre le rejet de déchets ou d'autres matières... ». Cet article est modifié par l'annexe 4 pour intégrer le placement de matières pour les activités de « géo-ingénierie » marine.

Les Parties ont abordé pour la première fois les questions liées aux technologies de modification du climat en juin 2007, lorsqu'une expérience de fertilisation des océans, qui visait à placer des particules de fer dans les océans pour accélérer la croissance du plancton et donc de l'absorption du CO₂, a été proposée (Brahic, 2007). Ensuite, en 2008, la résolution LC-LP.1(1) a décidé que les activités de fertilisation des océans autres que la recherche scientifique légitime étaient contraires aux objectifs de ces deux instruments. En 2010, les Parties ont adopté un cadre d'évaluation pour la recherche scientifique impliquant la fertilisation des océans (OFAF) (résolution LC-LP.2(2)). Bien qu'aucune de ces deux résolutions n'ait été juridiquement contraignante, des amendements visant à réglementer les activités de fertilisation des océans par la résolution LP.4(8) ont été adoptés en 2013. Ces amendements ne s'appliquent ni au MCB, ni à la SAI. Toutefois, la décision des parties de modifier le Protocole en réponse à une technologie susceptible de modifier le climat démontre que, si le MCB ou la SAI devaient conduire à l'introduction de substances potentiellement nocives dans les océans, les Parties pourraient désirer exercer leur pouvoir de réglementation sur la recherche ou le déploiement du MCB et/ou de la SAI.

Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM)

La CNUDM a été adoptée en 1982 et modifiée en 1994 et 1995. La partie XII « Protection et préservation du milieu marin » et la partie XIII « Recherche scientifique marine » couvrent les obligations pertinentes pour la protection de l'environnement au titre de la Convention qui s'appliquent aux activités de MCB. Les principaux articles sont les suivants :

- L'article 192 stipule que les États ont la responsabilité de protéger et de préserver le milieu marin ;
- L'article 194 exige des États qu'ils prennent des mesures pour prévenir, réduire et contrôler la pollution du milieu marin. Cela inclut la pollution due aux GES et aux activités de « géo-ingénierie » marine ;
- L'article 195 interdit le déplacement, direct ou indirect, de dangers ou de polluants d'une zone à une autre ;
- L'article 204, paragraphe 2, exige des États qu'ils surveillent les activités qu'ils autorisent afin de déterminer si celles-ci peuvent entraîner une pollution ;
- L'article 206 oblige les États à évaluer les effets potentiels de leurs activités s'il existe de bonnes raisons de penser que celles-ci peuvent entraîner une pollution et/ou des dommages ;
- L'article 210, paragraphe 6, exige le respect de la Convention de Londres et du Protocole de Londres en matière d'immersion ;
- L'article 240(d) exige que les États veillent à ce que la recherche scientifique marine, qu'elle soit menée dans leur zone de juridiction ou sous leur juridiction ou en haute mer, soit conforme aux dispositions de la CNUDM relatives à la protection du milieu marin ;

- L'article 257 donne aux États et aux organisations internationales compétentes le droit de mener des recherches scientifiques marines dans les mers situées au-delà des limites de la zone économique exclusive (ZEE), c'est-à-dire à l'intérieur du patrimoine mondial ; et
- L'article 263 rend les États et les organisations internationales compétentes responsables de veiller à ce que la recherche soit menée conformément à la Convention.

Les articles 257 et 263 soulèvent des questions intéressantes sur : qui décide de ce qui est et n'est pas une science légitime ; qui et par quels mécanismes les États gardent-ils le contrôle de la science lorsque les équipements, le financement et les informations sont disponibles à grande échelle ; et, comment le déploiement et la recherche peuvent-ils être dissociés aux fins de la Convention, par qui et à quel effet ? L'importance potentielle que peuvent avoir les négociations des Nations Unies pour un nouvel accord international dans le cadre de la CNUDM est une Convention changeante et un processus intergouvernemental est en cours qui conduira à un instrument international juridiquement contraignant dans le cadre de la Convention, sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine des zones qui échappent à la juridiction nationale.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

Adoptée en 1992, la CCNUCC apporte un cadre général aux efforts intergouvernementaux de lutte contre le changement climatique et pourrait jouer un rôle dans la gouvernance mondiale des technologies de modification du climat telles que la SAI et le MCB à l'avenir. Toutefois, on ne sait pas encore très bien quel pourrait être ce rôle, le cas échéant. Dans ce contexte, les trois éléments clés de la Convention sont les suivants :

- Préambule – « Affirmant que les mesures prises pour parer aux changements climatiques doivent être étroitement coordonnées avec le développement social et économique de manière intégrée afin d'éviter toute incidence néfaste sur ce dernier, compte pleinement tenu des besoins prioritaires légitimes des pays en développement, à savoir une croissance économique durable et l'éradication de la pauvreté » ;
- Article 2 – L'objectif ultime de la présente Convention et de tous les instruments juridiques connexes que la Conférence des Parties pourrait adopter est de stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable » ; et,
- Article 4(1)(d) – « Encouragent la gestion rationnelle et encouragent et soutiennent par leur coopération la conservation et, le cas échéant, le renforcement des puits et réservoirs de tous les gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal, notamment la biomasse, les forêts et les océans de même que les autres écosystèmes terrestres, côtiers et marins. »

Les articles 2 et 4 ci-dessus sont mentionnés dans le contexte des craintes liées à l'aléa moral selon lesquelles la SAI ou le MCB, s'ils sont déployés, peuvent contrebalancer les efforts de réduction des émissions des GES.

