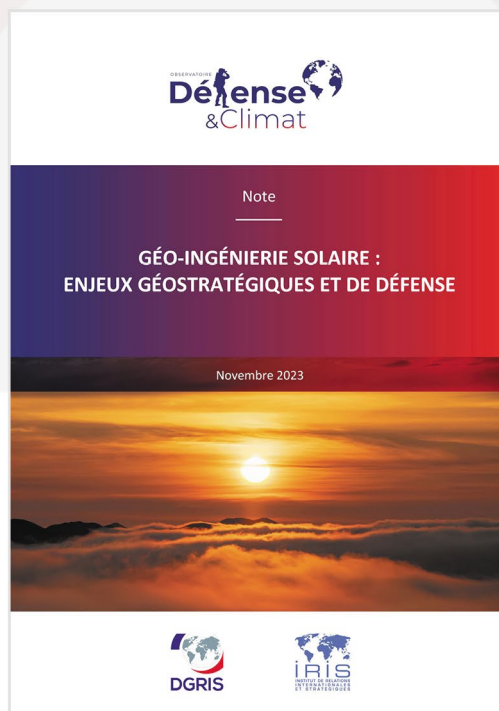


SYNTHÈSE

GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : ENJEUX GÉOSTRATÉGIQUES ET DE DÉFENSE

Novembre 2023





L'Observatoire Défense et Climat, lancé en décembre 2016, a pour objectif d'étudier les enjeux de sécurité et de défense liés au climat.

Il est coordonné par l'IRIS dans le cadre du contrat réalisé pour le compte de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Fort d'une équipe pluri et transdisciplinaire, l'Observatoire est composé de chercheurs spécialisés en relations internationales, sécurité, défense, migrations, énergie, économie, climatologie et santé. Il est dirigé par Julia Tasse et François Gemenne.

L'Observatoire a initié de nombreuses collaborations avec des partenaires européens (Pays-Bas, Luxembourg) et internationaux (Australie, États-Unis, Inde), des ONGs internationales, des organismes publics nationaux et internationaux. Ces initiatives ont permis de renforcer la coopération sur les enjeux climatiques et leurs implications sécuritaires.

L'Observatoire Défense et Climat propose des rapports et notes, organise des séminaires restreints et des conférences ouvertes au public, et anime le podcast « Sur le front climatique ».

www.defenseclimat.fr

Le ministère des Armées fait régulièrement appel à des études externalisées auprès d'instituts de recherche privés, selon une approche géographique ou sectorielle venant compléter son expertise externe. Ces relations contractuelles s'inscrivent dans le développement de la démarche prospective de défense, qui, comme le souligne le dernier Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, *« soit pouvoir s'appuyer sur une réflexion stratégique indépendante, pluridisciplinaire, originale, intégrant la recherche universitaire comme des instituts spécialisés »*.

Une grande partie de ces études sont rendues publiques et mises à disposition sur le site du ministère des Armées. Dans le cas d'une étude publiée de manière parcellaire, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie peut être contactée pour plus d'informations.

AVERTISSEMENT : Les propos énoncés dans les études et observatoires ne sauraient engager la responsabilité de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie ou de l'organisme pilote de l'étude, pas plus qu'ils ne reflètent une prise de position officielle du ministère des Armées.

À PROPOS DES AUTEURS DE LA NOTE

Autrices principales



Marine de Guglielmo Weber / IRIS

Directrice scientifique de l'Observatoire Défense & Climat, et chercheuse au sein du programme Climat, Énergie, Sécurité de l'IRIS. Elle travaille sur les enjeux stratégiques et sécuritaires transverses liés au dérèglement climatique, et s'est spécialisée dans l'étude des pratiques de modification de la météo et du climat.



Sofia Kabbej / Université du Queensland (Australie)

Membre de comité scientifique de l'observatoire Défense et Climat, Sofia Kabbej est doctorante au sein de l'école de sciences politiques et de relations internationales de l'Université du Queensland (Australie), où elle étudie l'approche française de la sécurité climatique. En parallèle, elle travaille sur les impacts sécuritaires du dérèglement climatique, et sur la géo-ingénierie.

Autrice secondaire



Laura Hebbel Boutang / IRIS

Étudiante en master Global Security à King's College London. Laura Hebbel Boutang a effectué un stage au sein du programme Climat, Énergie, Sécurité de l'IRIS à l'automne 2023.

Cette note de réflexion stratégique et prospective est consacrée à l'analyse des enjeux géostratégiques et de défense de la géo-ingénierie solaire. Le terme géo-ingénierie solaire regroupe **un ensemble de techniques et de pratiques cherchant à compenser l'augmentation de la température moyenne globale par la diminution du rayonnement absorbé par la Terre**. Cette note se divise en quatre parties : **la présentation des techniques et des risques naturels et humains associés (I) ; l'analyse des enjeux géopolitiques et stratégiques qu'elles soulèvent (II) ; quatre hypothèses et trois scénarii de prospective à l'horizon 2050 (III) ; et enfin, des recommandations à destination du ministère des Armées (IV).**

1. Présentation des techniques et risques naturels et humains associés

Cette note s'est concentrée sur les techniques de géo-ingénierie solaire qui affectent significativement les processus atmosphériques, et de ce fait soulèvent les enjeux sécuritaires les plus importants. Il s'agit de deux techniques à échelle d'intervention locale – **l'éclaircissement des nuages marins**¹ et **l'amincissement des cirrus**² ; une technique à échelle d'intervention planétaire - **l'injection d'aérosols dans la stratosphère**³ ; et une technique à échelle spatiale : l'installation de **miroirs spatiaux**⁴. Selon la littérature existante, malgré le grand nombre d'incertitudes qui demeurent, chacune de ces techniques présente des risques qui lui sont spécifiques. Par exemple, des pluies acides pourraient être provoquées par l'injection d'aérosols dans la stratosphère tandis que l'amincissement des cirrus pourrait provoquer un effet paradoxal de réchauffement.

