

PROGRAMME
CLIMAT,
ÉNERGIE &
SÉCURITÉ

PROMESSES ET RISQUES DE LA GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE

Marine de Guglielmo Weber / Chercheuse au sein du
programme Climat, énergie et sécurité de l'IRIS

Février 2023

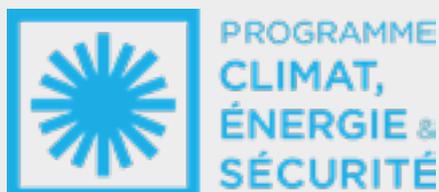


PRÉSENTATION DE L'AUTEUR



Marine de Guglielmo Weber / Chercheuse au sein du programme Climat, énergie et sécurité de l'IRIS

Marine de Guglielmo Weber est chercheuse au sein du programme Climat, énergie et sécurité de l'IRIS. Elle travaille sur les enjeux stratégiques et sécuritaires transverses liés au dérèglement climatique. Elle s'est en outre spécialisée dans l'étude des solutions technologiques développées pour y répondre, notamment les pratiques et techniques de modification de la météo et du climat.



Le programme Climat, énergie et sécurité de l'IRIS étudie la géopolitique du changement climatique, la géopolitique de l'énergie, leurs implications sécuritaires et leurs interactions.

Les champs d'intervention de ce programme sont multiples : animation du débat stratégique ; réalisation d'études, rapports et notes de consultance ; organisation de conférences, colloques, séminaires ; formation sur mesure.



@ClimSec



Programme Climat, énergie & sécurité

iris-france.org



IRIS - Institut de relations internationales et stratégiques



@InstitutIRIS



institut_iris



IRIS



IRIS - Institut de relations internationales et stratégiques

Le concept de « géo-ingénierie », extrêmement fluctuant, englobe une grande variété de techniques et de pratiques visant à modifier, de manière intentionnelle, le système climatique de la planète à grande échelle (Keith, 2000). Depuis l'émergence de ce concept dans les années 1960, la définition, la délimitation, et la catégorisation des techniques et des pratiques auxquelles il renvoie font l'objet d'une confusion singulière, ce notamment depuis les années 2000 du fait de la diversification des acteurs impliqués dans les discussions sur le sujet, autrefois cantonnées à la sphère académique (GIEC, 2012, 2). L'attention médiatique et publique portée à la géo-ingénierie s'est notamment intensifiée à la suite de l'article publié en 2006 par le météorologue Paul Crutzen sur les injections d'aérosols stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injections – SAI*) (Crutzen, 2006). Une série de rapports nationaux ont fait suite à cette publication – à l'instar de celui de la Royal Society en 2009 – de même qu'un rapport du GIEC, exposant les conclusions d'une réunion s'étant tenue sur le sujet en 2011 à Lima (GIEC, 2012). Le GIEC définissait alors la géo-ingénierie en ces termes :

« Un vaste ensemble de méthodes et de technologies qui visent à modifier délibérément le système climatique afin d'atténuer les effets du changement climatique. La plupart de ces méthodes, mais pas toutes, visent soit (a) à réduire la quantité d'énergie solaire absorbée par le système climatique (gestion du rayonnement solaire), soit (b) à augmenter les puits nets de carbone dans l'atmosphère à une échelle suffisamment grande pour modifier le climat (élimination du dioxyde de carbone). L'échelle et l'intention sont d'une importance capitale. Deux caractéristiques clés des méthodes de géo-ingénierie sont particulièrement préoccupantes : elles utilisent ou affectent le système climatique (par exemple, l'atmosphère, la terre ou l'océan) à l'échelle mondiale ou régionale et/ou elles pourraient avoir des effets non intentionnels substantiels qui dépasseraient les frontières nationales » (GIEC, 2012, 2). »

Déjà dans ce rapport, le GIEC pointait l'« ambiguïté » du terme « géo-ingénierie », et soulignait sa volonté de s'en tenir à une terminologie plus spécifique dans les passages du cinquième rapport d'évaluation (AR5) qui seraient consacrés aux techniques et pratiques en question. Pour ce faire, le GIEC se proposait d'aborder de manière individuelle la gestion du rayonnement solaire ou *solar radiation management* (SRM) (a) et l'élimination du CO₂ ou *carbon dioxide removal* (CDR) (b) (GIEC, 2012, 3). Cette même précaution a été appliquée dans le sixième rapport d'évaluation ; le troisième groupe de travail précise ainsi :

