

Géoingénierie solaire : innovation salvatrice ou catastrophe programmée ?

**Réflexions sur une technologie pour dompter le
climat**

Judith Bellon
Marinette Bettiol
Sylvain Brisson
Jean-Pierre Louis Communal
Xavier Desprez

Jarod Levy
Armen Minassian
Paul Pinel de Golleville
Christelle Thoumi

2024

Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : madeleine.akrich@mines-paristech.fr.

■ Introduction

Manipuler le climat terrestre par des moyens technologiques soulève des questions profondes interrogeant l'harmonie entre l'homme et la nature. Envisager de telles solutions nous amène à la croisée des chemins entre innovation technique et responsabilité morale, explorant la fine frontière où la science rencontre la sagesse.

« Nous ne pouvons pas résoudre nos problèmes avec la même pensée que nous avons utilisée pour les créer » disait Albert Einstein, mettant en lumière l'importance d'aborder le changement climatique avec un renouveau de notre pensée.

Face aux conséquences de la hausse des températures, doit-on se laisser la possibilité de recourir à la géoingénierie solaire pour nous préserver du plus fort des effets du réchauffement climatique ?

■ Des techniques variées

La géoingénierie regroupe différentes techniques de modification du climat terrestre ou de l'environnement. Ces méthodes peuvent influencer sur de nombreux paramètres : pluies, températures, etc. Certaines sont souvent évoquées pour lutter contre le changement climatique, conséquence des émissions de gaz à effet de serre anthropiques : on parle alors de géoingénierie climatique.

On distingue deux formes de géoingénierie climatique :

- La capture de gaz à effet de serre, qui vise à réduire la concentration de ces gaz dans l'atmosphère. On pense par exemple aux techniques de capture du CO₂.
- La géoingénierie solaire, qui vise à réfléchir une partie du rayonnement solaire pour limiter la chaleur reçue par la Terre. En anglais, on parle aussi bien de solar geoengineering que de solar radiation management, qui donne l'acronyme SRM. C'est cette dernière qui nous intéresse ici.

A ce jour, plusieurs méthodes de géoingénierie solaire, représentées en Figure 1, sont envisagées (Määtänen, 2022 ; Climate Overshoot Commission, 2023) :

- L'injection d'aérosols dans la stratosphère : Il s'agit de la technique la plus développée et discutée, elle semble être la plus réaliste. Elle consiste à disperser des particules (comme le dioxyde de soufre) dans la stratosphère pour refléter une partie du rayonnement solaire dans l'espace, simulant l'effet de refroidissement

naturel des éruptions volcaniques. Elle concentre la plupart des discussions de la controverse - en témoigne l'importance des mots 'aerosol', 'particle', 'stratosphere', 'dioxide' et 'eruption' dans les articles en anglais contenant les mots 'solar engineering' (Figure 2). Dans la suite du rapport, nous nous concentrerons donc sur cette technique sauf précision contraire.

- L'amincissement des cirrus : Cette technique implique la modification des nuages cirrus pour réduire leur capacité à piéger la chaleur. Les cirrus, situés en haute altitude, absorbent et ré-émettent vers la surface une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre, ce qui contribue à l'effet de serre. En les dispersant et les amincissant, on pourrait théoriquement réduire cet effet et ainsi refroidir la planète.
- L'éclaircissement des nuages marins : Cette méthode vise à augmenter la réflectivité des nuages marins en pulvérisant de fines gouttelettes d'eau de mer dans l'atmosphère. Les particules de sel agissent comme des noyaux de condensation supplémentaires, rendant les nuages plus blancs et donc plus réfléchissants vis-à-vis du rayonnement solaire incident.
- L'augmentation de l'albédo de la surface terrestre : L'albédo fait référence à la capacité réfléchissante d'une surface. Augmenter l'albédo terrestre signifie rendre les surfaces de la Terre plus réfléchissantes, par exemple en peignant les toits en blanc ou en plantant des cultures à feuilles claires.
- Les réflecteurs spatiaux : Cette idée implique de placer des miroirs ou d'autres types de réflecteurs dans l'espace pour réfléchir une partie du rayonnement solaire incident à la Terre. Bien que conceptuellement simple, cette méthode pose d'énormes défis techniques et financiers.

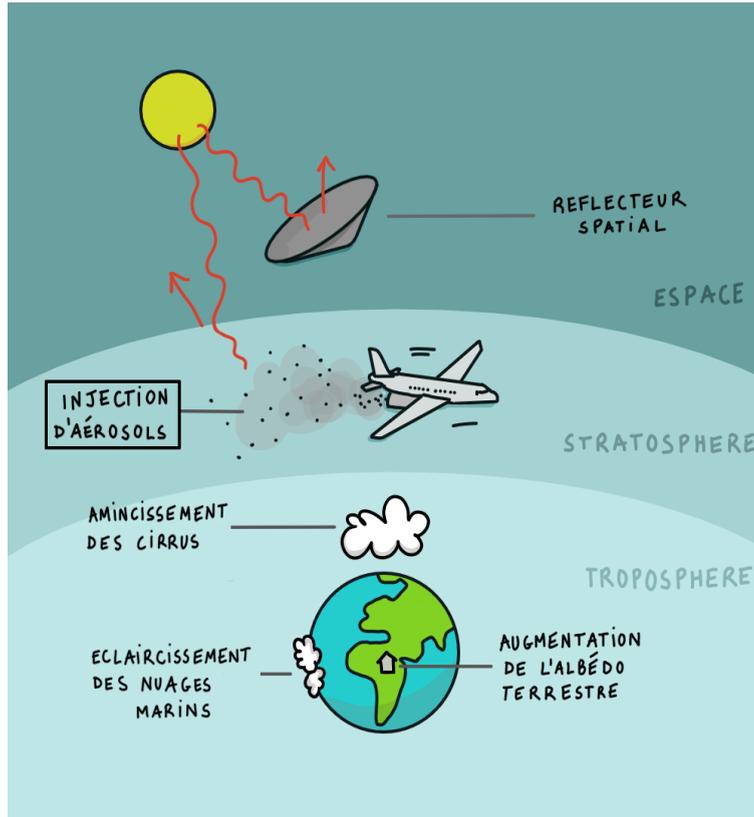


Figure 1 : Les 5 techniques principales de géoingénierie solaire
 Source : Groupe « Géoingénierie solaire », Mines Paris, 2023.

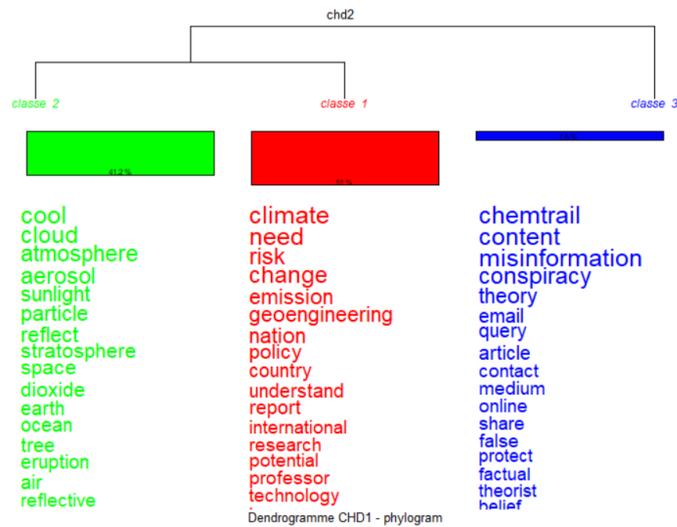


Figure 2 : Répartition en 3 classes des thèmes les plus discutés dans les articles en anglais contenant les mots 'solar engineering'
 Figure générée par Iramuteq

■ Un intérêt croissant

La géoingénierie solaire a connu une évolution remarquable depuis ses premières conceptualisations. L'intérêt pour cette technologie a été catalysé par des phénomènes naturels impressionnants, comme l'éruption du Mont Pinatubo en 1991. C'est le refroidissement planétaire global, causé par l'injection de quantités très importantes de dioxyde de soufre (SO₂), observé dans les mois et années suivants cette éruption qui aurait suggéré l'idée de l'injection artificielle d'aérosols dans la stratosphère, aujourd'hui encore méthode phare de la géoingénierie solaire.

