HAL open science

# Dilemmes de la géo-ingénierie climatique

Sophie Szopa

## To cite this version:

Sophie Szopa. Dilemmes de la géo-ingénierie climatique. Raison Présente, A paraître, 228. hal-04329177

**HAL Id: hal-04329177**

**https://hal.science/hal-04329177**

Submitted on 7 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**TEXTE à paraître dans Raison présente n°228, 2023/4**

# Dilemmes de la géo-ingénierie climatique

**Sophie Szopa**[1]

A mesure que les effets du changement climatique se font de plus en plus dramatiques et que la fenêtre d'opportunité d'un développement soutenable et résilient du point de vue climatique est en train de se refermer, les recherches sur la géoingénieurie sont de plus en plus discutées. La géoingénieurie climatique vise à "corriger" le climat à grande échelle pour pallier l'effet des activités humaines. Sur la base de la sixième évaluation du GIEC, achevée mi-2023, et du rapport intermédiaire de la commission mondiale d'éthique des sciences et technologies de l'UNESCO, nous expliquons ici les motivations qui sous-tendent ces projets, les nouveaux risques qu'ils font courir aux personnes et écosystèmes et la difficulté de positionnement des chercheurs.

## Limiter le niveau de réchauffement

Dès 1990, le premier rapport du GIEC avertissait des dangers multiples de l'accroissement des teneurs en gaz à effet de serre (GES) émis par les activités anthropiques, au premier rang desquelles l'utilisation de combustibles fossiles. Six rapports d'évaluation plus tard, le constat est sans appel : le réchauffement mondial, intégralement lié aux activités humaines, atteint 1,15°C[2] et provoque déjà des impacts graves qui touchent les systèmes humains et les écosystèmes dans toutes les régions du monde. Tant que les émissions nettes de $CO_2$ ne seront pas nulles à l'échelle mondiale et que celles des autres GES n'auront pas diminué drastiquement, le réchauffement climatique et ses effets vont s'aggraver. Au mieux, des émissions de $CO_2$ nettes nulles peuvent être atteintes d'ici 2050, ce qui implique une aggravation de la situation d'ici là avant une stabilisation ou amélioration. Face à l'augmentation de la fréquence et de la gravité des extrêmes climatiques et des coûts humains et financiers qui en résultent, certains prônent des solutions qui reposent sur une manipulation du système climatique en agissant au cœur des processus physico-chimiques qui le régissent. Le principe consiste à empêcher une partie du rayonnement solaire, qui fournit l'énergie de base au système climatique, de parvenir jusqu'au sol en la réfléchissant vers l'espace. Dès 1965, un rapport qui alertait la Maison blanche sur le péril que représentait l'accumulation de $CO_2$, proposait ce principe de modification du rayonnement solaire (SRM pour *solar radiation modification*).

[1] Sophie Szopa est directrice de recherche au CEA, chercheuse en chimie de l'atmosphère, membre de l'Institut Pierre Simon Laplace.

[2] Élévation de température de surface en moyenne sur 2013-2022 comparée à 1850-1900

## Manipuler la machine climatique

Différentes techniques sont étudiées mais la proposition la plus étudiée à ce jour consiste à reproduire artificiellement ce qui se produit lors d'une éruption volcanique de grande ampleur. Lorsqu'une telle explosion a lieu, comme dans le cas du Pinatubo en 1991, des particules soufrées (sulfates) sont injectées dans la stratosphère**,** à plus de 10 km d'altitude. Parce qu'il s'agit d'une couche atmosphérique relativement stable, les aérosols (particules) vont progressivement se répartir horizontalement dans la stratosphère et occulter une partie du rayonnement solaire, induisant un refroidissement de l'atmosphère sous cette couche et donc également en surface. Les éruptions passées, comme celle du Pinatubo, induisent un refroidissement de la température de surface de l'hémisphère où elles ont lieu de 0,1 à 0,4°, avec un refroidissement qui peut durer jusque de 3 à 5 ans. Celui-ci peut même atteindre 2°C à l'échelle régionale. C'est ce mécanisme qui a inspiré Paul Crutzen, chimiste de l'atmosphère, lorsqu'il a proposé en 2006 l'injection, artificielle cette fois, d'aérosols dans la stratosphère (noté SAI) pour juguler le réchauffement climatique. Dans la mesure où ce phénomène existe naturellement, la solution semble, sur le papier du moins, idéale. Seulement cette solution pose de nombreux problèmes à la fois pratiques et éthiques.