Accord de Paris de 2015

Adopté en décembre 2015, l'Accord de Paris est un accord conclu dans le cadre de la CCNUCC. L'objectif principal de l'Accord est d'affermir la réponse mondiale à la menace du changement climatique en maintenant l'augmentation de la température mondiale au cours de ce siècle nettement en dessous des 2° C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre les efforts pour limiter encore davantage l'augmentation de la température à 1,5° C. Dans une analyse de l'accord, Craik et Burns (2016) ont laissé entendre que, bien que la SAI ne soit pas placée sous les auspices de l'Accord, elle serait susceptible de fournir les instruments et les mécanismes de procédure pour aider à satisfaire les demandes de transparence, apporter un forum pour le débat public sur le déploiement de la SAI et du MCB, définir éventuellement des mécanismes de marché pour financer tout déploiement futur et créer une structure de contrôle et de vérification. Dans une analyse ultérieure de la façon dont les technologies de modification du climat pourraient être intégrées avec succès dans le champ d'application de l'Accord, Craik et Burns (2019) ont identifié le besoin de clarté sur le fonctionnement des structures de comptabilité et d'incitation pour ces technologies.

La Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le Protocole de 1978 (MARPOL)

Élaborée par l'Organisation maritime internationale (OMI) pour réduire au maximum la pollution des océans et des mers, la convention MARPOL porte sur les rejets, le pétrole et la pollution atmosphérique provoqués par les navires. Elle est entrée en vigueur en 1983 et 156 États sont des parties de la Convention. Les examens des mécanismes de gouvernance internationale relatifs à la MRS n'ont généralement pas discuté de la Convention, bien que Talberg et al. (2017) mentionnent la convention MARPOL par rapport à la fertilisation des océans. Selon la façon dont les particules de MCB, si jamais elles étaient déployées à partir de navires, sont interprétées par l'OMI et les signataires à l'avenir, la technique pourrait éventuellement être soumise à la Convention. Toutefois, le rôle que joue cette technique reste flou.

Gouvernance de la recherche

À l'heure actuelle, aucun chercheur ne plaide en faveur du déploiement de la MRS à l'échelle du climat et la plupart des travaux visent à acquérir une meilleure compréhension du potentiel de la MRS et de ses effets, principalement par le biais de la modélisation et la recherche en laboratoire. Certains prévoient également d'entreprendre des essais sur le terrain, par exemple des essais de MCB au-dessus de la Grande Barrière de corail et un déploiement à très petite échelle de particules dans la stratosphère. De telles recherches sont actuellement régies par les protocoles de recherche normaux des institutions et des organismes professionnels. Toutefois, la recherche sur la MRS fait l'objet de controverses et soulève de nombreuses questions. Cela incite en partie certains à promouvoir l'idée d'un code de conduite volontaire pour la recherche sur la MRS, alors qu'aux États-Unis, il existe des propositions visant à confier des responsabilités limitées en matière de surveillance à une agence scientifique nationale (voir ci-dessous).

L'initiative pour la gouvernance de la modification du rayonnement solaire (SRMGI), un projet international mené par des ONG et visant à étoffer les discussions mondiales sur la gouvernance de la recherche sur la MRS, a relevé les questions clés suivantes (SRMGI, 2019) :

- Qui décide si la recherche se poursuit, et sur quoi celle-ci devrait porter?
- Qui paie pour la recherche ? Qui en bénéficie ?
- Qu'est-ce qui garantit que la recherche est menée en toute transparence et que tous les résultats sont partagés de manière ouverte ?
- Comment les différentes priorités de recherche des différents groupes peuvent-elles être entendues ?
- Que peut-on faire pour veiller à ce que la recherche sur la MRS ne détourne pas l'attention du public et des politiciens de la tâche de réduire les émissions de gaz à effet de serre ?

Avec le temps, les essais sur le terrain pourraient entraîner une perturbation du climat, ce qui se traduirait par une application de la MRS dont les effets et les risques sont incertains et difficiles à prévoir (Robock, 2009). Savoir où se situe la frontière entre la recherche et l'application en matière de gouvernance est une question qui reste sans réponse et s'est posée la question de savoir s'il fallait mettre une ligne de démarcation entre les deux ou si l'évolution de la technologie, depuis la modélisation et la recherche en laboratoire jusqu'aux essais atmosphériques à grande échelle, devait être traitée comme un continuum à des fins de gouvernance (SRMGI, 2011 et Parker, 2014). Parsons et Keith (2013) ont laissé entendre qu'une mesure de l'effet de refroidissement en Watts par mètre carré de travail sur le terrain serait adéquate. D'autres mesures, telles qu'une forme d'indicateur de la réponse sociale, ont également été proposées (Sugiyama, 2017). Si une ligne de délimitation est nécessaire, on ne sait pas très bien ce qu'elle pourrait être et qui pourrait en décider, la contrôler et la vérifier.

À la lumière des questions complexes associées à ce programme, plusieurs codes de conduite non contraignants ont été élaborés par les acteurs actifs de la MRS et d'autres technologies de modification du climat, comme les principes d'Oxford (Rayner et al., 2009), les principes d'Asilomar pour la recherche sur les techniques d'ingénierie climatique (Asilomar, 2010), le Code de conduite pour une recherche responsable en géo-ingénierie (Hubert, 2017) et l'Academic Working Group on Climate Engineering Governance (Groupe de travail universitaire sur la gouvernance de l'ingénierie climatique) (Netra et al., 2018). Ces principes ou codes reconnaissent tous que la transparence dans la prise de décision, la participation du public et la publication ouverte des résultats de la recherche sont essentielles pour garantir un plus grand engagement possible du public et sa confiance dans la gouvernance de la recherche sur la MRS (et plus généralement sur les

technologies de modification du climat). Pourtant, bien que ces codes encouragent les chercheurs à agir de manière responsable et mesurée, étant donné que ceux-ci sont bénévoles et qu'il n'y a pas de renoncement possible, ils ne pourraient pas dissuader un chercheur engagé.

La proposition de loi américaine Atmospheric Climate Intervention Research Act - H.R.5519 (ACIRA, 2019), si elle est adoptée, élaborerait non seulement un programme de recherche sur les modifications du climat à la NOAA (Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique), mais accorderait également à l'Agence l'autorité de surveillance nécessaire pour examiner les expériences de SAI et de MCB et en rendre compte au gouvernement américain. La portée de ces pouvoirs, s'ils sont accordés, reste floue à ce stade, dans l'attente des éclaircissements et des discussions qui surgiront au fil de l'avancée du projet de loi. Il existe cependant un certain potentiel pour l'évolution d'un nouveau mécanisme de gouvernance de la recherche aux États-Unis sous les auspices de ce projet de loi, auquel d'autres États s'intéressent.