Les étapes clés de son histoire sont résumées dans la frise chronologique ci-contre. Le premier article qui suggère l'idée selon laquelle l'injection délibérée de SO₂ dans l'atmosphère pourrait permettre de combattre le réchauffement climatique date de 2006 (Crutzen, 2006). Puis, le rapport de la Royal Society (2009) est le premier rapport scientifique complet du domaine. Par la suite, des initiatives comme SCoPEX (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment), lancé en 2014 à Harvard, incarnent une volonté concrète d'explorer le potentiel de cette technologie. Ce projet vise à tester en pratique les effets du déploiement de particules soufrées dans la stratosphère. Le manifeste Hands Off Mother Earth (Geoengineering monitor, 2018) souligne le gain en intensité du débat public. Il souligne les préoccupations éthiques et environnementales liées aux interventions humaines à grande échelle sur le climat. En menant une analyse quantitative des articles de presse publiés sur le sujet, on voit que l'année 2023 marque un vrai tournant. Le nombre d'articles est multiplié par 5 par rapport aux années précédentes, montrant que ce sujet scientifique se déplace progressivement dans la sphère du grand public. Cette accélération de la couverture médiatique correspond au lancement de la première entreprise privée spécialisée dans le domaine : Make Sunsets. En 2023, la commission Clintate Overshoot examine l'alignement de la géoingénierie solaire avec l'Accord de Paris et en 2023 c'est au sein de l'Union Européenne que les discussions s'accroissent, signalant une reconnaissance croissante de cette technologie comme un élément potentiel de la stratégie globale contre le changement climatique. D'une hypothèse théorique à un sujet de recherche actif et un point de discussion politique, la géoingénierie solaire anime de plus en plus de débats et son histoire continue de s'écrire.

Chronologie de la controverse

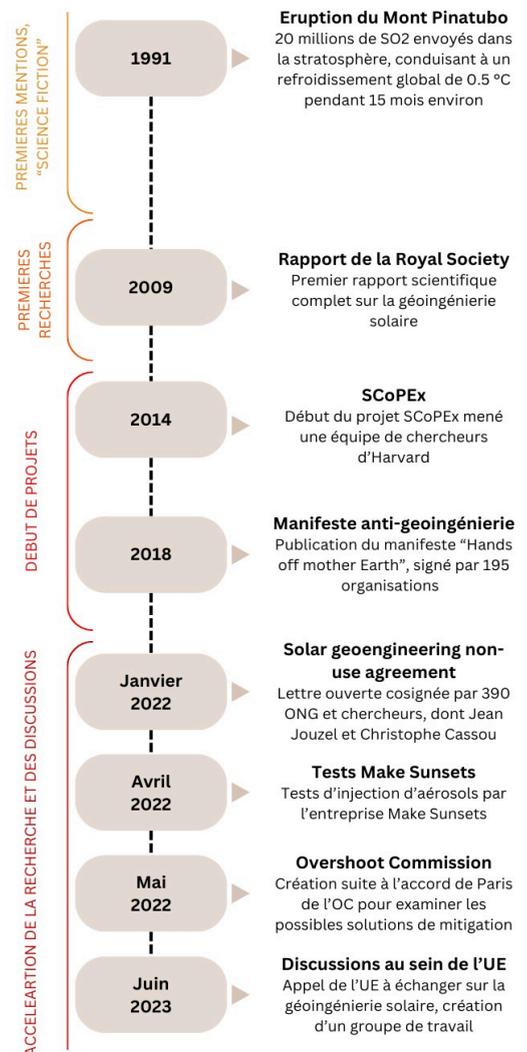


Figure 3 : chronologie de la controverse

Source : Groupe « Géoingénierie solaire », Mines Paris, 2023



Figure 4 : Evolution du nombre d'articles en français contenant les termes "géoingénierie solaire".
 Figure générée par Europresse

■ Une multitude d'acteurs impliqués

La controverse autour de la géoingénierie solaire est transdisciplinaire et internationale. Elle regroupe de nombreux acteurs variés, impliqués à différents degrés, et apportant des perspectives diverses sur le sujet. Il convient donc de faire état des acteurs concernés, afin de couvrir la controverse sous tous ses aspects.

Le schéma ci-dessous présente les groupes d'acteurs impliqués, en détaillant quelques exemples. On distingue notamment les acteurs publics, privés et de la société civile.

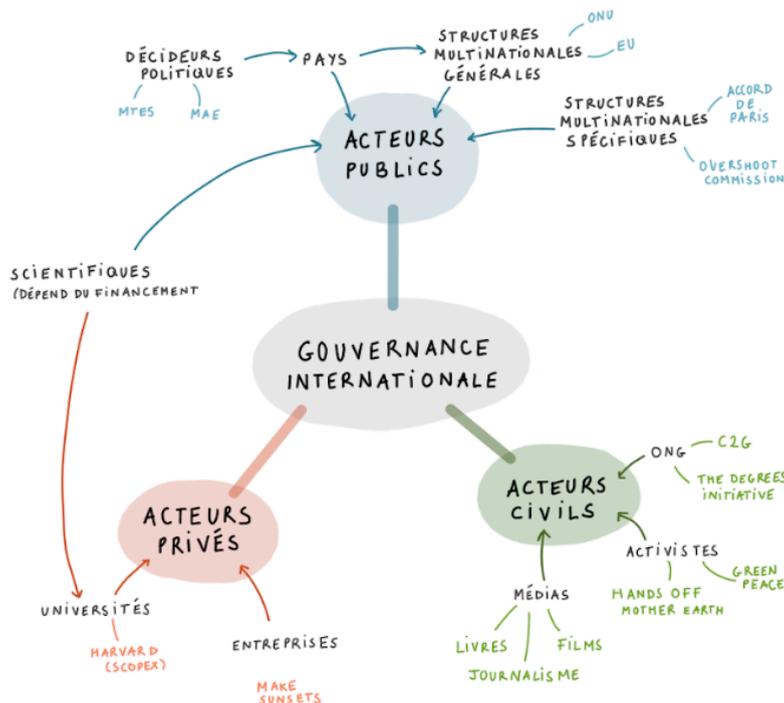


Figure 5 : Carte des acteurs de la controverse
 Source : Groupe « Géoingénierie solaire », Mines Paris, 2023.

Acteurs scientifiques

Il semble tout d'abord naturel que la sphère scientifique s'intéresse à la question de l'utilisation de la géoingénierie solaire. En effet, celle-ci se présente comme une nouvelle méthode qui pourrait aider l'homme à limiter la hausse de température actuelle. Les scientifiques sont donc omniprésents dans le débat : élaboration des techniques de géoingénierie, évaluations, tests, critiques, etc. Ces acteurs sont essentiels : ce sont eux qui apportent des informations vérifiées au débat, informations sur lesquelles les autres acteurs s'appuient.

Le monde scientifique se penche sur la question de la géoingénierie à travers différents formats :

- Des projets de recherche spécifiques sur les techniques de géoingénierie solaire, comme le projet SCoPEX (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment) à Harvard ; ou encore des projets de simulations planétaires comme le projet d'intercomparaison des modèles de géoingénierie (The Geoengineering Model Intercomparison Project, GeoMIP)
- Des projets de recherche spécifiques sur les aspects sociaux et politique de la géoingénierie solaire,
- Des travaux de recherche ponctuels ou transversaux.

S'ils partagent des méthodes scientifiques communes, ces acteurs se différencient par le mode de financement de leurs recherches. Ils peuvent donc s'apparenter à des acteurs privés, dans le cas de certains financements académiques - comme pour le projet SCoPEX à Harvard - ou à des acteurs publics, s'ils évoluent au sein d'organismes comme le CNRS. Notons enfin que la majorité de la recherche provient des Etats-Unis ou du Royaume-Uni (Collomb, 2020).

Acteurs publics

Les acteurs publics sont également très présents et se sont emparés du sujet, en particulier ces 10 dernières années. En effet, l'expérimentation puis la mise en place de méthodes de géoingénierie solaire auraient des impacts majeurs sur la population civile.

Les acteurs publics interviennent donc à différents niveaux. Ils peuvent financer une partie de la recherche, et il leur est même souvent recommandé d'augmenter leur intervention et les fonds alloués dans le domaine scientifique (Ambassade de France, 2021). Ils réagissent aux résultats obtenus par les scientifiques et définissent des plans d'actions. Ils s'organisent, régissent et mettent en place des régulations spécifiques afin d'encadrer la géoingénierie. Enfin, ils dialoguent avec la société civile, et sont censés intégrer ses considérations.

On distingue différentes formes d'acteurs publics :

- Les acteurs gouvernementaux directs,
- Les groupements d'Etats pré-existants, comme l'ONU ou l'UE,
- Les groupements d'Etats formés pour l'occasion :
 - Sur l'action contre le réchauffement climatique, en particulier le GIEC représenté pour la géoingénierie solaire par Jean Jouzel, mais aussi la Climate Overshoot Commission créée pour explorer les techniques de mitigation - dont la géoingénierie solaire.