« Certains ouvrages utilisent le terme ‘géo-ingénierie’ pour désigner à la fois les techniques de CDR et de SRM lorsqu’elles sont appliquées à l’échelle planétaire (Shepherd 2009 ; GESAMP 2019). Dans ce rapport, le CDR et le SRM sont abordés séparément, en raison de leurs caractéristiques géophysiques très différentes » (GIEC, 2022, 168). »

Bien que les techniques et les pratiques rattachées au concept de géo-ingénierie constituent un ensemble fonctionnel cohérent – leur fonction étant d’intervenir sur le système climatique à l’échelle planétaire pour inverser ou ralentir les changements anthropiques déjà causés – aucune cohérence structurelle ne peut être trouvée entre les techniques et pratiques visant à éliminer le dioxyde de carbone présent dans l’atmosphère et les techniques et pratiques visant à abaisser la chaleur terrestre. Cet hermétisme structurel contribue par ailleurs à la remise en question du concept de « géo-ingénierie » dont les chercheurs en CDR tendent à s’exclure, bien qu’il soit utilisé de manière consensuelle pour les SRM (Volken, 2008). Enfin, si ces deux domaines de recherche partagent la caractéristique commune de relayer une conception « technosolutionniste » des réponses à apporter aux changements climatiques, chacun d’entre eux présente une dynamique particulière qui convient d’être analysée de manière indépendante.

En effet, les techniques et pratiques d’élimination du dioxyde de carbone s’insèrent naturellement dans les mécanismes économiques de comptabilisation et d’échange du carbone mis en place par le protocole de Kyoto (Røttering, 2018). Elles s’intègrent, plus globalement, à l’ensemble des initiatives de « modernisation écologique », cherchant à prolonger la vie des infrastructures fortement émettrices au profit des intérêts économiques des industries polluantes, sans contrarier les objectifs de réduction des émissions carbone à court terme (Low & Boettcher, 2020). Les techniques et pratiques de gestion du rayonnement solaire s’inscrivent dans une dynamique bien différente, en ce qu’il s’agit de neutraliser provisoirement le réchauffement planétaire plutôt que de traiter les causes de ce réchauffement à sa source. En d’autres termes, atténuer les symptômes des changements climatiques afin de gagner du temps sur la mise en place effective de politiques d’atténuation. Si l’on compare ces deux types de géo-ingénierie relativement au degré d’ambition climatique qu’ils présentent, on peut ainsi tirer les observations suivantes : les CDR relaient la promesse selon laquelle les émissions carbone qui ne sont pas réduites à leur source peuvent être éliminées en aval, tandis que les SRM relaient la promesse selon laquelle il est possible d’inverser le réchauffement planétaire, au moins provisoirement, ce indépendamment de la mise en place de toute politique de réduction des émissions. En d’autres termes, les CDR promettent une facilitation technologique des politiques climatiques ; les SRM promettent un

report possible de ces politiques grâce aux développements technologiques. Il est en ce sens probable qu'en cas d'échec des politiques de réduction des émissions adossées aux CDR, les regards se tournent naturellement vers une dernière « promesse techno-scientifique »¹ : celle des SRM, auxquelles nous consacrons cette note. Nous ferons, dans un premier temps, un état des lieux des projets de recherche dans le domaine et des promesses qu'ils relaient, avant d'en explorer les risques.

QUELS PROJETS, QUELLES PROMESSES ? DE LA NORMALISATION À LA COMMERCIALISATION DE LA GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE

Les projets de SRM font déjà, depuis peu, l'objet d'un intérêt croissant au sein des pays développés, au premier chef desquels les États-Unis, où l'université d'Harvard développe le principal programme de recherche sur la géo-ingénierie solaire : le projet SCoPEX (*Stratospheric Controlled Perturbation Experiment*). Selon les données ouvertement accessibles, les États-Unis sont en effet devenus le leader mondial de la recherche en géo-ingénierie solaire, notamment grâce au financement des projets de recherche universitaires par des philanthropes et des mécènes privés (Stephens et al., 2021)². Face à l'inefficacité de la gouvernance internationale du climat, des promoteurs de la géo-ingénierie solaire, tels que Gernot Wagner³ ou David Keith⁴, avancent précisément l'idée selon laquelle il est impératif de maîtriser de telles techniques pour qu'elles puissent rapidement être mises en place dans le cas, de plus en plus probable, où les politiques d'atténuation se révéleraient insuffisantes (Wagner, 2021 ; Keith, 2013). Dans ce contexte, un programme de recherche sur les options de géo-ingénierie solaire a été jugé nécessaire par les National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) dans un rapport publié en mars 2021 (NASEM, 2021).