Autres forums ou processus

En plus de ceux décrits plus haut, d'autres forums ou processus pourraient être impliqués dans la gouvernance des technologies de modification du climat, notamment l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement, l'Assemblée générale des Nations Unies, le Conseil de sécurité des Nations Unies, les États-nations, les organisations régionales telles que l'Union africaine et l'Union européenne, les groupes de recherche, les OSC, les intérêts commerciaux et les différents publics.

Conclusions

Le blanchiment des nuages marins et l'injection d'aérosols dans la stratosphère, deux types de technologie de modification du rayonnement solaire, ont été décrits et leur état de préparation technique, les recherches en cours, les cadres de gouvernance applicables et d'autres enjeux d'ordre sociopolitique ont été examinés. Dans le cadre de cette analyse, une série de questions géopolitiques, notamment de sécurité, que ces technologies peuvent soulever ont été abordées, ainsi que la manière dont les instruments de gouvernance existants permettent ou non de résoudre ces questions.

Actuellement, il n'existe aucune mesure, autre que le « soft power » (pouvoir de convaincre), capable d'empêcher les chercheurs ou les États de procéder à des essais sur le terrain ou à des déploiements à l'échelle du climat. Puisque les questions géopolitiques et de sécurité identifiées englobent le potentiel théorique de conflit militaire, l'augmentation des tensions entre les pays ou les régions, la mise à rude épreuve de la diplomatie climatique et de la coopération internationale au sens large, le contre-déploiement avec la contestation et les troubles civils qui y sont associés, il est suggéré que des discussions préliminaires sur la forme de gouvernance de ces technologies sont nécessaires.

Références

- ACIRA 2019 H.R.5519 - Atmospheric Climate Intervention Research Act. The House of representatives, US. Disponible à <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/5519/text?r=15&s=1>
- AHLM, L. JONES, A. STJERN, C. MURI, C. KRAVITZ, B & KRISTJÁNSSO, J 2017 Marine cloud brightening—as effective without clouds. *Atmospheric Chemistry Physics*. Vol. 17, 13071–13087. Disponible à <https://doi.org/10.5194/acp-17-13071-2017>
- ALBRECHT, B., A. 1989. Aerosols, cloud physics and fractional cloudiness. *Science*, 245, 1227-1230. Disponible à <https://science.sciencemag.org/content/245/4923/1227>
- ARMENI, C. & REDGWELL, C. 2015. International legal and regulatory issues of climate geoengineering governance: rethinking the approach. *Climate Geoengineering Governance Working Paper Series*. 09 March 2015: University College London, University of Oxford and University of Sussex.
- ASAYAMA, S. & HULME, M. 2019. Engineering climate debt: temperature overshoot and peak-shaving as risky subprime mortgage lending. *Climate Policy*, 19, 937-946. Disponible à <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1623165>
- ASILOMAR 2010. The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques 2010 Prepared by the Asilomar Scientific Organizing Committee November 2010 Climate Institute Washington DC. Disponible à <http://www.climateresponsefund.org/images/Conference/finalfinalreport.pdf>
- BARRETT, S. 2014. Solar geoengineering's brave new world: Thoughts on the governance of an unprecedented technology. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8, 249–269. Disponible à <https://doi.org/10.1093/reep/reu011>
- BARRETT, S. 2019. Some Thoughts on Solar Geoengineering Governance p 33 in *Governance of the Deployment of Solar Geoengineering*. Edited by Robert N. Stavins and Robert C. Stowe. Cambridge, Mass. Harvard Project on Climate Agreements, February 2019.
- BAUM, S., MAHER JR., T. & HAQQ-MISRA, J., 2013. Double Catastrophe: Intermittent Stratospheric Geoengineering Induced by Societal Collapse. *Environment, Systems and Decisions*, 33(1), pp.168 – 180
- BELLAMY, R., CHILVERS, J., VAUGHAN, N. & LENTON, T. 2012. A review of climate geoengineering appraisals. *Wiley Interdisciplinary Review of Climate Change*, 3, 597-615. Disponible à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.197>
- BELLAMY R, LEZAU J, PALMER J, 2017 Public perceptions of geoengineering research governance: An experimental deliberative approach *Global Environmental Change* Volume 45, July 2017, 194-202. Disponible à <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:d0805ee4-cffd-4de5-a46d-568676f21cf4>
- BERDAHL, M., ROBOCK, A., JI, D., MOORE, J. C., JONES, A., KRAVITZ, B. & WATANABE, S. 2014. Arctic cryosphere response in the Geoengineering Model Intercomparison Project G3 and G4 scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 1308-1321. Disponible à <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JD020627>
- BOWER, K. & CHOULARTON, T. 2008. Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 366, 3969-87.
- BRAHIC, C. 2009. Hacking the planet: The only climate solution left? *New Scientist*. Special report 25 Feb. 2009. Disponible à <https://www.newscientist.com/article/mg20126973-600-hacking-the-planet-the-only-climate-solution-left/>
- BRAUN, C., MERK, C., PÖNITZSCH, G., REHDANZ, K. & SCHMIDT, U. 2018. Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence. *Climate Policy*, 18, 471-484. Disponible à <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2017.1304888>
- BRIGGS, C. M. (2013). Is Geoengineering a National Security Risk? *Geo-engineering Our Climate Blog*. Disponible à <http://wp.me/p2zsRk-8U>
- BRF 2018. Barrier Reef Foundation. Media release: Reef 'sun shield' trials show promise to prevent coral bleaching. 27 March 2018. Disponible à <https://www.barrierreef.org/latest/news/reef-sun-shield-trials-show-promise-to-prevent-coral-bleaching>
- BRZOSKA, M., LINK, M. & NOTZ, N. 2012. Geoengineering - möglichkeiten und risiken Sicherheit and Frieden, 30, 185 - 193. Disponible à <https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/0175-274x-2012-4-185/geoengineering-moeglichkeiten-und-risiken-jahrgang-30-2012-heft-4>
- BUCK, H. 2012. Geoengineering: Re-making Climate for Profit or Humanitarian Intervention? *Development and Change*, 43, 253-270.
- BUCK, H. J. 2018. Perspectives on solar geoengineering from Finnish Lapland: Local insights on the global imaginary of Arctic geoengineering. *Geoforum*, 91, 78-86.
- BULKELEY, H. & NEWELL, P. 2010. *Governing Climate Change*, Manchester, Routledge.