- Sur la géoingénierie solaire spécifiquement, comme le Carnegie Climate Governance Initiative.

Ces groupements incluent des politiques, mais également des scientifiques engagés.

Acteurs privés

La controverse autour de la géoingénierie solaire regroupe plusieurs acteurs privés, principalement des entreprises et universités américaines souhaitant développer leurs propres solutions, majoritairement à base de dispersion d'aérosols. Ils financent eux-mêmes leurs activités, avec des objectifs de rentabilité à long terme. Parmi eux, on retrouve surtout Make Sunsets, ainsi que SCoPEX. Ce type d'initiative reste largement marginal.

Dans le cadre de ces initiatives commerciales, certains membres de la communauté scientifique ainsi que des entrepreneurs ont déjà effectué des essais malgré certaines interdictions réglementaires - Make Sunsets notamment (Guglielmo Weber (de), 2023).

Acteurs civils

Enfin, mentionnons l'importance des acteurs civils : ONG, activistes, journalistes, artistes, etc. Ces acteurs réagissent aux résultats des scientifiques, aux prises de décisions des acteurs publics, et aux initiatives des acteurs privés. Leur opinion guide également la controverse, dans la mesure où ils relaient le débat auprès du public - en particulier les journalistes, dont le rôle est d'abord la transmission de l'information.

Dans le cadre de la géoingénierie solaire, on trouve majoritairement des acteurs civils qui s'opposent au développement de ces techniques. Les acteurs civils s'expriment selon différents formats pour prendre la parole dans la controverse, en France et dans le monde, à travers :

- Des manifestes et lettres ouvertes, signés par des figures politiques, des scientifiques et des ONG. On retrouve notamment l'initiative "Hands Off Mother Earth" (Geoengineering monitor, 2018), relayée en France sous le nom "Bas les pattes" par Attac ; ou encore le Solar Engineering Non-Use Agreement.
- Des tribunes et articles rédigés par des journalistes d'opinion et des journalistes scientifiques, dans des revues spécialisées comme dans des journaux grand public (Foucart, 2022 ; Billard et Noyon, 2021).
- Des livres ou productions audiovisuelles, qui dépeignent souvent les conséquences d'une géoingénierie solaire qui aurait dégénéré. On trouve par exemple le roman Veil ou encore la BD, film et série Snowpiercer.

Certaines initiatives d'acteurs publics sont plus nuancées, et visent à encadrer les pratiques. On trouve par exemple The DEGREE Initiatives, qui oeuvre pour inclure les pays en développement au débat, afin qu'ils ne soient pas laissés pour compte, ou encore The Alliance for Just Deliberation on Solar Geoengineering créé tout récemment en avril 2023.

■ Un sujet peu connu du grand public

En plus du grand nombre d'acteurs, il existe une grande variété d'articles scientifiques et sociologiques qui étudient l'opinion du grand public sur la géoingénierie solaire (Asayama et al., 2017 ; Burns, E.T. et al., 2016 ; Pidgeon, N. et al., 2012), et la méconnaissance générale sur ce sujet est frappante. En effet, très peu de personnes sont conscientes de ce que cela représente, et encore moins des enjeux sous-jacents.

Pour mieux cerner l'appréhension de la géoingénierie solaire par le grand public, nous avons réalisé un sondage afin de recueillir les visions à première vue de différentes catégories de personnes. Nous avons ainsi posé les questions suivantes, avant et après avoir donné une définition succincte de la géoingénierie solaire :

- La géoingénierie solaire est-elle nécessaire ?
- La géoingénierie solaire est-elle souhaitable ?
- Que vous évoque la géoingénierie solaire ?

Cela permet d'avoir l'idée des personnes lorsqu'elles entendent parler de "géoingénierie solaire" puis leur avis lorsqu'on leur en donne une définition succincte.

Notre sondage étant par construction non représentatif de la population française, nous nous sommes rapidement posé la question de notre population étudiée. Au vu des réponses, nous avons séparé les répondants en deux catégories :

- Les étudiants ingénieurs (actuellement en école) ;
- Nos proches (famille et amis, n'étant pas en école d'ingénieur).

Un des faits les plus étonnants est qu'une majorité des répondants (167 sur 287) évoque le mot "photovoltaïque" lorsqu'on leur dit "géoingénierie solaire". Cela peut se comprendre par l'association que peuvent faire les répondants entre "solaire" et "photovoltaïque". Il en résulte aussi une illustration de la désinformation qu'il peut y avoir sur le sujet, même au sein d'une population largement constituée d'ingénieurs (plus de 75%).

On peut aussi observer le report des réponses avant et après avoir donné la définition précise de la géoingénierie solaire. On demande si la géoingénierie est nécessaire, puis si elle est souhaitable, et on observe comment les voix des répondants évoluent suite à l'information donnée par la définition.

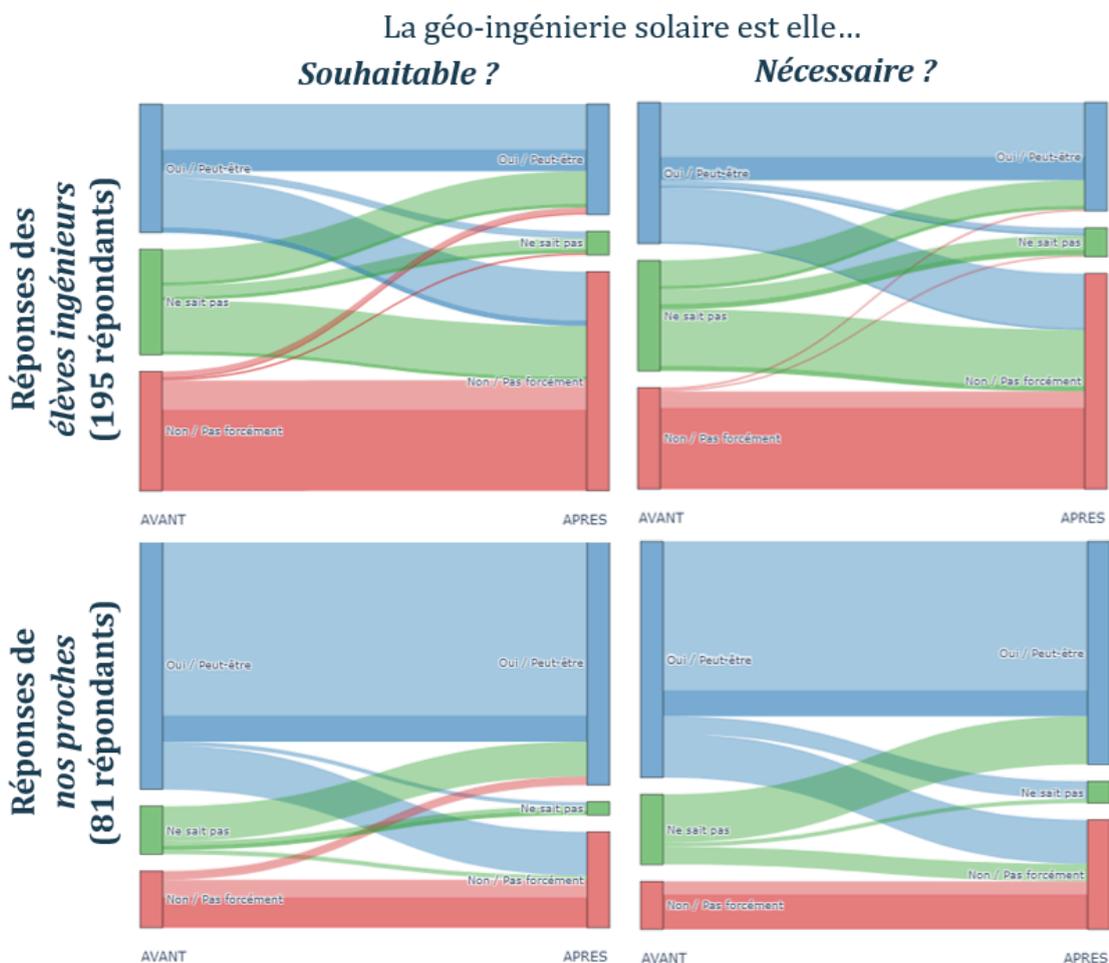


Figure 6 : Etude du report de voix des répondants au sondage
Source : Groupe « Géoringénierie solaire », Mines Paris, 2023.