Aussi constate-t-on une forme de normalisation des projets de géo-ingénierie solaire au sein des milieux de recherche américains, qui les conçoivent comme des initiatives de recherche légitimes (Biermann et al., 2022). Cette normalisation entre plus globalement dans la perspective d'une appréhension technoscientifique des changements climatiques au détriment de leur prise en charge systémique, et a abouti au développement tangible de

¹ Sur le concept de « promesse techno-scientifique », voir les développements de Pierre-Benoît Joly (Joly, 2013).

² Ce leadership états-unien doit cependant être considéré avec prudence, les données sur de potentiels développements technologiques menés par d'autres puissances étant difficilement accessibles. Bien d'autres États, à l'instar de la Russie et de la Chine, pourraient être actifs sur la question sans le communiquer ouvertement.

³ Directeur et fondateur du programme de recherche sur la géo-ingénierie solaire à Harvard.

⁴ Chercheur issu du même programme. Il est également impliqué dans le développement de technologies de capture du carbone.

plusieurs projets de géo-ingénierie solaire, dont la commercialisation d'une technique. Dans cette note, nous laissons de côté les projets visant à augmenter l'albédo des surfaces pour nous concentrer sur les projets d'intervention atmosphérique, qui présentent des risques sécuritaires particuliers. Ces projets se divisent en deux ensembles :

L'ensemencement de nuages, domaine de recherche le plus développé, qui peut avoir deux finalités : d'une part, **l'éclaircissement des nuages marins** (*marine cloud brightening*) pour augmenter leur réflectivité – type de géo-ingénierie le plus développé – et d'autre part, **l'amincissement des cirrus** (*cirrus cloud thinning*) pour diminuer leur capacité d'absorption du rayonnement infrarouge. Cette dernière technique est, à notre connaissance, uniquement étudiée par un groupe de recherche de l'Institut des sciences de l'atmosphère et du climat de l'École polytechnique fédérale de Zurich, qui produit des modélisations numériques sur le sujet. Quant aux projets d'éclaircissement des nuages marins, on en recense un plus grand nombre. Deux d'entre eux ont notamment été menés sous l'égide du gouvernement australien afin de protéger localement les coraux du réchauffement climatique via la Reef Restoration and Adaptation Program⁵. Du reste, on peut citer le *Marine Cloud Brightening Project*, collaboration entre l'université de Washington et plusieurs autres institutions de recherche américaines, financée par l'organisation à but non lucratif Silver Lining ; la collaboration entre l'université d'Édimbourg et l'université de Manchester pour des recherches sur le sujet avec le soutien du Center for Climate repairation de Cambridge ; ou encore la société allemande gM-Engineering qui cherche des fonds pour faire un essai sur le terrain.

L'injection d'aérosols stratosphériques (*Stratospheric aerosol injection*), qui consiste à diffuser dans la stratosphère des particules permettant de réfléchir une partie du rayonnement solaire. Des recherches ont notamment été menées au sein du Planetary Science Institute par Robert Nelson, recherches théoriques qui se sont conclues sur la nécessité de tester une injection de sel dans la partie haute de la troposphère, juste en dessous de la stratosphère. De même, le projet SCoPEX, dans le cadre duquel des chercheurs de l'université d'Harvard conduisent des activités de recherche et de modélisation sur le sujet. Ceux-ci ont développé des équipements dont ils souhaitent tester le fonctionnement sur le terrain, mais la première phase de test, consistant à lancer un ballon stratosphérique sans substance active, a été annulée du fait de l'opposition du peuple sami et de certaines organisations environnementales. Du fait du caractère extrêmement controversé de l'injection d'aérosols stratosphériques, les projets de recherche sur la question peinent en

⁵ Parmi ces deux projets, le projet mené en 2020 par le Sydney Institute of Marine Science, qui a conduit un essai de quatre jours extrêmement controversé.

effet à entrer en phase de test. Cela n'a cependant pas empêché la commercialisation de la technique par la start-up Make Sunsets. Fondée en octobre 2022, celle-ci déclare sur son site web⁶ avoir déjà réalisé des opérations d'injection d'aérosols, et propose aux visiteurs de ce site web d'acheter des « *Cooling Credits* » - chaque crédit consistant au financement d'au moins un gramme de leur solution. Cette commercialisation hâtive, sans prise en compte des données et incertitudes scientifiques, illustre parfaitement les risques d'une normalisation d'un domaine de recherche scientifique sans encadrement juridique.