## Des risques difficiles à caractériser

La machine climatique repose sur des échanges de matière et d'énergie complexes et met en jeu de nombreux processus non-linéaires, pour certains très difficiles à caractériser car non reproductibles en laboratoire. Ainsi, même si les interactions entre particules et nuages sont bien comprises du point de vue théorique, la diversité des conditions rencontrées dans l'atmosphère, les échelles spatiales et temporelles impliquées et les nombreuses non linéarités dans les processus, complexifient la quantification de l'effet de petits changements sur des échelles plus larges. *Ergo,* les risques multiples induits par ces manipulations, et notamment les conséquences de grande échelle sur les nuages et le cycle hydrologique ou les conséquences à long terme sont très incertains. Si les éruptions volcaniques peuvent apparaître comme des analogues, elles ne peuvent que très partiellement informer sur la mise en pratique effective de tels procédés. Des simulations numériques idéalisées ont permis d'identifier à grands traits les bénéfices et risques et d'affiner ce que pourrait être le moins mauvais des protocoles d'injections pour limiter les répercussions négatives, mais se pose la question de la validation de ces expériences numériques à partir d'expériences réelles. Un projet, proposé par des chercheurs d'Harvard pour une expérience au-dessus de l'Arctique a été bloqué par l'agence spatiale suédoise, mais il n'existe pas de cadre juridique international dédié l'interdisant aujourd'hui formellement. Une start-up américaine a même lancé une expérience réduite d'ensemencement au-dessus du Mexique à des fins exclusivement promotionnelles. Plusieurs instances ont appelé à une interdiction de toute activité posant un risque significatif de danger au-delà des frontières en attendant une meilleure compréhension théorique des effets de telles expériences.

## Le climat n'est pas qu'une question de température

Le changement de température de surface à l'échelle mondiale est un indicateur pertinent pour fixer des objectifs politiques comme celui de l'accord de Paris[3], mais n'est qu'un changement parmi de nombreux autres dans le système climatique sous l'effet de l'accumulation de chaleur en son sein. Les effets multiples du changement climatique s'aggravent avec l'augmentation du niveau de réchauffement moyen mondial, mais certains risques ne covarient pas de manière linéaire avec celui-ci. Ils peuvent également, pour certains niveaux de réchauffement, dépasser localement des seuils critiques, par exemple pour notre physiologie ou la mortalité de certains écosystèmes, et/ou déclencher des effets irréversibles. Pour cette raison, limiter au maximum le pic de réchauffement est crucial.

D'après les modèles de climat, le déploiement du SAI aurait un bénéfice pour limiter l'élévation mondiale de la température, les extrêmes de températures et de pluies et la moyenne mondiale des précipitations qui croit sous l'effet du réchauffement. Mais si ces techniques peuvent contrebalancer certains effets des GES, elles induisent des effets résiduels voire des surcompensations à des échelles régionales et saisonnières. Dit autrement, abaisser la température moyenne mondiale par ces techniques ne revient pas à réinstaller un climat que nous avons connu, car les modifications induites par le SAI diffèrent des modifications climatiques induites par l'augmentation des GES.