Les bandes en couleur foncée correspondent aux répondants ayant déjà entendu parler de géoingénierie solaire au préalable, les claires correspondant à ceux n'en n'ayant pas entendu parler avant.

On observe dans cette évolution :

- un large report des voix “pour” (“Oui / Peut-être”) vers les voix “contre” (“Non / Pas forcément”), avec un maintien non négligeable de voix “pour” ;
- les voix “Ne sait pas” se séparent presque uniformément en “pour” et “contre” ;
- les voix “Non / Pas forcément” restent plutôt “contre” ;
- ceux qui avaient déjà entendu parler de géoingénierie solaire ont plutôt un a priori contre la géoingénierie solaire.

Bien sûr, ce sondage a ses limites propres, dont les principales :

- il s'intéresse à une catégorie bien précise de la population et n'est pas une représentation cohérente de l'opinion française ;
- il y a un biais d'ancrage de la réponse, un répondant peut voir son opinion évoluer mais ne vas pas passer du tout au rien ;
- il y a d'autres biais de sondage (positivisme, préjugés indépendants, etc.) qui peuvent influencer les réponses sans disqualifier l'interprétation globale.

■ Des promesses climatiques avec de possibles effets secondaires

Que nous promet la géoingénierie solaire ? Quels effets secondaires anticipent les scientifiques ? Quelles limites à nos méthodes de modélisation des effets d'un déploiement sur le climat ?

Autour de ces questions, trois principaux positionnements se détachent : ceux pour qui les risques sont négligeables par rapport à l'urgence de la situation, ceux qui soutiennent qu'il faut continuer les efforts de recherche pour envisager une prise de décision en toute connaissance de cause et ceux qui considèrent que les risques l'emportent sans débats et sont contre la recherche même sur ce sujet. Nous allons voir sur quoi reposent ces différents positionnements.

■ La promesse de la géoingénierie : limiter la hausse des températures

La géoingénierie solaire consiste à renvoyer une partie du rayonnement solaire vers l'espace afin que ces rayons ne réchauffent pas l'atmosphère. Il s'agit en quelque sorte d'un effet de serre inversé, qui au lieu de piéger les rayons et leur chaleur dans l'atmosphère empêche leur entrée dans l'atmosphère. Elle permettrait donc de limiter la hausse des températures, voire de les faire diminuer.

Le principe est scientifiquement attesté : de la même façon qu'on a moins chaud habillé en blanc qu'en noir, plus la quantité de rayonnements absorbée dans l'atmosphère est faible, moins la température à la surface de la Terre sera élevée. On a pu constater cet effet à la suite de grandes éruptions volcaniques, qui sont effectivement suivies de diminutions mesurables des températures moyennes pendant quelques mois à quelques années. C'est de ce constat que vient l'idée de la principale technique de géoingénierie solaire, l'injection d'aérosols dans la stratosphère. Le but est de reproduire ainsi l'effet de la diffusion de dioxyde de soufre à la suite d'éruptions volcaniques de façon contrôlée.

Cependant, les particules dont la projection est envisagée ont des durées de vie bien moindres dans la stratosphère que celles du dioxyde de carbone. Ainsi, l'effet de refroidissement obtenu est par nature de courte durée, des injections régulières au cours du temps seraient nécessaires pour générer une limitation durable de la hausse des températures. Il en va de même pour la plupart des autres techniques, à des échelles différentes : des réflecteurs spatiaux finiraient par s'abîmer et nécessiter un changement, l'éclaircissement des nuages n'est effectif qu'à très court terme. Il est très important de garder cela en tête en vue d'un potentiel déploiement de la géoingénierie solaire : il faut pouvoir garantir que le même niveau de géoingénierie solaire continuera d'être présent pendant longtemps. En effet, en cas d'arrêt brutal, il peut se passer ce que l'on nomme un choc thermique terminal (National Academies of Science, 2021 ; Trisos et al., 2018). Cet effet a été mis en évidence via des simulations numériques (Jones et al., 2013), notamment par les expériences du projet de comparaisons des modèles de géoingénierie (Geoengineering Model Intercomparison Project, GeoMIP).

Si la température est maintenue relativement froide par géoingénierie solaire, et que cet artefact disparaît, la température va remonter très vite. On pourrait alors observer des hausses de températures de l'ordre du degré non pas sur 100 ans mais sur quelques mois, ce qui aurait des effets désastreux sur la planète et ses occupants, et constituerait un véritable point de non retour. Notons cependant que l'intensité et la gravité de cet effet de choc thermique terminal est nuancé dans la littérature sur le sujet (Parker et Irvine, 2018). Comment garantir la stabilité des efforts de géoingénierie solaire dans le temps, par exemple en cas de guerre, de changement de situation politique ou de problème technologique ? Si certains sont convaincus qu'il faut pouvoir répondre à cette question avant d'envisager un quelconque déploiement, ce n'est pas le cas de Luke Iseman, fondateur de Make Sunsets, qui vend déjà des crédits de refroidissement réalisés par l'envoi de ballons chargés de dioxyde de soufre et que nous avons interrogé. Pour lui, puisqu'on a une solution à portée de main, il faut l'utiliser tant qu'il n'est pas trop tard.

Mais le réchauffement des températures ne constitue qu'une partie du changement climatique. La géoingénierie solaire permettrait bien de réduire la température moyenne de l'atmosphère, mais elle ne s'attaque pas à la base du problème, à savoir la concentration de gaz à effets de serre, et notamment de dioxyde de carbone, dans l'atmosphère. Ainsi, les autres effets de cette concentration importante, comme l'acidification des océans en particulier, ne sont pas combattus par ces techniques, comme rappelé dans un article paru récemment dans Le Monde (Garric, 2023).

■ Des effets secondaires anticipés mais peu prévisibles

Au-delà de l'effet modérateur du réchauffement climatique, vu ci-dessus, ces méthodes de géoingénierie solaire ont d'autres effets probables ou avérés sur le climat. On se concentrera dans cette partie sur les effets liés à l'injection stratosphérique d'aérosols, qui sont les plus documentés.

Le protocole de Montréal de 1989 a pour objectif de diminuer et à terme d'éliminer complètement les substances qui réduisent la couche d'ozone. Il régleme notamment les émissions d'un certain nombre d'aérosols qui interagissent avec l'ozone (O₃) de l'atmosphère. Bien que les aérosols envisagés pour la géoingénierie solaire ne fassent pas l'objet de réglementations, ils n'en ont pas moins des effets négatifs potentiels sur la couche d'ozone. Selon Weisenstein et al. (2016), alors que certains aérosols envisagés pour diminuer le forçage radiatif peuvent également réduire la couche d'ozone, il est possible de concevoir des compositions d'aérosols qui ont à la fois un forçage radiatif négatif et qui renforcent la couche d'ozone. Mais d'autres études (Pitari et al., 2014), s'appuyant sur GeoMIP, montrent aussi que les modèles prévoient tous une baisse de la couche d'ozone. Il s'agit donc d'un point controversé.

Afin d'évaluer les effets secondaires possibles de l'injection stratosphérique d'aérosols, plusieurs simulations à l'échelle du globe ont été réalisées durant les dernières années. Ainsi, une recherche concernant l'effet de la géoingénierie solaire sur les précipitations montre une modification du régime des précipitations et en particulier des moussons (Tilmes et al., 2013). S'appuyant sur 12 simulations géophysiques différentes provenant du GeoMIP,

la conclusion principale de cet article est une diminution du cycle hydrologique (-4.5% de précipitations à l'échelle du globe) ainsi qu'une réduction importante des pluies liées au phénomène de mousson (-6% en Asie de l'Est, -5% en Afrique du Sud et -7% en Amérique du Nord).

S'appuyant sur des simulations provenant également du modèle GeoMIP, Gabriel et al. (2015) ont tenté de quantifier l'influence potentielle de l'injection stratosphérique d'aérosols sur le phénomène climatique d'El Niño/ Oscillation australe. Les résultats de la simulation ne montrent pas d'effet de la géoingénierie solaire sur l'amplitude ou la fréquence d'El Niño compte tenu du réchauffement climatique actuel. Cependant l'article explique que la période de projection de la simulation est potentiellement trop courte pour pouvoir détecter des modifications effectives d'El Niño à cause de l'injection stratosphérique d'aérosols.