LES RISQUES DE LA GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE

Risques physiques, risque moral

À ce jour, les risques induits par les techniques de géo-ingénierie solaire sont mal compris, et font encore l'objet d'études exploratoires en sciences atmosphériques. Les techniques d'injection de particules dans la stratosphère soulèvent d'importantes incertitudes environnementales et sanitaires, notamment du fait des substances actives envisagées, telles que l'acide sulfurique, destructeur pour la couche d'ozone et extrêmement toxique⁷ (Lawrence et al., 2018). Par ailleurs, le soufre, composant de l'acide sulfurique, pourrait par la suite retomber sous forme de précipitations acides, causant des problèmes de santé humaine et des dommages sur les écosystèmes locaux (Chalecki & Ferrari, 2018). Il existe également des incertitudes quant aux effets de la géo-ingénierie solaire sur les régimes météorologiques (Baughman et al., 2010) et sur les productions agricoles. Dans cette perspective, les risques que fait peser la géo-ingénierie solaire sur la sécurité alimentaire commencent à être explorés, mais les études sur le sujet restent limitées. Certaines d'entre elles mettent en lumière des risques de réduction des rendements agricoles dans les régions où la productivité est fortement déterminée par le système des moussons d'été, notamment en Asie de l'Est (Robock et al., 2008 ; Tilmes et al., 2013). Une autre étude affirme, plus globalement, qu'en réduisant le rayonnement solaire disponible sur terre, l'injection d'aérosols stratosphériques serait susceptible de réduire la photosynthèse des cultures (Proctor et al. 2018). Une réduction du rayonnement solaire affecterait également la production énergétique fondée sur le photovoltaïque (GIEC, 2022, 1491).

Cependant, la portée des techniques de géo-ingénierie solaire étant planétaire, la variabilité des impacts selon les régions et les modes d'intervention est telle qu'une compréhension

⁶ <https://makesunsets.com/pages/about>

⁷ Substance également envisagée dans le cadre du projet SCoPEX, bien que le projet privilégie le carbonate de calcium au regard des risques cités.

globale des risques qu'elles induisent reste compromise. Les effets de telles techniques dépendent d'un grand nombre de variables déterminant leur déploiement, telles que leur place dans les stratégies plus globales de réponse aux changements climatiques, les matériaux utilisés, la saison, ... (GIEC, 2022, 1489). En outre, les études sur ces techniques demeurent en grande partie fondées sur des modélisations numériques difficilement vérifiables. Il est, en ce sens, possible que les risques présentés par les techniques envisagées ne soient pas pleinement compris en amont de leur déploiement (Oomen & Meiske, 2021).

Par ailleurs, un autre risque est prégnant dans le cadre du déploiement de la géo-ingénierie : le risque de verrouillage sociotechnique, c'est-à-dire d'irréversibilité des techniques développées dans ce domaine (Cairns, 2014). Dans ce cadre, les développements technologiques pourraient en effet verrouiller des enchevêtrements sociotechniques intimement liés à des investissements financiers et des positionnements politiques, enchevêtrements tels que les techniques pourraient ne pas être abandonnées, même à la lumière de preuves d'impacts négatifs. Cette irréversibilité, couramment observée dans les développements technologiques occidentaux, est poussée à son extrême dans le cadre de la géo-ingénierie solaire, du fait du « choc de terminaison » (termination shock) (Parker & Irvine, 2018) : si la géo-ingénierie solaire était déployée, et parvenait à neutraliser de manière temporaire le réchauffement de la planète, il serait impossible de mettre un terme à son déploiement sans provoquer une hausse brutale des températures. En effet, la durée de vie des aérosols dans la stratosphère étant d'un à trois ans, l'injection d'aérosols stratosphériques devrait être répétée annuellement (Niemeier et al. 2011). Quant aux opérations d'éclaircissement des nuages marins, elles devraient requérir une pulvérisation continue de sels marins dans les nuages, la durée de vie de ces derniers n'étant que d'une dizaine de jours (MacDougall et al. 2020). Deux risques découlent ainsi de la reconduction nécessaire des interventions : d'une part, celui d'une forte dépendance à des développements technologiques consommateurs de ressources financières, énergétiques et minérales ; d'autre part, celui d'un réchauffement planétaire brutal et dévastateur dans les cas où des phénomènes tels qu'une catastrophe naturelle ou une rupture des approvisionnements mettaient fin au déploiement.