## Une redistribution des cartes

Les protocoles de SAI prévoient des injections à plusieurs latitudes pour lisser les effets entre pôles et équateur, mais, même de cette manière, il apparaît des effets régionaux et saisonniers hétérogènes et des surcompensations du changement climatique. Ainsi, cela n'empêche pas déplacements de précipitations et du ruissellement des eaux de surface, un réchauffement des océans polaires et des modifications des saisons de neiges et de la couverture de glace de mer. Une baisse des précipitations est induite dans certaines régions, notamment les pluies de moussons dont dépend la vie économique de centaines de millions de personnes. Des effets sur la circulation atmosphérique comme un déplacement vers les pôles des jets de moyennes latitudes et sur ses grands modes de variabilité ont été mis en avant mais dépendent fortement des protocoles de SAI considérés dans les modèles. La stratosphère subirait un réchauffement et les vortex polaires seraient affectés. Les scénarios de SAI sont plus ou moins réalistes et incluent un partage variable entre baisse des émissions de GES et recours au SAI mais montrent des effets adverses d'autant plus grands que le recours à cette technologie est élevé.

Du point de vue conceptuel il est donc possible de corriger certains effets du changement climatique, mais cela peut induire localement des effets pires que les seuls effets du changement climatique. Par exemple, des études montrent une baisse des conditions propices à des mégafeux dans certaines régions, mais une augmentation significative dans d'autres. La redistribution des cartes est complexe et les effets en cascade ne sont pas nécessairement caractérisés par exemple sur la

[3] L'accord de Paris vise à maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale bien en dessous de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels et de poursuivre les efforts pour limiter l'augmentation de la température à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels.

production alimentaire et la disponibilité en eau potable pour les régions qui seraient négativement affectées.

D'autres effets environnementaux accompagneraient le recours au SAI. L'injection d'aérosols modifierait la chimie de la stratosphère et retarderait le rétablissement du "trou d'ozone". Le rayonnement diffus et ultra-violet parvenant au sol serait également modifié.

De plus, l'usage du SAI pourrait contrebalancer certains bénéfices obtenus grâce aux politiques de qualité de l'air en induisant des pluies acides et du dépôts d'aérosols soufrés. Ces dépôts, dont la quantité totale ne dépasserait pas les quantités actuelles, affecteraient des zones peu polluées jusqu'alors.

Enfin, même si le SAI réduisait le stress thermique que subissent les écosystèmes et qui atteint déjà des niveaux très sensibles pour certains d'entre eux (e.g. coraux), l'ensemble des changements physiques et chimiques évoqués précédemment auraient des conséquences sur la productivité des écosystèmes océaniques et terrestres difficiles à anticiper.

**Un pansement plutôt qu'un traitement curatif**

La stabilisation ou baisse de température augmenterait les puits de carbone (terrestres et océaniques) mais insuffisamment pour stopper l'augmentation de la teneur en $CO_2$ atmosphérique si les émissions de $CO_2$ persistent. Le SAI ne permettrait donc pas de réduire l'acidification de l'océan. Ces deux changements simultanés (température qui baisse et acidification qui augmente) pourraient conduire à amplifier la dégradation des coquilles de coccolithophores de l'océan de surface et avoir des conséquences sur la vie marine et sur la biomasse de poissons. La mise en œuvre la SAI peut donc contrebalancer des efforts de longue date sur la protection de sanctuaires marins ou sur la gestion de la pêche.

**S'entendre sur la terminaison**

Les aérosols ne restent qu'un à trois ans dans la stratosphère tandis qu'une partie des émissions de $CO_2$ demeurent pour des millénaires dans l'atmosphère. Il faut donc répéter périodiquement ces injections pour en maintenir l'effet. Si la mise œuvre se fait rapidement des risques de modifications brutales du cycle de l'eau sont à prévoir. Plus grave encore, la terminaison brutale de l'ensemencement, qui surviendrait en cas de désaccord diplomatique par exemple, induirait un changement très brutal de climat avec des conséquences dévastatrices sur les écosystèmes et systèmes humains vulnérables qui ne pourraient s'y adapter (l'adaptation étant déjà très difficile à la vitesse actuelle du réchauffement). Seul un arrêt graduel de l'ensemencement, en parallèle d'un retrait direct du $CO_2$ atmosphérique (lui aussi sujet aujourd'hui à de grandes incertitudes quant à son déploiement), limiterait ces effets.