Enfin, l'injection stratosphérique d'aérosols a une influence sur le climat à l'échelle globale de la planète comme expliqué par la Technology Factsheet: Solar Geoengineering, publiée en 2019 par 4 chercheurs de Harvard dont David Keith, un des meneurs du projet SCoPEX. Cela signifie qu'il est difficile de prévoir son effet sur des phénomènes locaux qui ne sont pas pris en compte dans les simulation à grande échelle.

■ Une technologie agissant sur une machine climatique complexe difficile à modéliser

La faisabilité technique des moyens de déploiement des méthodes les plus considérées (injection d'aérosols et éclaircissement des nuages marins) est plus ou moins admise. En revanche, l'effet sur le système climatique de ces mêmes déploiements est aujourd'hui très difficile à contraindre. Les incertitudes de modélisation se retrouvent à toutes les échelles : de la mécanique climatique globale à la microphysique des aérosols en passant par les processus de convection atmosphérique. Les études qui s'intéressent aujourd'hui à évaluer l'effet du déploiement d'une méthode reposent toutes sur des modélisations numériques du climat : des modèles de circulation générale (les mêmes modèles que ceux qui pourraient être utilisés pour étudier les conséquences de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre). Ces modèles sont des modèles physiques, contraints par des données issues de mesures in-situ ou d'expériences en laboratoire et testés sur des données climatiques réelles.

« Jusqu'où peut-on faire confiance aux modèles, si on les a validés uniquement avec les observations des éruptions volcaniques et des expériences en laboratoire sur des processus de petite échelle ? C'est là la question. »

Entretien avec une chercheuse en chimie atmosphérique au CNRS

Si l'on prend l'exemple de l'injection stratosphérique d'aérosols, il est crucial de connaître avec précision le devenir des particules injectées : vont-elles réagir chimiquement avec d'autres composés atmosphériques ? Vont-elles coaguler et ainsi changer radicalement de propriétés optiques voir sédimenter en dehors de la stratosphère ? Aujourd'hui, deux approches sont possibles pour mieux comprendre ces phénomènes : des expériences de laboratoires très finement contrôlées mais ne représentant pas la complexité physique et chimique de l'atmosphère réelle ou des modélisations d'observations de phénomènes naturels. Il ressort ainsi un relatif consensus sur le fait que l'acquisition des connaissances nécessaires au développement d'une telle technologie devrait nécessairement passer par

une étape d'expériences dites in-situ : des expériences d'injections dans l'atmosphère, contrôlées et observées comme des expériences de laboratoires mais au sein de l'atmosphère réelle. C'est ce que souhaiterait faire l'équipe du projet SCoPEX de l'université Harvard. La nécessité de réaliser des expériences in-situ cristallise l'opposition contre la géoingénierie solaire, en particulier dans la presse grand public et les milieux associatifs. Cette impossibilité d'expérimenter est par exemple avancé comme argument par les auteurs du manifeste Hands off mother Earth (Geoengineering monitor, 2018) en ces termes: "il ne s'agirait alors plus d'une expérience mais tout bonnement d'un déploiement, avec toutes les conséquences prévues et inattendues que cela engendrerait."

La géoingénierie solaire permettrait ainsi effectivement de refroidir la surface de la planète. Néanmoins ces méthodes ne seraient qu'une solution palliative, ne s'attaquant pas au problème de fond : la hausse de l'effet de serre liées des émissions de gaz à effet de serre. A ce titre, l'humanité ne pourrait y recourir que temporairement : pour nous soulager au moment du plus fort des effets du réchauffement climatique dans une trajectoire de baisse globale des émissions. Enfin il faut garder à l'esprit que ces méthodes jouent sur une machine climatique complexe à modéliser, et que leur étude est et restera soumises à d'importantes incertitudes. Ces incertitudes sont particulièrement importantes lorsque l'on s'intéresse aux possibles effets secondaires que ces méthodes pourraient avoir sur le climat et l'environnement : dégradation de la couche d'ozone, changement dans les régimes de précipitations, refroidissement variable selon les régions du monde et dans le temps...

■ Des enjeux de gouvernance complexes

On définit la gouvernance sur un sujet comme l'ensemble des structures, des processus et des initiatives à travers lesquels des acteurs publics et privés définissent un cadre de comportement. Dans le cas de la gestion du rayonnement solaire (Solar Radiation Management, SRM), la gouvernance désigne donc le cadre d'usage des technologies de géoingénierie solaire, incluant des vellétés d'interdiction, de régulation, voire d'encouragement.

Pourquoi avons-nous besoin d'une telle gouvernance ? A quels enjeux devra-t-elle répondre ? Quelle forme pourrait-elle prendre ?

■ Une gouvernance actuellement inexistante

Définie comme une autorité explicite pour influencer un comportement, force est de constater qu'il n'y a à ce jour pas de réelle gouvernance au sujet de la géoingénierie solaire. Il n'existe en effet aucun instrument international ou national traitant explicitement de la géoingénierie (Chalecki et al., 2018).

Sans lois internationales spécifiques à la géoingénierie solaire, la recherche, les essais et le déploiement des techniques envisagées se font "en toute confidentialité, et en l'absence de tout encadrement juridique" (Guglielmo Weber (de), 2023). Ainsi, on dénombre plusieurs tests, qui sont relevés au public après coup - au Nouveau Mexique par le projet SCoPEX par exemple.

Cependant, certaines législations déjà en place fournissent un cadre réglementaire à la géoingénierie solaire, bien qu'initialement non pensées pour ces pratiques. Aux Etats-Unis, les entreprises souhaitant effectuer des tests de dispersion d'aérosols sont par exemple soumises au Clean Air Act, au National Environmental Policy Act, et de nombreuses autres lois (Reynolds, 2019).

Les acteurs qui se positionnent principalement sur le sujet et qui proposent un encadrement n'ont cependant pas de pouvoir de gouvernance. C'est ce qu'a confirmé un expert en politique environnementale membre de The DEGREES initiative, dans l'entretien qu'il nous a accordé en novembre 2023, à travers l'image d'un graphe présenté ci-dessous.

« You could look at various, let's say non-state actors. You could look like where I work, the Degree Initiative. We consider what we're doing to be a type of governance ».

Entretien avec un expert en politiques internationales environnementales

Ce sont notamment les ONG, comme C2G2 (Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative) ou The Degrees Initiative, qui, à travers des manifestes ou des lettres ouvertes, souhaitent influencer les décideurs. La plus célèbre reste la proposition de moratoire sur la géoingénierie solaire, émanant de l'initiative Solar Engineering Non-Use Agreement.

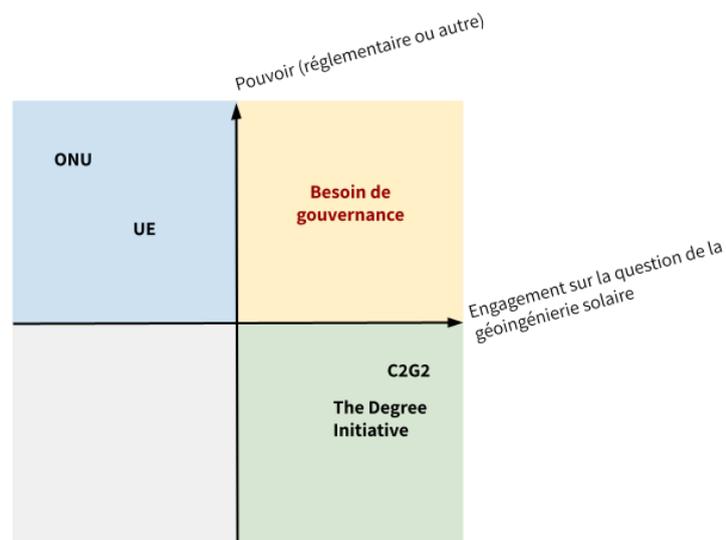


Figure 7 : Graphe du niveau d'engagement sur la géoingénierie solaire, par rapport au pouvoir de gouvernance des entités

Source : Groupe « Géoingénierie solaire », Mines Paris, 2023.

Cependant, depuis 2022, il semble que les Etats sont de plus en plus impliqués. Ils souhaitent notamment que le sujet soit pris en main par les institutions intergouvernementales en place. Certains soulignent par exemple le risque de déploiement unilatéral posé par les programmes de recherche aux Etats-Unis financés sans structures de coordination et de gouvernance internationales (Stephens et al., 2022). Ainsi, certaines institutions internationales s'emparent progressivement du sujet. La Commission européenne s'est par exemple prononcée en faveur d'une inclusion de la géoingénierie parmi les missions de l'ONU (Abnett, 2023).