- CAIRNS, R. 2014. Discussion paper: Will Solar Radiation Management enhance global security in a changing climate? Climate Geoengineering Governance Project. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series: 016. 12 November 2014. Disponible à <https://core.ac.uk/download/pdf/30610485.pdf>
- CAN, 2019. CLIMATE ACTION NETWORK Position on Solar Radiation Modification (SRM) September 2019. Climate Action International (CAN). Disponible à http://www.climateactionnetwork.org/sites/default/files/can_position_solar_radiation_management_srm_september_2019.pdf
- CARR, P & PRESTON, C. 2017 Skewed Vulnerabilities and Moral Corruption in Global Perspectives on Climate Engineering Environmental Values 26 (2017): 757-777. Disponible à <https://ideas.repec.org/a/env/journal/ev26ev2630.html>
- CBD 2008. COP 9 Decision IX/16 Biodiversity and climate change. Convention on Biological Diversity. Disponible à <https://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-09>
- CBD 2010. COP 10 Decision X/33. Convention on Biological Diversity. Disponible à <https://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-10>
- CHALECKI, E. & FERRARI, L. 2018. A New Security Framework for Geoengineering. Strategic Studies Quarterly, 82-106. Disponible à https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/SSQ/documents/Volume-12_Issue-2/Chalecki_Ferrari.pdf
- CLRTAP, U. 1979. UN Convention on Long-range Trans Boundary Air Pollution.
- COLLOMB, J. 2019. US Conservative and Libertarian Experts and Solar Geoengineering: An Assessment, European journal of American studies 14-2 2019. Disponible à <http://journals.openedition.org/ejas/14717>
- COOPER, Q. 2011. Engaging with geoengineering. Material World. BBC Radio 4: British Broadcasting Corporation. Disponible à <http://www.bbc.co.uk/programmes/b006qyyb>
- CORRY, O. 2017 The international politics of geoengineering: The feasibility of Plan B for tackling climate change. Security Dialogue. 2017;48(4):297-315. doi:10.1177/0967010617704142
- CRAIK, A. & BURNS, W 2016 Climate Engineering under the Paris Agreement: A Legal and Policy Primer. Special report. Centre for International Governance Innovations. Disponible à <https://www.cigionline.org/sites/default/files/documents/GeoEngineering%20Primer%20-%20Special%20Report.pdf>
- CRAIK, A. & BURNS, W 2019 Climate Engineering under the Paris Agreement. The Environmental Law Reporter. Vol 49 (12) December 2019. Disponible à <https://elr.info/news-analysis/49/11113/climate-engineering-under-paris-agreement>
- CRUTZEN, P. 2006. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulphur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? Climatic Change, 77, 211-220. Disponible à <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-006-9101-y>
- DAILY MAIL. 2011. A helium balloon the size of Wembley Stadium and a 14-mile garden hose: How scientists plan to cool down the planet. The Daily Mail, 1 September 2011.
- DEPLEDGE, J. 2005. The Organization of Global Negotiations: Constructing the Climate Change Regime, Earthscan from Routledge.
- EFFIONG, U. & NEITZEL, R. 2016. Assessing the direct occupational and public health impacts of solar radiation management with stratospheric aerosols. Environmental Health, 15.
- ELLIS-JONES, F. 2017 Great Barrier Reef: Making clouds brighter could help to curb coral bleaching, scientists say, ABC News, 2017. Disponible à <http://www.abc.net.au/news/2017-04-25/cloud-brightening-could-help-cool-great-barrier-reef/8469960>
- ETC 2011. RE: The Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) project. Open Letter to Chris Huhne, MP Secretary of State for Energy and Climate Change ed. Disponible à http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/NR%20SPICE%20270911_3.pdf
- EYRING, V., ISAKSEN, I. S. A., BERNTSEN, T., COLLINS, W. J., CORBETT, J. J., ENDRESEN, O., GRAINGER, R. G., MOLDANOVA, J., SCHLAGER, H. & STEVENSON, D. S. 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. Atmospheric Environment, 44, 4735-4771.
- GARDINER, S 2010 'Is arming the future with geoengineering really the lesser evil?' in S. Gardiner et al. (eds) Climate Ethics (Oxford: Oxford University Press), pp. 284-312.
- GeoMIP (2020) Geoengineering Model Intercomparison Project. Information available at <http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/index.html> GESAMP 2019. High Level Review of a Wide Range of Proposed Marine Geoengineering Techniques. GESAMP Reports and Studies. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environment Protection. Disponible à <http://www.gesamp.org/publications/high-level-review-of-a-wide-range-of-proposed-marine-geoengineering-techniques>
- GENUS, A. & STIRLING, A. 2018. Collingridge and the dilemma of control: Towards responsible and accountable innovation. Research Policy, 47, 61-69. Disponible à <http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/71319>
- GERTNER, J (2017) Is it O.K. to tinker with the environment to fight climate change? The New York Times. Disponible à <https://www.nytimes.com/2017/04/18/magazine/is-it-ok-to-engineer-the-environment-to-fight-climate-change.html>