**Une mise en œuvre complexe, une gouvernance à inventer**

Le déploiement du SAI redistribuerait donc les cartes des risques sans que nous ne puissions l'anticiper dans le détail. Mais qui paierait pour les dommages infligés par le déploiement de ces techniques ? Il existe d'ores et déjà des tensions autour de la réparation des pertes et dommages dans un contexte pour lequel les responsabilités historiques dans le réchauffement sont bien établies. Dans le cas de conséquences très hétérogènes d'une SAI quelles réparations pourront être envisagées ? De nouveaux risques de tensions internationales sont à anticiper. Par exemple les effets adverses réels ou perçus peuvent exacerber des conflits, particulièrement dans le cas d'un déploiement unilatéral ou impliquant une petite coalition de pays. La distinction entre effets du changement climatique et effets du déploiement serait difficile, la réparation des pertes et dommages plus encore. Aujourd'hui, il n'y a pas de loi internationale sur le SRM. Même si certaines conventions existantes contiennent des éléments pouvant s'y appliquer, rien n'empêche un Etat ou un acteur non étatique de le mettre en œuvre.

Quelle est la température mondiale idéale ? Les impacts du changement climatiques ne varient pas linéairement avec les niveaux de réchauffement global et peuvent même, régionalement, en être très découplés en raison d'effets locaux spécifiques. Ainsi, si aucune région n'est aujourd'hui épargnée par l'augmentation des extrêmes climatiques, leur nature varie et les effets du changement climatique sur certains secteurs économiques peuvent parfois, très localement, avoir des effets bénéfiques (par exemple pour l'agriculture ou la disponibilité en eau). Dans ce contexte, et dans l'hypothèse d'une capacité à fixer la température mondiale au niveau souhaité, qui déciderait de la température moyenne idéale à laquelle fixer le niveau de réchauffement ? Certains avancent que les pays subissant les effets adverses provoqués directement par la SAI ou insatisfaits du niveau de la température mondiale, pourraient être tentés d'augmenter leurs émissions de GES pour contrebalancer le SAI ou de détruire les équipements de déploiement, particulièrement s'il n'est pas décidé unanimement. Cette question n'est pas propre au SRM et se posera également dans le cas d'un déploiement massif d'émissions négatives mais elle s'ajoute aux difficultés de gouvernance déjà mentionnées.

Beaucoup s'accordent sur la nécessité d'une gouvernance mondiale qui couvre également les recherches et dont le rôle évolue à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances sur le sujet. Un élément d'attention concerne cependant le très petit

nombre et la faible diversité de chercheurs impliqués actuellement dans ces recherches. Face à l'enjeu, notamment de redistribution des cartes de risques et responsabilités, une plus grande diversité de chercheurs est indispensable pour éviter les biais et permettre à terme une expertise équilibrée et une implication équitable dans la gouvernance. Le rapport du GIEC insiste sur la nécessité de gouvernances inclusives de la transition. Les citoyens doivent donc être à même de comprendre les solutions mises en œuvre pour pouvoir les endosser ou les rejeter. Or, pour le moment, la connaissance de ces techniques et des recherches menées à ce sujet est extrêmement faible même dans les populations des pays travaillant le plus sur ce sujet.

**Une vision techno-solutionniste**

La communauté scientifique qui étudie ces techniques insiste sur la nécessité qu'elles ne soient considérées que comme un supplément à des actions profondes d'atténuation des émissions, afin notamment de limiter le pic de dépassement de l'objectif de l'accord de Paris. Leur déploiement, s'il devait être décidé pour éviter le dépassement d'un niveau mondial de réchauffement qui reste à définir ou pour freiner la vitesse de réchauffement, devrait l'être dans un cadre de gouvernance internationale et être un élément dans une stratégie générale de gestion du risque forcement en complément de retrait de carbone atmosphérique et de réductions massives des émissions et de mesure d'adaptation limiter les risques.