Dans les faits, il faut cependant noter que la mise en place d'une telle gouvernance est très difficile. Tout comme l'action contre les émissions de gaz à effet de serre, la géoingénierie solaire implique des actions transfrontalières, et oblige donc une action collective. Par ailleurs, le contexte géopolitique actuel et les incertitudes concernant les relations entre les différents pays renforcent le problème. Certaines coordinations internationales existantes, comme pour le nucléaire ou la protection de la couche d'ozone (protocole de Montréal), montrent cependant qu'une telle gouvernance pourrait être possible (Reynolds, 2019).

■ Les risques d'une gouvernance trop faible

A l'heure actuelle, une gouvernance forte concernant la géoingénierie solaire n'a pas émergé, comme expliqué précédemment. Cela signifie que non seulement l'utilisation de techniques de géoingénierie solaire, telles que l'injection d'aérosols (Stratospheric Aerosols Injection, SAI), mais aussi son simple test nécessaire à la recherche scientifique ne sont pas réglementés. Pourtant, de telles expérimentations de la SAI à faible échelle ont déjà été effectuées, par l'entreprise américaine Make Sunsets, ainsi que par le chercheur anglais Andrew Lockley (Temple, 2023).

Une telle gouvernance, ou absence de gouvernance, pose de nombreux risques. Si ces expérimentations des technologies de géoingénierie solaire se font pour l'instant à très faible échelle, elles pourraient être accélérées et offrir à certaines entreprises ou projets la possibilité de modifier le climat sous leur seule volonté.

Par ailleurs, l'absence de gouvernance internationale établie peut favoriser l'utilisation de cette technologie par certains États au détriment d'autres pays moins puissants ou moins bien équipés. Comme le relève le rapport du GIEC, il peut exister des différences d'intérêts entre les Etats ce qui peut engendrer de nouveaux conflits : "Conflicting temperatures preferences between countries may lead to counter-geoengineering measures such as deliberate release of warming agents or destruction of deployment equipment" (Patt et al., 2022). Certains États seraient ainsi impuissants, et les effets des technologies de géoingénierie solaire déployées par d'autres pays leur seraient imposés.

C'est la raison pour laquelle certains proposent d'imposer un moratoire sur le développement de la géoingénierie solaire. Cette situation n'est pas sans rappeler le cas de l'"ocean iron fertilization", une méthode de captation de CO2 pour laquelle les Nations Unies ont voté un moratoire en 2008. Ce dernier a eu pour effet d'arrêter la plupart des recherches dans ce domaine (Tollefson, 2008). Cela ne semble pas inquiéter le fondateur de Make Sunsets, qui ne croit pas que ses injections d'aérosols puissent mener à un tel moratoire :

« When I was first getting publicity for this and first starting the company, even before I started it, some friends who work in climate tech were convinced that I would just get this banned globally if I did any launches at all. [...] I don't think that will happen. We're in a different world than we were 20 years ago. »

Entretien avec le fondateur de Make Sunsets

■ Enjeux auxquels une telle gouvernance devra répondre

On observe une convergence d'opinions sur la gouvernance souhaitée par les acteurs impliqués dans la controverse ou proposée dans les articles autour de la gestion potentielle de la géoingénierie solaire.

Dans le cas d'une interdiction du recours à la SRM, la gouvernance devrait s'effectuer par le biais de législations internationales, avec des systèmes de sanctions rigoureux pour assurer leur respect. Parallèlement, il est crucial d'établir un système robuste de surveillance et d'évaluation environnementale, permettant de suivre en continu les impacts potentiels de la SRM sur l'environnement et d'ajuster les politiques en conséquence.

En envisageant plutôt une régulation du développement, voire ultérieurement du déploiement de la SRM, la gouvernance devra s'assurer des conditions suivantes (Geoengineering monitor, 2018 ; Reynolds 2019 ; Climate Overshoot commission 2023) :

- une coordination internationale pour établir un consensus global,
- une maîtrise complète de la technologie, y compris de ses impacts sur le climat,
- un traitement équitable entre les différents territoires et pays,
- le maintien des efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en tenant compte de l'échec des Accords de Paris à limiter ces émissions,
- une stabilité dans le déploiement de la SRM, afin d'assurer une transition progressive vers d'autres solutions.

En outre, la participation publique et la transparence doivent être au cœur de la gouvernance de la SRM. Cela implique d'ouvrir les débats, les recherches et les décisions politiques à l'ensemble des parties prenantes, y compris le grand public, pour assurer une compréhension et une acceptation plus larges des mesures prises. Une gouvernance transparente et inclusive est essentielle pour renforcer la légitimité et l'efficacité des politiques de la SRM.

Peu importe les choix qui seront faits à l'avenir ; que l'on souhaite l'interdire, la développer ou bien la déployer, il apparaît aujourd'hui urgent de développer une gouvernance forte sur le sujet de la géoingénierie solaire. On entend par cela une structure internationale clairement définie, à qui les États donneraient les moyens de déterminer la direction à prendre dans une logique d'optimum collectif, en étant à l'écoute de la parole scientifique et des volontés démocratiques. Cette gouvernance doit être internationale, pour éviter toutes tensions géopolitiques pouvant émaner de recours par des entreprises, des États seuls ou des groupes d'États à des méthodes d'ingénierie climatiques. On peut par exemple imaginer que cette gouvernance soit portée par une instance existante (par exemple l'Organisation météorologique mondiale, organisme des Nations Unies faisant autorité sur les questions de climat), ou par une instance nouvelle indépendante.

■ Des implications sociales avec de fortes conséquences

Non seulement les enjeux de gouvernance sont de grande complexité, mais la géoingénierie engendre aussi des problématiques sociales multiples et conséquentes. En effet, les technologies impliquées ont des impacts variés que ce soit d'un point de vue climatique, économique ou éthique.

Technosolutionisme, cadeau empoisonné pour les générations futures, inégalités de traitement des pays selon leur niveau de développement... À quelles considérations éthiques la géoingénierie solaire doit-elle faire face ?

■ Un impact mondial inégalitaire

L'utilisation prévue de la géoingénierie solaire pour atténuer les impacts du changement climatique suscite des préoccupations majeures en raison de son impact potentiellement inéquitable sur les nations. En effet, les pays développés semblent être mieux positionnés pour exploiter les avantages potentiels de la géoingénierie solaire, grâce à leurs ressources financières et technologiques. Cette disparité pourrait créer une situation où les nations les plus riches ont la capacité de prendre des mesures unilatérales pour protéger leurs propres intérêts climatiques, laissant ainsi les pays en développement en marge de ces développements. Ce n'est pas seulement l'impact de la géoingénierie qui est inégalitaire, mais aussi les intérêts et les incitations vers ces technologies. Certains pays, confrontés de manière plus immédiate et sévère aux impacts du changement climatique (pays peu développés notamment), ou ayant des incitations instaurées (taxes sur les émissions carbone) pourraient être plus enclins à adopter la géoingénierie solaire (Wagner et Weitzman, 2012).

Scott Barrett de l'Université Columbia parle aussi du "*free riding*" et "*free driving*", qui suscitent des inquiétudes quant à la capacité des entités et des nations à agir de manière responsable dans la gestion mondiale du climat. D'une part, le *free riding* pousse les nations à ne pas fournir suffisamment d'efforts au bien public : certains pays ou acteurs préféreraient bénéficier des efforts de géoingénierie déployés par d'autres sans contribuer pleinement aux coûts ou aux risques associés. D'autre part, le *free driving*, où la géoingénierie n'est pas contrôlée, crée une incitation à s'engager dans des activités potentiellement imprudentes.

■ Une acceptabilité sociale modérée

Outre la forte méconnaissance du grand public sur le sujet, vue en introduction, les sujets de géoingénierie, une fois éclaircis, soulèvent de grands débats à toutes les échelles. On distingue trois niveaux de partage du savoir :

- les publications de recherche scientifique, qui sont très cloisonnées et ne permettent pas au grand public d'accéder à la connaissance lorsqu'il ne connaît pas les sujets et n'a pas la compétence pour les comprendre directement ;

- les vulgarisateurs, qui fournissent du divertissement au grand public en s'appuyant sur et en expliquant des thèmes scientifiques ;
- le divertissement, qui utilise des termes scientifiques sans les expliciter clairement, ce qui conduit à des désinformations comme on peut le voir dans beaucoup d'ouvrages de science-fiction.

Eliot Peper est un auteur américain qui a vulgarisé la géoingénierie solaire dans son ouvrage *Veil*, où une entreprise se lance dans la géoingénierie solaire. Son but est de partager les enjeux de la géoingénierie au grand public car selon lui, cela est nécessaire pour qu'il y ait un vrai débat et rompre avec la méconnaissance de la géoingénierie solaire.