Outre les risques physiques induits par le déploiement des techniques de géo-ingénierie solaire, un « risque moral » (Preston, 2013) pourrait découler de l'effet dissuasif de ces techniques, et plus exactement de leur existence dans l'imaginaire commun, vis-à-vis des efforts d'atténuation et d'adaptation. Depuis le début des années 2000, ce risque tend à monter en puissance sous l'effet des « promesses technoscientifiques » formulées par leurs promoteurs et les espoirs spéculatifs qu'elles relaient sur la possibilité d'une solution

technique aux changements climatiques. Ces promesses fragilisent les engagements en matière d'atténuation (Asayama et al., 2019), et sont relayées par certains secteurs industriels, notamment énergétiques, dans leur quête de solutions techniques alternatives aux politiques climatiques (Low & Boettcher, 2020). Formuler la promesse selon laquelle une technique pourrait suspendre temporairement le réchauffement planétaire le temps que les politiques de réduction des émissions carbone se concrétisent, c'est précisément laisser ouverte la possibilité d'un report de ces politiques.

Dans ce contexte, le risque moral est d'autant plus important que l'efficacité des techniques n'est pas certaine. Une étude de sciences atmosphériques publiée en 2020 questionne précisément cette efficacité en l'absence d'une réduction des émissions carbone, en soulignant un élément climatique structurel qui n'est pas pris en charge par les interventions sur le rayonnement solaire : les impacts des gaz à effet de serre sur la couverture nuageuse, qui se dégrade à mesure que ceux-ci s'accumulent (Schneider et al., 2020). L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre mène à l'amincissement des nuages – et dans un cas extrême, à leur dislocation – ce qui réduit leur capacité à réfléchir le rayonnement solaire. Malgré la mise en place de techniques de géo-ingénierie solaire, un fort réchauffement planétaire peut se produire si le CO₂ continue de s'accumuler dans l'atmosphère. En ce sens, la géo-ingénierie solaire ne peut pas compenser un report de prise en charge politique des changements climatiques.

L'impossible démocratie de la géo-ingénierie solaire : unilatéralisme et militarisation

Les techniques de géo-ingénierie solaire aspirant à avoir une portée planétaire, un déploiement démocratique dans ce domaine implique une gouvernance mondiale, sous le contrôle d'institutions multilatérales, et le contrôle effectif du déploiement de ces technologies par tous les pays (Holahan & Kashwan, 2019). Or, le droit international reste extrêmement vague sur ce point, et actuellement, aucune institution ne dispose de capacités juridiques pour encadrer des décisions internationales autour de la géo-ingénierie. C'est précisément en l'absence de tels mécanismes de gouvernance que la start-up Make Sunsets a pu librement réaliser plusieurs injections d'aérosols stratosphériques (acide sulfurique) à petite échelle au Mexique, mettant en évidence deux types de risque : d'une part, les risques physiques abordés plus tôt, qui découleraient d'un déploiement unilatéral et à grande échelle d'une technique de géo-ingénierie solaire par un acteur public ou privé ; d'autre part, les risques de conflits entre l'État moteur de ce déploiement et les États qui n'auraient pas donné leur accord en amont, au premier chef desquels les États les plus pauvres. Ceux-ci ne disposent pas des ressources pour mettre en œuvre des recherches dans le domaine, et sont, de surcroît,

particulièrement vulnérables à de potentiels dérèglements climatiques issus d'une intervention sur l'atmosphère. C'est ainsi que Biermann et Möller problématisent le développement de la géo-ingénierie comme un processus de « marginalisation du Sud global », et appellent à la mise en place d'un contrôle politique total par l'intégralité des États de la communauté internationale (Biermann & Möller, 2019).