Implicitement cela revient à faire le choix de manipuler un système naturel pour minimiser des impacts et en particulier sur les populations. Il s'agit donc de faire un choix entre deux risques encourus, chacun étant caractérisé de manière imparfaite. Mais ce choix relève d'une vision anthropocentrée dans laquelle la responsabilité de nos actions sur l'environnement vient après notre responsabilité vis-à-vis des humains ce qui peut être contestable dans des systèmes de valeurs non anthropocentrés. La notion même de système naturel se pose tant le système climatique est perturbé par les activités humaines. Par ailleurs, chaque décision de nouvelle infrastructure d'exploitation de combustible fossile est déjà un choix implicite de modification du système climatique avec des effets irréversibles. Il n'est en effet plus possible aujourd'hui d'arguer que les méfaits environnementaux induits par nos activités le sont par méconnaissance des conséquences.

**Tout changer sans rien changer**

Indépendamment du réchauffement lié aux activités humaines, la température moyenne mondiale fluctue naturellement de quelques dixièmes de degré d'une année sur l'autre. Compte tenu de ce « bruit » naturel, la possibilité de détecter réellement l'effet du SRM sur la température globale serait d'une à deux décennies après le début des injections et donc similaire au délai pour détecter un effort massif de réduction d'émission.

Le SRM est certes envisagé en parallèle de la mise en place de mesures d'atténuation, mais connaissant les effets rebonds de chaque déploiement technologique censé supplanter la technologie précédente mais venant le plus souvent s'ajouter à celle-ci, le doute sur le déploiement exclusivement dans un cadre raisonné est de mise. Le récent rapport du GIEC montre ainsi que le déploiement de technologies disponibles offre un gisement de réduction des émissions mondiales de

GES d'ici à 2030 et, pourtant, la trajectoire actuelle des politiques réellement implémentées amène à une stagnation des émissions mondiales.

## La poule et l'œuf

Le dilemme posé aux décideurs est celui d'un choix cornélien entre deux situations qui comportent de nombreux risques complexes et partiellement évalués. La compréhension des risques associés à ces méthodes est donc un enjeu majeur. La question éthique pour les chercheurs est donc de savoir si le fait de mener ces recherches encourage l'inaction des décideurs quant à la baisse des émissions ou si, au contraire, c'est face à l'action insuffisante des politiques qu'il devient impératif, pour les chercheurs, d'aller investiguer des solutions, même à risque, pour endiguer le réchauffement. Un élément de réponse vient des financeurs de ces études. Si les Etats, notamment les U.S.A., ont, ces dernières années, lancé officiellement des programmes de recherche sur le sujet (arguant notamment de la nécessité de comprendre les risques) les recherches ont longtemps bénéficié de financements via des mécénats de technophiles et nourri les discours techno-solutionnistes. Or, la vision idéalisée du progrès et des développements technologiques est justement en bonne place parmi les raisons qui ont jusqu'à présent retardé l'action climatique. Néanmoins, il n'y a pas de consensus dans la littérature sur le fait que la recherche crée une pente glissante vers un déploiement effectif sans que celui-ci puisse être régulé.

Aujourd'hui, les scénarios économiques servant à analyser les trajectoires compatibles avec l'atteinte des objectifs politiques n'incluent pas le recours au SRM mais, par contre, considèrent quasi systématiquement un recours aux émissions négatives dans des proportions parfois très élevées. Pourtant, ces techniques qui ne sont plus aujourd'hui considérées comme de la géo-ingénierie, sont, elles aussi, sujettes à de gros enjeux éthiques et leur faisabilité à grande échelle n'est pas établie. Une partie de la communauté scientifique dénonce donc la responsabilité des chercheurs développant ces scénarios aujourd'hui très publicisés sur l'échiquier politique. Selon elle, ils légitiment, de manière implicite, le recours massif à ces technologies et affaiblissent la pression sur la baisse des émissions. Cette question de l'influence indirecte des recherches sur les imaginaires politiques n'est donc pas limitée au SRM.

Acronymes employés :

GES : gaz à effet de serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

SRM : solar radiation modification ou modification du rayonnement solaire

SAI : stratospheric aerosol injection ou injection stratosphérique d'aérosols