« The general public does not have the tools to fully understand the topics mentioned in the scientific papers, and they do not know where and how to find this literature. There needs to be someone to bridge the gap between the general public and the scientific world, a vulgarizer who manages to explain the topic in simple terms all the while providing the reader with reliable scientific information. »

Entretien avec un écrivain

Son livre a permis effectivement de partager les enjeux de la géo ingénierie solaire au grand public, mais avec un impact limité. En effet, il faudrait que le sujet soit tourné de façon plus divertissante pour toucher un plus grand nombre. C'est l'exemple de Jurassic Park qui a dévoilé au grand jour les capacités de la bio-ingénierie.

Même si certains pays se prononcent contre la géo ingénierie solaire, il est possible qu'un petit pays qui n'arrive pas à gérer les impacts locaux du changement climatique décide de mettre en place la géo ingénierie solaire car c'est la seule solution possible. C'est ou cela sera sûrement une solution moins coûteuse que lutter contre la sécheresse, les vagues de chaleur, ou bien la montée des eaux.

« However, it is possible for countries that suffer the most from climate change to use solar geo-engineering as an affordable and quick solution. For example a country like the Fiji Islands or Bangladesh could think of this solution and use it because nothing else will work. »

Entretien avec un écrivain

Cette idée est reprise par Luke Iseman qui affirme qu'on ne peut pas se permettre d'attendre plus longtemps alors que la situation est déjà dramatique dans certaines régions du monde, et que l'inertie du climat fait qu'on aura encore à payer les conséquences de la situation actuelle pendant plusieurs décennies. Luke Iseman prône une utilisation de la géoingénierie solaire malgré l'existence de réglementations de peur de regretter plus tard le fait de ne s'en être pas servi.

La question de l'acceptabilité sociale dépend beaucoup de la situation sociale et économique des personnes questionnées. Pour ceux dans une situation de détresse, la question se pose beaucoup moins de l'utilisation de la géoingénierie solaire puisque cela permettrait a priori de retarder en partie les dégâts engendrés par la situation actuelle. L'acceptabilité serait beaucoup plus controversée dans les pays plus riches qui auraient plus, ou moins, de réticences à cautionner les conséquences de la géoingénierie solaire.

■ Des conséquences éthiques déterminantes pour le monde

L'utilisation de la géoingénierie solaire ne peut pas s'envisager uniquement d'un point de vue technique et scientifique. Il s'agit ici de modifier volontairement l'écosystème de notre planète afin d'atténuer l'influence des activités actuelles de l'homme sur celui-ci. L'avènement d'une société technico-solutionniste ne peut pas se faire sans des réflexions préalables sur la place de l'homme sur Terre. Il semble indispensable de prendre en compte cet aspect métaphysique, comme a pu le soulever l'économiste et philosophe australien Clive Hamilton.

La question éthique se ressent encore plus concrètement chez les associations de défense des droits humains. Le manifeste Hands Off Mother Earth (Geoengineering monitor, 2018), mentionné précédemment, évoque notamment le risque psychologique lié au projet SCoPEX en soulignant que la géoingénierie pourrait être utilisée par les politiques pour justifier la continuation des activités des industries fossiles.

Enfin, même faire de la recherche sur la géoingénierie solaire est controversé. Quand certains craignent que la recherche se transforme trop facilement en déploiement, d'autres défendent la recherche en soulignant qu'il s'agit d'une responsabilité éthique d'en faire afin que les générations futures aient des bases solides pour appuyer leurs décisions.

« C'est une responsabilité éthique de faire de la recherche. Parce que si [...], par exemple dans 20 ans, vous devez prendre une décision sur un déploiement et aujourd'hui on a arrêté la recherche, qu'est-ce que vous faites ? Comment vous basez votre décision ? Sur quoi vous pouvez baser votre décision si nous aujourd'hui on dit [qu'il ne] faut pas faire des recherches sur ce sujet, parce que si on fait de la recherche on doit déployer ? »

Entretien avec une chercheuse en chimie atmosphérique au CNRS

■ Conclusion

La géoingénierie solaire permettrait de limiter en partie la hausse des températures associée au réchauffement climatique et ses conséquences sur les écosystèmes et nos sociétés. Il s'agirait uniquement d'estomper un temps cette hausse de température mais ne pourrait en aucun cas se substituer à la mise en place d'une économie mondiale neutre en gaz à effet de serre, seule solution réelle au changement climatique. De plus, elle n'aurait aucun effet sur d'autres conséquences de nos émissions, telle l'acidification des océans.

Cela dit, la géoingénierie solaire soulève de nombreuses questions. Des questions éthiques, sur la légitimité pour l'homme de contrôler le climat ou sur le choix d'imposer de telles décisions à nos enfants. Mais également des questions techniques, tant sur la maîtrise de la méthode et ses possibles effets secondaires que sur la gouvernance à mettre en place pour assurer un développement et un déploiement juste, stable dans le temps, qui évite les tensions diplomatiques et ne compromettant en aucune façon nos efforts de réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

En fin de compte, la décision d'adopter ou non la géoingénierie solaire ne devrait pas reposer uniquement sur ses prouesses techniques ou ses promesses de résultats rapides. Elle doit être évaluée dans le cadre plus large de notre relation avec la nature et notre responsabilité envers les générations futures. C'est dans cet espace de réflexion que réside la véritable innovation – non pas seulement dans la création de nouvelles technologies et de capacités de modélisations du climat, mais dans le développement d'une nouvelle manière de penser, qui équilibre harmonieusement le progrès et la prudence, la science et la sagesse.

■ Matériel et méthodes

Nous avons réalisé un travail d'enquête à partir d'un corpus d'articles scientifiques et de presse sur ce sujet, ainsi que d'entretiens avec des acteurs majeurs de la controverse. Pour prendre en compte la vision du grand public sur la question, nous avons aussi réalisé un questionnaire.

Présentons plus en détail notre méthodologie de collecte de données primaires et secondaires, ainsi que sur leur agrégation.

- Données primaires : Entretiens

Nous avons eu la chance d'interroger cinq acteurs variés de la controverse :

- Un expert en politiques internationales environnementales spécialiste de la question de la SRM, membre de the DEGREES Initiatives.
- Un climatologue français, coauteur des rapports du GIEC. Il est une des principales figures scientifiques de la lutte contre le réchauffement climatique.
- Une scientifique membre du CNRS, spécialiste de l'atmosphère et de la formation des nuages.
- Un écrivain américain, auteur d'un roman d'anticipation, qui met en scène un monde où la géoingénierie solaire a dégénéré.
- Le fondateur d'une entreprise américaine développant des solutions de géoingénierie solaire via de la dispersion d'aérosols.

Nous avons également contacté d'autres acteurs, notamment des ONG engagées contre la géoingénierie (Hands Off Mother Earth), mais n'avons pas obtenu de réponse.

- Données primaires : Sondage

La méthodologie utilisée pour réaliser le sondage est explicitée dans le document "Analyse du sondage" qui synthétise tout le travail effectué. Les "Réponses du sondage" sont les données brutes obtenues par les "Questions du sondage".

- Données secondaires : Lectures

Nous avons sélectionné une soixantaine de lectures variées, issues de la presse, de la littérature scientifique ou encore de rapports experts. Ces lectures nous ont été suggérées par les organisateurs du cours de controverse et les personnes interrogées, ou ont été identifiées après des recherches approfondies de documentation.

- Analyse quantitative

Nous avons réalisé des analyses quantitatives sur les articles de presse contenant les termes "solar" et "geoengineering" en utilisant les outils IRaMuTeQ et Cortex. Cette approche nous a permis de suivre l'évolution des articles abordant ces sujets, d'identifier les acteurs majeurs tels que les organisations et les individus, et de regrouper les termes les plus fréquemment utilisés par thème. De plus, nous avons pu observer les liens entre ces termes, offrant ainsi une compréhension approfondie des relations au sein de ces discours.

■ Références

■ Articles de presse généraliste / presse professionnelle

Abnett K. (2023, 28 juin). EU calls for global talks on climate geoengineering risks. *Reuters*.