- HECKENDORN, P., WEISENSTEIN, D., FUEGLISTALER, S., LUO, B. P., ROZANOV, E., SCHRANER, M., THOMASON, L. W., AND PETER, T. 2009 The Impact of Geoengineering Aerosols on Stratospheric Temperature and Ozone, *Environ. Res. Lett.*, 4, 045108, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045108,
- HERSH, S. 1972. Rainmaking is used as weapon by U.S. *The New York Times*, 3 July 1972. Disponible à <https://www.nytimes.com/1972/07/03/archives/rainmaking-is-used-as-weapon-by-us-cloudseeding-in-indochina-is.html>
- HORTON, J. B., REYNOLDS, J. L., BUCK, H. J., CALLIES, D., SCHÄFER, S., KEITH, D. W. & RAYNER, S. 2018. Solar Geoengineering and Democracy. *Global Environmental Politics*, 18, 5-24. Disponible à https://www.mitpressjournals.org/doi/full/10.1162/glep_a_00466
- HORTON, J. 2019. Evaluating Solar Geoengineering Deployment Scenarios in Governance of the Deployment of Solar Geoengineering. Edited by Robert N. Stavins and Robert C. Stowe. Cambridge, Mass.: Harvard Project on Climate Agreements, February 2019.
- HUBERT, A. M., 2017 Code of Conduct for Responsible Geoengineering Research October 2017. Disponible à <https://www.ucalgary.ca/grgproject/files/grgproject/revised-code-of-conduct-for-geoengineering-research-2017-hubert.pdf>
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon SD, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquie M, Averyt KB, Tignor M and Miller HL (eds). Cambridge University Press: Cambridge and New York. Disponible à <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- IPCC 2018. International Panel on Climate Change Special report on Global Warming of 1.5 degrees. Disponible à <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IRVINE, P. J., LUNT, D. J., STONE, E. J. & RIDGWELL, A. 2009. The fate of the Greenland Ice Sheet in a geoengineered, high CO₂ world. *Environmental Research Letters*, 4, 045109. Disponible à https://research-information.bristol.ac.uk/files/34705839/1748_9326_4_4_045109.pdf
- JAMIESON, D. 2013. Some what's, whys and worries of geoengineering. *Climatic Change*, 121, 527-537. Disponible à <https://as.nyu.edu/content/dam/nyu-as/faculty/documents/JamiesonWhysandWherefores.pdf>
- JIANG, J., CAO, L., MACMARTIN, D. G., SIMPSON, I. R., KRAVITZ, B., CHENG, W., VISIONI, D., TILMES, S., RICHTER, J. H. & MILLS, M. J. 2019. Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering Could Alter the High-Latitude Seasonal Cycle. *Geophysical Research Letters*, 46, 14153-14163.
- JONES, A. 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(17), pp.9743-9752. Disponible à <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50762>
- KEITH, D. W. 2013. *A Case for Climate Engineering*. Boston Review Books. Cambridge, USA, MIT Press.
- KEITH, D. W., WEISENSTEIN, D. K., DYKEMA, J. A. & KEUTSCH, F. N. 2016. Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 14910-14914. Disponible à <https://www.pnas.org/content/113/52/14910>
- KELLEY, C. P., MOHTADI, S., CANE, M. A., SEAGER, R. & KUSHNIR, Y. 2015. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201421533. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25733898>
- KOSGUI, T. 2011. Climate-economy modelling considering solar radiation management and its termination risk. 1st International Conference on Simulation and Modelling Methodologies, Technologies and Applications. Disponible à <https://www.scitepress.org/Papers/2011/35800/pdf/index.html>
- KRAVITZ, B., MACMARTIN, D. G. & CALDEIRA, K. 2012. Geoengineering: Whiter skies? *Geophysical Research Letters*, 39. Disponible à <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/journal/19448007>
- KRAVITZ, B., WANG, H., RASCH, P., MORRISON, H. & SOLOMON, A. 2014. Process-model simulations of cloud albedo enhancement by aerosols in the Arctic. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 372, 20140052. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25404677>
- KRISHNAMOHAN, K. P. S. P., BALA, G., CAO, L., DUAN, L. & CALDEIRA, K. 2019. Climate system response to stratospheric sulfate aerosols: sensitivity to altitude of aerosol layer. *Earth Systems Dynamics* 10, 885-900.
- LABITZKE, K. G. & VAN LOON, H. 2012. *The stratosphere: phenomena, history, and relevance*, Springer Science & Business Media. Disponible à <https://www.springer.com/gp/book/9783642636370>
- LATHAM, J., RASCH, P., CHEN, C. C., KETTLES, L., GADIAN, A., GETTELMAN, A., MORRISON, H., BOWER, K. & CHOULARTON, T. 2008. Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366, 3969-3987.