Or, la mise en place de tels outils de gouvernance à cet effet est compromise par la volonté d'un certain nombre d'États de la déployer sans contrainte juridique. En 2019, la Suisse et neuf autres pays⁸ avaient déposé une proposition de résolution au Programme des Nations Unies pour l'environnement, proposition visant à entreprendre une évaluation des options de géo-ingénierie et de leurs risques et faisant valoir le « principe de précaution », mais celle-ci avait été bloquée par les États-Unis, le Brésil et l'Arabie saoudite (Chemnick, 2019). Un consensus n'ayant pas été trouvé sur cette question, il est inenvisageable que la communauté internationale puisse se mettre d'accord sur le déploiement d'un procédé précis de géo-ingénierie solaire, et sur des détails techniques tels que le mode de diffusion des substances utilisées, leur quantité, la durée du déploiement... Par conséquent, les projets de géo-ingénierie solaire posent de sérieux défis de gouvernance mondiale et semblent, selon certains auteurs, incompatibles avec la prise de décision démocratique (Stephens et al., 2021).

Dans un contexte d'urgence climatique, un désaccord interétatique sur le déploiement d'une technique de géo-ingénierie solaire n'aboutirait pas à son abandon, mais mènerait bien plutôt à sa mise en œuvre par une coalition d'États, sinon à sa mise en œuvre unilatérale. Une telle possibilité, favorisée par le faible coût d'un déploiement, a été problématisée par Wagner et Weitzman, à l'origine du concept de l'« effet du conducteur clandestin » (« *free driver effect* ») (Wagner & Weitzman, 2012). Il s'agit plus précisément, pour ces auteurs, de mettre en évidence le ratio extrêmement positif, sur le plan économique, entre les coûts d'un déploiement de géo-ingénierie, et les bénéfices potentiels – notamment issus de l'annulation du réchauffement planétaire, couplée à un évitement des politiques d'atténuation. Cet effet bénéficie par ailleurs d'un contexte favorable à son émergence, caractérisé par l'« effet du passager clandestin » (« *free rider effect* ») : les changements climatiques sont un problème collectif, mais y répondre par des mesures d'atténuation ne sert, dans l'immédiat, l'intérêt individuel de personne. C'est en effet dans le cadre de l'inaction climatique généralisée qui caractérise actuellement la communauté internationale, et en l'absence d'un cadre efficace de gouvernance que les développements technologiques en géo-ingénierie solaire prolifèrent. Par ailleurs, le domaine étant à première vue dominé par les États-Unis, il est possible qu'ils

⁸ Burkina Faso, Micronésie, Géorgie, Liechtenstein, Mali, Mexique, Monténégro, Nouvelle-Zélande, Niger et Sénégal.

soient à l'initiative d'un déploiement unilatéral de géo-ingénierie à l'avenir, avec, pour risque, que la prise en charge technologique des changements climatiques serve prioritairement les intérêts nationaux américains (Stephens & al., 2022).

L'attrait des États-Unis pour ce domaine de recherche entre, de fait, dans des perspectives stratégiques liées à la conservation de leur hégémonie économique et militaire. Le déploiement réussi d'une technique de géo-ingénierie laisserait en effet la voie ouverte à l'expansion des combustibles fossiles, support de cette hégémonie, tout en apportant une réponse aux changements climatiques, considérés comme une menace pour la sécurité nationale par l'armée américaine. Cela explique l'implication des institutions américaines de défense, de renseignement et de politique étrangère dans le développement de la géo-ingénierie solaire, dans le cadre de « logiques de militarisation » (Stephens & al., 2022). Face au caractère stratégique de telles technologies pour les États-Unis, il est par ailleurs probable que des puissances concurrentes, telles que la Chine ou la Russie, développent des technologies similaires dans la perspective d'un rééquilibrage des forces. Une telle course à la géo-ingénierie solaire contiendrait, en propre, un risque d'escalade conséquent si une première technologie était déployée. Si un « conducteur clandestin » venait à initier un déploiement unilatéral, d'autres États pourraient en effet déployer des programmes de « contre-géo-ingénierie » afin de répondre le déploiement initial. Deux formes de « contre-géo-ingénierie » ont été théorisées : une « contre-géo-ingénierie » de « neutralisation », qui consisterait à diffuser de nouvelles substances afin d'accélérer le dépôt atmosphérique des substances diffusées ; et une « contre-géo-ingénierie » de « compensation », cherchant à inverser les effets des substances diffusées en injectant des agents de réchauffement (particules ou gaz à effet de serre) (Heyen et al., 2019).