Disponible sur

<https://www.reuters.com/sustainability/eu-calls-global-talks-climate-geoengineering-risks-2023-06-28/>

[Consulté le 28/12/2023]

Billard S. et Noyon R. (2021, 8 août). Climat : ceux qui veulent nous sauver en agissant sur la stratosphère sont-ils des fous ? *L'Obs*. Disponible sur

<https://www.nouvelobs.com/ecologie/20210808.OBS47320/climat-ceux-qui-veulent-nous-sauver-en-agissant-sur-la-stratosphere-sont-ils-des-fous.html>. [Consulté le 21/12/2023]

Foucart S. (2022, 29 mai). Certaines des technologies envisagées pour maintenir habitable la Terre relèvent du cauchemar. *Le Monde Climat*. Disponible sur

https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/05/29/climat-certaines-des-technologies-envisagees-pour-maintenir-habitable-la-terre-relevant-du-cauchemar_6128066_3232.html [Consulté le 21/12/2023]

Garric A. (2023, 8 mars). La géoingénierie solaire : folie d'apprenti sorcier ou solution de dernier recours contre la crise climatique ?, *Le Monde*. Disponible sur

https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/02/17/la-geo-ingenierie-solaire-folie-d-apprenti-sorcier-ou-solution-de-dernier-recours-contre-la-crise-climatique_6162181_3244.html [Consulté le 28/12/2023]

Guglielmo Weber M. (de). (2023, 7 mars). Géo-ingénierie solaire : une deuxième expérience révélée par la presse. *Iris-France*. Disponible sur

<https://www.iris-france.org/174245-geo-ingenierie-solaire-une-deuxieme-experience-revelee-par-la-presse/>[Consulté le 13/01/2024]

Temple J. (2023, 1er mars). Researchers launched a solar geoengineering test flight in the UK last fall. *MIT Technology Review*. Disponible sur

<https://www.technologyreview.com/2023/03/01/1069283/researchers-launched-a-solar-geoengineering-test-flight-in-the-uk-last-fall/> [Consulté le 21/12/2023]

Wagner G. et Weitzman M. L. (2012, 24 octobre). Playing God. *David Keith's Research Group*. Disponible sur <https://keith.seas.harvard.edu/news/playing-god>. [Consulté le 11/01/2024]

■ Articles de revue scientifique

Asayama, S., Sugiyama, M., Ishii, A.. (2017). Ambivalent climate of opinions: Tensions and dilemmas in understanding geoengineering experimentation, *Geoforum*, Volume 80, 2017, Pages 82-92, ISSN 0016-7185, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.01.012>

Burns, E.T. et al. (2016). What do people think when they think about solar geoengineering? A review of empirical social science literature, and prospects for future research. *Earth's Future*, 4(11), 536–542, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016EF000461>

Chalecki, Elizabeth L., and Lisa L. Ferrari. (2018). A New Security Framework for Geoengineering. *Strategic Studies Quarterly* 12, no. 2, 82–106. <http://www.jstor.org/stable/26430817>.

Collomb, J.-D. (2020). Fifteen Years of Controversy on Solar Geoengineering in the United States, Canada, the United Kingdom and Australia. *Cahiers François Viète*, III-9.

<https://doi.org/10.4000/cahierscfv.538>

Crutzen, P.J. (2006). Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Climatic Change* 77, 211–220. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9101-y>

Gabriel, C. J. and Robock, A. (2015). Stratospheric geoengineering impacts on El Niño/Southern Oscillation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 11949–11966,

<https://doi.org/10.5194/acp-15-11949-2015>

Jones, A., et al. (2013). The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 9743–9752. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50762>

Keith, D. W., Weisenstein, D. K., Dykema, J.A. et Keutsh, F.N. (2016). Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113, 52, 14910-14914.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1615572113>

Määttänen A. (2022). Géo-ingénierie et gestion du rayonnement solaire. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 2022/1 (N° 105), p. 90-94. DOI : 10.3917/re1.105.0090.

<https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2022-1-page-90.htm>

Parker, A., et Irvine, P. J. (2018). The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering. *Earth's Future*, 6, 456–467. <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>

Patt, A., L. Rajamani, P. Bhandari, A. Ivanova Boncheva, A. Caparrós, K. Djemouai, I. Kubota, J. Peel, A.P. Sari, D.F. Sprinz, J. Wettestad, 2022: International cooperation. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.016

Pidgeon, N. et al. (2012). Exploring early public responses to geoengineering. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 370(1974), 4176–4196, doi:10.1098/rsta.2012.0099.

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2012.0099>

Pitari, G., V. Aquila, B. Kravitz, A. Robock, S. Watanabe, I. Cionni, N. De Luca, G. Di Genova, E. Mancini, and S. Tilmes (2014), Stratospheric ozone response to sulfate geoengineering: Results from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 2629–2653, doi: [10.1002/2013JD020566](https://doi.org/10.1002/2013JD020566).

Reynolds J. L. (2019). Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proceedings of the Royal Society A*. Vol. 475, no 2229, p. 20190255

<http://doi.org/10.1098/rspa.2019.0255>

Tilmes, S., et al. (2013), The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 11,036–11,058, doi:

[10.1002/jgrd.50868](https://doi.org/10.1002/jgrd.50868).

Tollefson, J. (2008). UN decision puts brakes on ocean fertilization. *Nature* 453, 704.

<https://doi.org/10.1038/453704b>

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

Stephens, J. C., Kashwan, P., McLaren, D., Surprise, K. (2022). Toward Dangerous US Unilateralism on Solar Geoengineering. *Environmental Politics*, 32:1, 171-173, DOI: [10.1080/09644016.2022.2156182](https://doi.org/10.1080/09644016.2022.2156182)

■ Littérature grise

Ambassade de France aux Etats-Unis. (2021). *Interventions sur le climat – état des lieux des initiatives aux Etats-Unis*. 82 pages. Disponible sur https://france-science.com/wp-content/uploads/2021/10/rapport_complet_les-interventions_sur_le_climat-version-final.pdf. [Consulté le 21/12/2023]

Climate Overshoot Commission. (2023). *Reducing the Risks of Climate Overshoot. Part 8, Solar Radiation Modification*. 13 pages. Disponible sur https://www.overshootcommission.org/_files/ugd/0c3b70_bab3b3c1cd394745b387a594c9a68e2b.pdf. [Consulté le 14/12/2023]

Geoengineering monitor. (2018). *Hands Off Mother Earth! Manifesto against geoengineering*. 16 pages. Disponible sur <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2018/10/home-new-EN-feb6.pdf>. [Consulté le 25/10/2023]

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. 329 pages. Disponible sur <https://doi.org/10.17226/25762>. [Consulté le 30/10/2023]

Royal Society. (2009). *Geoengineering the climate*. 98 pages. Disponible sur https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf. [Consulté le 21/12/2023]

■ Sitographie

Europresse : base de données d'informations accessible sur abonnement par Internet. Europresse.com propose aux entreprises et organismes publics abonnés une veille et de l'analyse médias, la recherche d'information dans des millions de documents, la diffusion de panoramas de presse, newsletters et rapports personnalisés, voire la détection d'influenceurs sur les médias sociaux. [Wikipédia]

GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project) : groupe de recherche international, auteur de nombreuses contributions à la recherche sur les effets climatiques de la géoingénierie solaire, en s'appuyant notamment sur des simulations numériques.

Iramuteg : logiciel libre distribué sous les termes de la licence GNU GPL, permettant de faire des analyses statistiques sur des corpus texte et sur des tableaux.

[SCoPEX](#) (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment) : groupe de recherche à Harvard, sous la direction de Frank Keutsch, auteur de nombreuses contributions à la recherche sur les effets de la géoingénierie solaire par injection d'aérosols

[Scopus](#) : Scopus référence environ 25 000 journaux scientifiques, et intègre chaque année près de 3 millions de nouvelles références : articles scientifiques, publications industrielles, collections d'ouvrages, actes de conférence. [Wikipédia]

[Solar Engineering Non-Use Agreement](#) : site web informant sur l'appel à un moratoire contre la géoingénierie solaire. Cet appel est basé sur une lettre ouverte adressée aux gouvernements et à l'ONU, mais il est également ouvert au soutien des organisations de la société civile, des ONG et des institutions de recherche nationales et internationales. À ce jour, plus de 450 universitaires de plus de 60 pays ont soutenu cet appel. [Traduit de l'anglais]

[Technology Factsheet: Solar Geoengineering](#) : Lizzie Burns et al., éditée par Bogdan Bele. Les "Technology Factsheet" ont pour objectif de fournir un bref aperçu de technologies récentes, et leurs implications sociétales. Elles n'ont pas pour vocation à être considérées comme des articles scientifiques exhaustifs. Cette "factsheet" porte sur les méthodes de géoingénierie solaire. Copyright 2019, President and Fellows of Harvard College