- LAWRENCE, C. R. & NEFF, J. C. 2009. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition. *Chemical Geology*, 267, 46-63. Disponible à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254109000655>
- LIN, A. C. 2012. Does Geoengineering Present a Moral Hazard? *Ecology Law Quarterly* 40, 673. Disponible à <https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/eclawq40&div=32&id=&page=>
- LLOYD, I. & OPPENHEIMER, M. 2014. On the Design of an International Governance Framework for Geoengineering. *Global Environmental Politics*, 14, 45-63.
- LOCKLEY, A 2019. Security of solar radiation management geoengineering. *Front. Eng. Manag.* 2019, 6(1): 102–116. Disponible à <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0008-5>
- MCCORMICK, M. P., THOMASON, L. W. & TREPTE, C. R. 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373, 399-404. Disponible à <https://www.nature.com/articles/373399a0>
- MCDONALD, J., MCGEE, J., BRENT, K. & BURNS, W. 2019. Governing geoengineering research for the Great Barrier Reef. *Climate Policy*, 19, 801-811. Disponible à <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1592742>
- MCLAREN, D.P. 2016 Mitigation deterrence and the “moral hazard” of solar radiation management. *Earth’s Future*, 4: 596-602. doi:10.1002/2016EF000445
- MCLAREN, D.P. 2018. Whose climate and whose ethics? Conceptions of justice in solar geoengineering modelling, *Energy Research & Social Science* 44, 209-221)
- MACKERRON, G. 2014. Costs and economics of geoengineering. *Climate Geoengineering Governance Working Paper Series*. Number 013. Oxford Martin School, University of Oxford, UK. Disponible à <http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/resources/workingpaper13mackerroncostsandeconomicsofgeoengineering.pdf>
- MACNAGHTEN, P. & OWEN, R. 2011. Environmental science: Good governance for geoengineering. *Nature*, 479, 293-293. Disponible à <https://www.nature.com/articles/479293a>
- MACNAGHTEN, P. & SZERSZYNSKI, B. 2013. Living the global social experiment: an analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance. *Global Environmental Change*, 23, 465-474. Disponible à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012001483?via%3Dihub>
- MATTHEWS, H. D. & CALDEIRA, K. 2007. Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 9,949–54. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17548822>
- MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, H.-O. PÖRTNER, D. ROBERTS, J. SKEA, P.R. SHUKLA, A. PIRANI, W. MOUFOUMA-OKIA, C. PÉAN, R. PIDCOCK, S. CONNORS, J.B.R. MATTHEWS, Y. CHEN, X. ZHOU, M.I. GOMIS, E. LONNOY, T. MAYCOCK, M. TIGNOR, AND T. WATERFIELD 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- MERCADO, L. M., BELLOUIN, N., SITCH, S., BOUCHER, O., HUNTINGFORD, C., WILD, M. & COX, P. M. 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 458, 1014-1017. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19396143>
- MERK, C., PÖNITZSCH, G., KNIEBES, C., REHDANZ, K. & SCHMIDT, U. 2015. Exploring public perceptions of stratospheric sulphate injection. *Climatic Change*, 130, 299-312. Disponible à <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130169/1/85620837X.pdf>
- MONBIOT, G. 2011. A balloon and hosepipe as the answer to climate change? It’s just pie in the sky. *The Guardian*, 2 September 2011.
- MORROW, D. R. 2019. A mission-driven research program on solar geoengineering could promote justice and legitimacy. *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 1-23
- MORTON, O. 2015. *The planet remade. How geoengineering could change the world*. Granta Books, UK.
- NALAM, A., GOVINDASAMY, B. & MODAK, A. 2017. Arctic Geoengineering: Effects on precipitation in tropical monsoon regions. Disponible à <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3810-y>
- NALAM, A., BALA, G. & MODAK, A. 2018. Effects of Arctic geoengineering on precipitation in the tropical monsoon regions. *Climate Dynamics*, 50, 3375-3395. Disponible à <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3810-y>
- NETRA, C, CHONG D, CONCA K, FALK R, GILLESPIE A, GUPTA A, JINNAH S, KASHWAN P, LAHSEN M, LIGHT A, MCKINNON C, THIELE L P, VALDIVIA W, WAPNER P, MORROW D, TURKALY C, NICHOLSON S., 2018. *Governing Solar Radiation Management*. Washington, DC: Forum for Climate Engineering Assessment, American University. Disponible à <https://doi.org/10.17606/M6SM17>

- NIGHTINGALE, P., & CAIRNS, R. (2014). The security implications of geoengineering: Blame, imposed agreement and the security of critical infrastructure. Arts and Humanities Research Council. Disponible à <http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/>
- NISBET, M. C. 2019 Climate Philanthropy and the Four Billion (Dollars, That Is). Issues in science and policy Winter 2019. Disponible à <https://issues.org/wp-content/uploads/2019/01/Nisbet-Sciences-Publics-Politics-34-36-Winter-2019.pdf>
- PARK, C.-E., JEONG, S.-J., FAN, Y., TJIPUTRA, J., MURI, H. & ZHENG, C. 2019. Inequal Responses of Drylands to Radiative Forcing Geoengineering Methods. Geophysical Research Letters, 46, 14011-14020
- PARKER, A. 2014. Governing solar geoengineering research as it leaves the laboratory. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences., 372. Disponible à <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2014.0173>
- PARKER, A., HORTON, J. B., & KEITH, D. W. (2018). Stopping solar geoengineering through technical means: A preliminary assessment of counter-geoengineering. Earth's Future, 6, 1058-1065. Disponible à <https://doi.org/10.1029/2018EF000864>
- PARKER, A & IRVINE, P. 3/11/2018. The Risk of Termination Shock from Geoengineering. Earth's Future, 6, Pp. 456-467. Disponible à <https://keith.seas.harvard.edu/publications/risk-termination-shock-solar-geoengineering>
- PARKES, B., GADIAN, A. & LATHAM, J. 2012. The Effects of Marine Cloud Brightening on Seasonal Polar Temperatures and the Meridional Heat Flux. ISRN Geophysics, 2012, 7. Disponible à <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/142872/>
- PARSON, E. A., & ERNST, L. N. (2013). International governance of climate engineering. Theoretical Inquiries in Law, 14, 12-23. Disponible à <https://doi.org/10.1515/til-2013-015>
- PARSON, E. & KIETH, D. W. 2013. End the Deadlock on Governance of Geoengineering Research. Science, 339, 1278-1279. Disponible à <https://www.uvic.ca/research/centres/globalstudies/assets/docs/publications/End-the-Deadlock-on-Governance-of-Geoengineering-Research-Parson-and-Keith.pdf>
- PARTHASARATHY, S., RAYBURN, L., ANDERSON, M., MANNISTO, J., MAGUIRE, M. & NAJIB, N. 2010. Geoengineering in the Arctic: Defining the Governance Dilemma Science, Technology, and Public Policy Program. Environmental Research Letters, 4.
- PIELKE, R 2019 When Is Climate Change Just Weather? What Hurricane Dorian Coverage Mixes Up, On Purpose. Forbes, 4 September 2019. Disponible à <https://www.forbes.com/sites/rogerpielke/2019/09/04/when-is-climate-change-just-weather-what-hurricane-dorian-coverage-mixes-up-on-purpose/influence-on-sea-ice-and-climate-system>
- PIDGEON, N., CORNER, A., PARKHILL, K., SPENCE, A., BUTLER, C. & POORTINGA, W. 2012. Exploring early public responses to geoengineering. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 370, 4176-96. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22869796>
- RASCH, P., TILMES, S., TURCO, R., ROBOCK, A., OMAN, L., CHEN, J., STENCHIKOV, G. L. & GARCIA, R. 2008. An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols Phil. Trans. Royal Society A, 366, 4007-403.
- RAYNER, S, KRUGER, T. SAVULESCU, J. 2009 The Oxford Principles of geoengineering research. Disponible à <http://www.geoengineering.ox.ac.uk/www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/history/index.html>
- REDGWELL, C. 2011. Geoengineering the climate: Technological solutions to mitigation – failure or continuing carbon addiction? Carbon & Climate Law Review, 5. Disponible à <https://cclr.lexion.eu/article/cclr/2011/2/177>
- REYNOLDS, J. 2019. Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 475, 20190255. Disponible à <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2019.0255>
- RICKE, K. L., MORGAN, M. G., & ALLEN, M. R. (2010). Regional climate response to solar-radiation management. Nature Geoscience, 3, 537-541. Disponible à <https://doi.org/10.1038/ngeo915>
- ROBOCK, R. 2008. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. Bulletin of the Atomic Scientists 64, 14-18.
- ROBOCK, A., MARQUARDT, A., KRAVITZ, B. & STENCHIKOV, G. L. 2009. The practicality of geoengineering. In: UNIVERSIT, R. (ed.) Submitted to Geophysical Research Letters. Online.
- ROBOCK, A. 2018. Stratospheric Sulphur Geoengineering—Benefits and Risks American Metrological Society 98th Annual Meeting Austin, Texas.
- ROUSE, P. 2018. How to govern the risks of stratospheric aerosol injection solar radiation management. PhD, University of Southampton. Disponible à <https://eprints.soton.ac.uk/424730/>
- ROSS, M. N. & SHEAFFER, P. M. 2014. Radiative forcing caused by rocket engine emissions. Earth's Future, 2, 177-196. Disponible à <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013EF000160>
- RUSSELL, L., RASCH, P., MACE, G., JACKSON, R., SHEPHERD, J., LISS, P., LEINEN, M., SCHIMEL, D., VAUGHAN, N., JANETOS, A., BOYD, P., NORBY, R., CALDEIRA, K., MERIKANTO, J., ARTAXO, P., MELILLO, J. & MORGAN, M. G. 2012. Ecosystem impacts of