Aussi l'atmosphère pourrait-elle devenir le théâtre d'affrontements singuliers, consistant en des interventions et des contre-interventions de refroidissement planétaire. De tels affrontements pourraient advenir sur fond de clivages idéologiques concernant la solution à apporter aux changements climatiques, et notamment sur la base de la contestation de l'hégémonie technoscientifique états-unienne. En ce sens, le déploiement potentiel d'une technologie de géo-ingénierie solaire induit, non seulement le risque d'un dérèglement technique des phénomènes atmosphériques, mais aussi celui d'un dérèglement supplémentaire dans le cadre d'une escalade technologique, étouffant, par ailleurs, toute possibilité de gouvernance internationale du climat dans un contexte hautement conflictuel. Néanmoins, en l'absence de tout mécanisme d'encadrement juridique de ces développements technologiques, et au regard des réflexions exposées sur l'effet du passager clandestin, il est fort probable que les déploiements unilatéraux, à l'instar de l'initiative de

Make Sunsets, se multiplient, aboutissant à terme à un verrouillage technologique de la géo-ingénierie solaire ainsi qu'à un affaiblissement des politiques d'atténuation.

BIBLIOGRAPHIE

- Asayama, S., Sugiyama, M., Ishii, A., & Kosugi, T. (2019). Beyond solutionist science for the Anthropocene: To navigate the contentious atmosphere of solar geoengineering. *The Anthropocene Review*. 6,1–2, 19–37.
- Baughman, E., Gnanadesikan, A., Degaetano, A.T., & Adcroft, A. (2010). Investigation of the Surface and Circulation Impacts of Cloud-Brightening Geoengineering. *Journal of Climate*. 25, 7527-7543.
- Biermann, F., Oomen, J., Gupta, A., Ali, S. H., Conca, K., Hajer, M. A., Kashwan, P., Kotzé, L. J., Leach, M., Messner, D., Okereke, C., Persson, Å., Potočník, J., Schlosberg, D., Scobie, M., & VanDeveer, S. D. (2022). Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIREs Climate Change*. 13, 3, 754.
- Biermann, F., & Möller, I. (2019). Rich man's solution? Climate engineering discourses and the marginalization of the Global South. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. 19, 151-167.
- Cairns, R.C. (2014). Climate geoengineering: issues of path-dependence and socio-technical lock-in. *WIREs Climate Change*. 5, 649-661.
- Chalecki, E.L, & Ferrari, L.L. (2018). A new security framework for geoengineering. *Strategic Studies Quarterly*. 12,2, 82-106.
- Chemnick, J. (2019, 15 mars). U.S blocks U.N resolution on geoengineering. *Scientific American*.
- Crutzen, P.J. (2006). Albedo Enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*. 77, 211.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III TO THE Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change*.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2012). *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Expert Meeting on Geoengineering*.
- Heyen, D., Horton, J., Moreno-Cruz, J. (2019). Strategic implications of counter-geoengineering: Clash or cooperation? *Journal of Environmental Economics and Management*, 95.
- Holahan, R., & Kashwan, P. (2019). Disentangling the rhetoric of public goods from their externalities: The case of climate engineering. *Global Transitions*. 1, 132-140.
- Keith, D. (2013). *A case for climate engineering*. The MIT Press.