- geoengineering: A Review for developing a science plan. *AMBIO*, 41, 350-369. Disponible à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3393062/>
- RUSSELL, L. M., SOROOSHIAN, A., SEINFELD, J. H., ALBRECHT, B. A., NENES, A., AHLM, L. WONASCHÜTZ, A 2013. Eastern pacific emitted aerosol cloud experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 709-729. Disponible à <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/eastern-pacific-emitted-aerosol-cloud-experiment>
- RUTTINGER, L., SMITH, D., STANG, G., TÄNZLER, D., VIVEKANANDA, J., BROWN, O., CARIUS, A., DABELKO, G., DE SOUZA, R.-M., MITRA, S., NETT, S., PARKER, M. & POHL, B. 2015. A new climate for peace - taking action on climate and fragility risks. An independent report commissioned by the G7 members - Submitted under the German G7 Presidency. Disponible à <https://www.newclimateforpeace.org/thematic-reading/risk-briefings>
- RUZ, C. 2011. Scientists criticise handling of pilot project to 'geoengineer' climate. *The Guardian*, 17 November 2011.
- SALTER, S. SORTINO, G. & LATHAM, J. 2008 Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Disponible à <http://doi.org/10.1098/rsta.2008.0136>
- SAREWITZ, D. 2010. Not by experts alone. *Nature*, 466. Disponible à <https://www.nature.com/articles/466688a>
- SHELLNHUBER, H.J., 2011. Geoengineering: the good, the MAD, and the sensible. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(51), pp.20277-8. Disponible à <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3251148&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- SCHRAND, A., HUANG, H., CARLSON, C., SCHLAGER, J., ŌSAWA, E., HUSSAIN, S. & DAI, L. 2007. Are diamond nanoparticles cytotoxic? *The Journal of Physical Chemistry B*, 111, 2-7. Disponible à <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp066387v>
- SCOPEX. 2019. Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCOPEX) [Online]. 12, Oxford St, Cambridge, MA 02138, USA: Harvard University. Disponible à <https://projects.iq.harvard.edu/keutschgroup/scopex>
- SCOTT, K. N. (2013). International Law in the Anthropocene: Responding to the Geoengineering Challenge. *Michigan Journal of International Law*, 34(2), 309-358. Disponible à <https://repository.law.umich.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1004&context=mjil>
- SCOTT, K. N. (2015). Geoengineering and the marine environment. In R. Rayfuse (Ed.), *Research Handbook on International Marine Law* (pp. 451-472). Edward Elgar Publishing.
- SHAH, A 2014 Climate Change Affects Biodiversity. *Global Issues. Social, Political, Economic and Environmental Issues*. Published 19 January 2014. Disponible à <http://www.globalissues.org/article/172/climate-change-affects-biodiversity>
- SHEPHERD, J. 2009. Geoengineering the climate - science, governance and uncertainty. Royal Society Policy Document October 2009. London: The Royal Society.
- SIMPSON, I. R., TILMES, S., RICHTER, J. H., KRAVITZ, B., MACMARTIN, D. G., MILLS, M. J., FASULLO, J. T. & PENDERGRASS, A. G. 2019. The Regional Hydroclimate Response to Stratospheric Sulphate Geoengineering and the Role of Stratospheric Heating. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 12587-12616. SNGA. 2017. Sierra Nevada Geoengineering Awareness. Disponible à <http://sngawareness.weebly.com/>
- SMITH, W and WAGNER, G 2018 Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment *Environmental Research Letters*, Volume 13, Number 1. Disponible à <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae98d>
- SRMGI 2011. Solar radiation management: the governance of research. Environmental Defence Fund, The Royal Society and TWAS. Disponible à https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/projects/solar-radiation-governance/DES2391_SRMGI%20report_web.pdf
- SRMGI 2019. Solar radiation management governance initiative: about the SRMGI Website. Available at www.srmgi.org/
- STAVINS, R & STOWE R 2019 Governance of the Deployment of Solar Geoengineering. Cambridge, Mass.: Harvard Project on Climate Agreements, February 2019. Disponible à https://geoengineering.environment.harvard.edu/files/sgrp/files/harvard_project_sg_governance_briefs_volume_feb_2019.pdf
- STAVINS, R., ZOU, J., BREWER, T., CONTE GRAND, M., DEN ELZEN, M., FINUS, M., et al. (2014). International cooperation: Agreements and instruments.
- IN O. EDENHOFER, R. PICHES-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, et al. (Eds.), *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (chap. 13, pp. 1001-1082). Cambridge, UK: Cambridge University Press
- STILGOE, J. 2015. *Experiment Earth. Responsible innovation in geoengineering*, Abingdon, Oxford, Earthscan.
- STRAUSS, L. 1954. Too cheap to meter, the great nuclear quote debate. This day in quote 16 September 1954. Disponible à <http://www.thisdayinquotes.com/2009/09/too-cheap-to-meter-nuclear-quote-debate.html>