- Flegal, J.A., Hubert, A-M., Morrow, D.R., & Moreno-Cruz, J.B. (2019). Solar geoengineering: social science, legal, ethical, and economic frameworks. *Annual Review of Environment and Resources*. 44,1, 399-423.
- Joly, P. (2013). Chapitre 8. À propos de l'Économie des promesses techno-scientifiques. Dans : Jacques Lesourne éd., *La Recherche et l'Innovation en France : FutuRIS 2013*. 231-255.
- Keith, D.W. (2000). Geoengineering the climate: history and prospect. *Annual review of energy and the environment*. 25,1, 245-284.
- Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H. *et al.* (2018). Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications* 9, 3734.
- Low, S., & Boettcher, M. (2020). Delaying decarbonization: climate governmentalities and sociotechnical strategies from Copenhagen to Paris. *Earth System Governance*. 5, 100073.
- MacDougall, A.H., Frölicher, T.L., Jones, C.D., Rogelj, J., Matthews, H.D., Zickfeld, K., Arora, V.K., Barrett, N.J., Brovkin, V., Burger, F.A., Eby, M., Eliseev, A., Hajima, T., Holden, P.B., Jeltsch-Thömmes, A., Koven, C., Mengis, N., Menviel, L., Michou, M., Mokhov, I.I., Oka, A., Schwinger, J., Séférian, R., Shaffer, G., Sokolov, A., Tachiiri, K., Tjiputra, J., Wiltshire, A., & Ziehn, T. (2020). Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂. *Biogeosciences*. 17, 2987–3016.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). (2021). *Reflecting Sunlight. Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. The National Academies Press.
- Niemeier, U., Schmidt, H., & Timmreck, C. (2011). The dependency of geoengineered sulfate aerosol on the emission strategy. *Atmospheric science letters*. 12, 189-194.
- Oomen, J., & Meiske, M. (2021). Proactive and reactive geoengineering: engineering the climate and the lithosphere. *WIREs Climate Change*. 12, 6.
- Parker, A., & Irvine, P. J. (2018). The Risk of Termination Shock from Solar Geoengineering. *Earth's Future*. 6, 456– 467.
- Preston, C. (2013). Ethics and geoengineering: reviewing the moral issues raised by solar radiation management and carbon dioxide removal. *WIREs Climate Change*. 4, 23-37.
- Proctor, J., Hsiang, S., Burney, J., Burke, M., & Schlenker, W. (2018). Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions. *Nature*. 560, 480-483.
- Reynolds, J.L. (2019). Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proceedings of the Royal Society A*. 475, 20190255.
- Robock, A., Oman, L., & Stenchikov, G.L. (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 113, D16.

Røttereng, J-K.S. (2018). The comparative politics of climate change mitigation measures: who promotes carbon sinks and why? *Global Environmental Politics*. 18, 1, 52-75.

Schneider, T., Kaul, C.M., & Pressel, K.G. (2020). Solar geoengineering may not prevent strong warming from direct effects of CO₂ on stratocumulus cloud cover. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 117, 48, 30179-30185.

Stephens, J.C., Kashwan, P., McLaren, D. & Surprise, K. (2022). Towards dangerous US unilateralism on solar geoengineering. *Environmental Politics*.

Stephens, J.C., Kashwan, P., McLaren, D. & Surprise, K. (2021). The dangers of mainstreaming solar geoengineering: a critique of the National Academies Report. *Environmental Politics*.

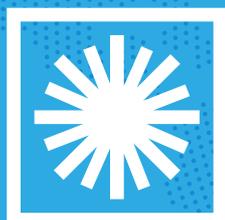
Tilmes, S., Fasullo, J., Lamarque, J.F., Marsh, D.R., Mills, M., Alterskjær, K., Muri, H., Kristjánsson, J.E., Boucher, O., Schulz, M., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Jones, A., Haywood, J., Irvine, P.J., Ji, D., Moore, J.C., Karam, D.B., Kravitz, B., Rasch, P.J., Singh, B., Yoon, J-H., Niemeier, U., Schmidt, H., Robock, A., Yang, S., & Watanabe, S. (2013), The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*. 118, 11,036–11,058.

Volken, E. (2008). La géoingénierie pour combattre le réchauffement climatique : un dilemme entre possibilités et risques. *Climate Press*.

Wagner, G. (2021). *Geoengineering : the gamble*. Polity.

Wagner G, Weitzman ML (2012) Playing god. *Foreign Policy*.

L'expertise stratégique en toute indépendance



PROGRAMME
CLIMAT,
ÉNERGIE &
SÉCURITÉ



2 bis, rue Mercœur - 75011 PARIS / France

+ 33 (0) 1 53 27 60 60

contact@iris-france.org

iris-france.org



L'IRIS, association reconnue d'utilité publique, est l'un des principaux think tanks français spécialisés sur les questions géopolitiques et stratégiques. Il est le seul à présenter la singularité de regrouper un centre de recherche et un lieu d'enseignement délivrant des diplômes, via son école IRIS Sup', ce modèle contribuant à son attractivité nationale et internationale.

L'IRIS est organisé autour de quatre pôles d'activité : la recherche, la publication, la formation et l'organisation d'évènements.