SUGIYAMA, M., ARINO, Y., KOSUGI, T., KUROSAWA, A. & WATANABE, S. 2017. Next steps in geoengineering scenario research: limited deployment scenarios and beyond. *Climate Policy*, 1-9. Disponible à <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2017.1323721>

SYMONS, J. 2019. *Ecomodernism: technology, politics and climate change*. John Wiley and Sons pp224, ISBN 9781509531226

TALBERG, A., CHRISTOFF, P., THOMAS, S., KAROLY, D. 2018 *Int Environ Agreements* 18: 229.

TEMPLE, J. 2017. Harvard scientists moving ahead on plans for atmospheric geoengineering experiments [Online]. MIT. Disponible à <https://www.technologyreview.com/s/603974/harvard-scientists-moving-ahead-on-plans-for-atmospheric-geoengineering-experiments/>

TEMPLE, J. 2019 'The US government has approved funds for geoengineering research' MIT Technology Review, 20 December 2019. Disponible à <https://www.technologyreview.com/s/614991/the-us-government-will-begin-to-fund-geoengineering-research/>

THOMASON, L., BURTON, S., LUO, B. & PETER, T. 2008. SAGE II measurements of stratospheric aerosol properties at non-volcanic levels. *Atmospheric Chemistry Physics*, 8, 983-995.

TILMES, S. & MILLS, M. 2014. Stratospheric sulphate aerosols and planetary albedo. In: FREEDMAN, B. (ed.) *Global Environmental Change*. Dordrecht: Springer Netherlands.

TILMES, S., MILLS, M. J., NIEMEIER, U., SCHMIDT, H., ROBOCK, A., KRAVITZ, B., LAMARQUE, J. F., PITARI, G. & ENGLISH, J. M. 2015. A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment designed for climate and chemistry models. *Geosci. Model Dev.*, 8, 43-49.

TINGLEY, D. & WAGNER, G. 2017. Solar geoengineering and the chemtrails conspiracy on social media. *Palgrave Communications*, 3, 12. Disponible à <https://www.nature.com/articles/s41599-017-0014-3>

UN 1977. Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques. Geneva: UN. UN 2019 Security Council Report, Climate Change and Security, January 2019 Monthly Forecast. Disponible à <https://www.securitycouncilreport.org/monthly-forecast/2019-01/climate-change-and-security.php>

UNEP 1985. The Vienna Convention for the Protection of The Ozone Layer. In: SECRETARIAT, T. O. (ed.). Vienna: UNEP.

UNEP 1987. The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. In: SECRETARIAT, T. O. (ed.). Montreal, Canada.

UNSG 2018. Gaps in international environmental law and environment-related instruments: towards a global pact for the environment. United Nations General Assembly Document A/73/419. November. Disponible à <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27070/SGGaps.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

VICTOR, D. 2008. "On the Regulation of Geoengineering." *Oxford Review of Economic Policy* 24 (2): 322-336. Disponible à <http://doi.org/10.1093/oxrep/grn018>

WAGNER, G., & ZIZZAMIA, D. 2019 Green Moral Hazards. NYU Wagner Research Paper Forthcoming. Disponible à [SSRN: https://ssrn.com/abstract=3486990](https://ssrn.com/abstract=3486990) or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3486990>

WATSON, M. 2012. Testbed news: A personal statement. SPICE - News. Disponible à <http://www.spice.ac.uk/news/view/testbed-news-SPICE>.

WEISENSTEIN, D., KEITH, D. & DYKEMA, J. A. 2015. Solar geoengineering using solid aerosol in the stratosphere. *Atmospheric Chemistry Physics*, 15, 11835-11859. Disponible à <https://www.atmos-chem-phys.net/15/11835/2015/acp-15-11835-2015.html>

WEITZMAN, M. L. 2015. A voting architecture for the governance of free-driver externalities, with application to geoengineering. *Scandinavian Journal of Economics*, 117, 1049-1068. Disponible à <https://doi.org/10.1111/sjoe.2012120>

WOOD, R. 2018 Marine Cloud Brightening: Science, Feasibility and a Plan for Research. Presentation by Robert Wood Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle at Caltech. Disponible à <http://workshop.caltech.edu/geoengineering/presentations/10-wood.pdf>

ZHANG, Z., MOORE, J. C., HUISINGH, D. & ZHAO, Y. 2015. Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. *Journal of Cleaner Production*, 103, 898-907.



Vous trouverez des informations résumées sur les techniques et leur gouvernance sur
Note de politique de C2G : Gouvernance de la modification du rayonnement solaire