Par ailleurs, l'ensemble de ces techniques présentent des risques communs. Elles sont susceptibles d'induire des **dérèglements significatifs du système atmosphérique et de l'activité de photosynthèse**, avec notamment pour conséquences un **dérèglement des précipitations** (sécheresses par endroits, pluies diluviennes par d'autres), une **chute des rendements agricoles** et un **affaiblissement des services écosystémiques**. Un autre risque commun à l'ensemble de ces techniques est celui du **choc terminal** : si l'une de ces techniques était déployée en l'absence d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'interruption de cette technique causerait un réchauffement bien trop rapide pour que les systèmes naturels et humains puissent s'y adapter.

¹ L'éclaircissement des nuages marins a pour but d'augmenter la réflectivité et parfois la durée de vie de certains nuages. Il s'agit d'injecter des embruns dans les nuages marins de basse altitude, omniprésents dans les océans de zones subtropicales et de moyennes latitudes, qui jouent un rôle fondamental dans le réfléchissement des rayons solaires vers l'espace.

² L'amincissement des cirrus consiste à diminuer la quantité de rayonnement terrestre absorbé par ces derniers. Localisés dans la haute troposphère, ces nuages, épais et composés de cristaux de glace, piègent une large partie du rayonnement terrestre à l'intérieur de l'atmosphère. En ce sens, leur effet réchauffant est analogue à celui des GES.

³ Cette méthode consiste en la diffusion par avion ou par ballon de particules réfléchissantes dans la stratosphère afin de créer des conditions de refroidissement similaires à celles qui suivent les événements volcaniques majeurs.

⁴ Certains projets de géo-ingénierie solaire envisagent de déployer des dispositifs réfléchissants dans l'espace extra-atmosphérique. Dans ce cadre, la stratégie privilégiée serait de placer des miroirs en orbite dans l'espace, qui pourraient réfléchir environ 2 % des rayons solaires.

2. Géo-ingénierie solaire : un objet politique au potentiel conflictuel

L'analyse de l'état actuel du développement de la géo-ingénierie solaire témoigne d'un intérêt certain de la part des grandes puissances pour cette technologie, et d'une avance nette des États-Unis en matière de financement, de recherche et d'expérimentation. Pour autant, il n'existe pour l'heure aucun cadre de gouvernance multilatéral dédié à la géo-ingénierie solaire.

Le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait être guidé par des intérêts politiques particuliers, plutôt que des objectifs climatiques globaux. Ainsi, la géo-ingénierie solaire peut être appréhendée 1) comme un outil **de préservation d'intérêts économiques** ; 2) comme **un outil de protection** ; 3) comme **un outil de négociation sur la scène internationale**.

Ces technologies pourraient nourrir des tensions entre États. Tout d'abord, le déploiement de la géo-ingénierie solaire **pourrait mener à l'attribution d'évènements climatiques extrêmes à l'intervention d'un tiers**. Ensuite, de tensions pourraient émerger du fait de **désaccords entre États sur les effets souhaités, et les modalités d'un déploiement**. De tels désaccords pourraient **induire un risque d'escalade**, et aboutir à des opérations de contre-géo-ingénierie. Enfin, le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait conduire à **une militarisation de la technologie**, sinon être **mis en œuvre à des fins hostiles**.

3. Scénarii de prospective

Scénario	Déploiement de géo-ingénierie	Conséquences géopolitiques, conséquences pour la France
2047 - Déploiement unilatéral par les États-Unis	Opération d'injection d'aérosols dans la stratosphère organisée unilatéralement par les États-Unis.	Polarisation des relations entre États. Opposition de la Chine et de la Russie et menace d'une intervention de contre-géo-ingénierie. Déploiement par la France d'efforts diplomatiques afin de « ramener à la raison » son partenaire américain.
2050 - La Chine et le projet ArcticX	Opération d'éclaircissement des nuages marins organisée par les États-Unis, la Chine et l'Inde en Arctique.	Opposition de la Russie, qui détruit deux navires utilisés pour l'opération de géo-ingénierie. La France augmente sa présence militaire dans la région, et doit organiser une opération HADR au Sénégal à la suite d'une sécheresse dévastatrice.
2037 - La géo-ingénierie solaire sur demande : un nouveau bien de consommation	Une multitude d'opérations d'injection d'aérosols dans la stratosphère par des particuliers.	Dénonciation de la Chine qui se voit confirmée dans son rôle de puissance écologique, et forte extension des zones d'influence chinoise. Perte d'influence de la France, qui ne condamne pas ce mouvement, auprès des pays en développement.

4. Recommandations

1

Intégrer dans nos stratégies de défense une réflexion sur la géo-ingénierie solaire en tant qu'outil politique, géostratégique et militaire, et sur ses conséquences géostratégiques.

2

Mettre en place une veille scientifique, technologique et géostratégique pour suivre l'évolution des projets de géo-ingénierie solaire. Anticiper la capacité de différents acteurs à maintenir une avance technologique.

3

Estimer les opportunités et risques que présente la géo-ingénierie solaire pour la France, et développer une réflexion sur son positionnement géostratégique vis-à-vis de cette question dans le cadre des discussions internationales.

4

Caractériser l'état d'avancement des États-Unis, de la Chine et de la Russie en matière de géo-ingénierie solaire.

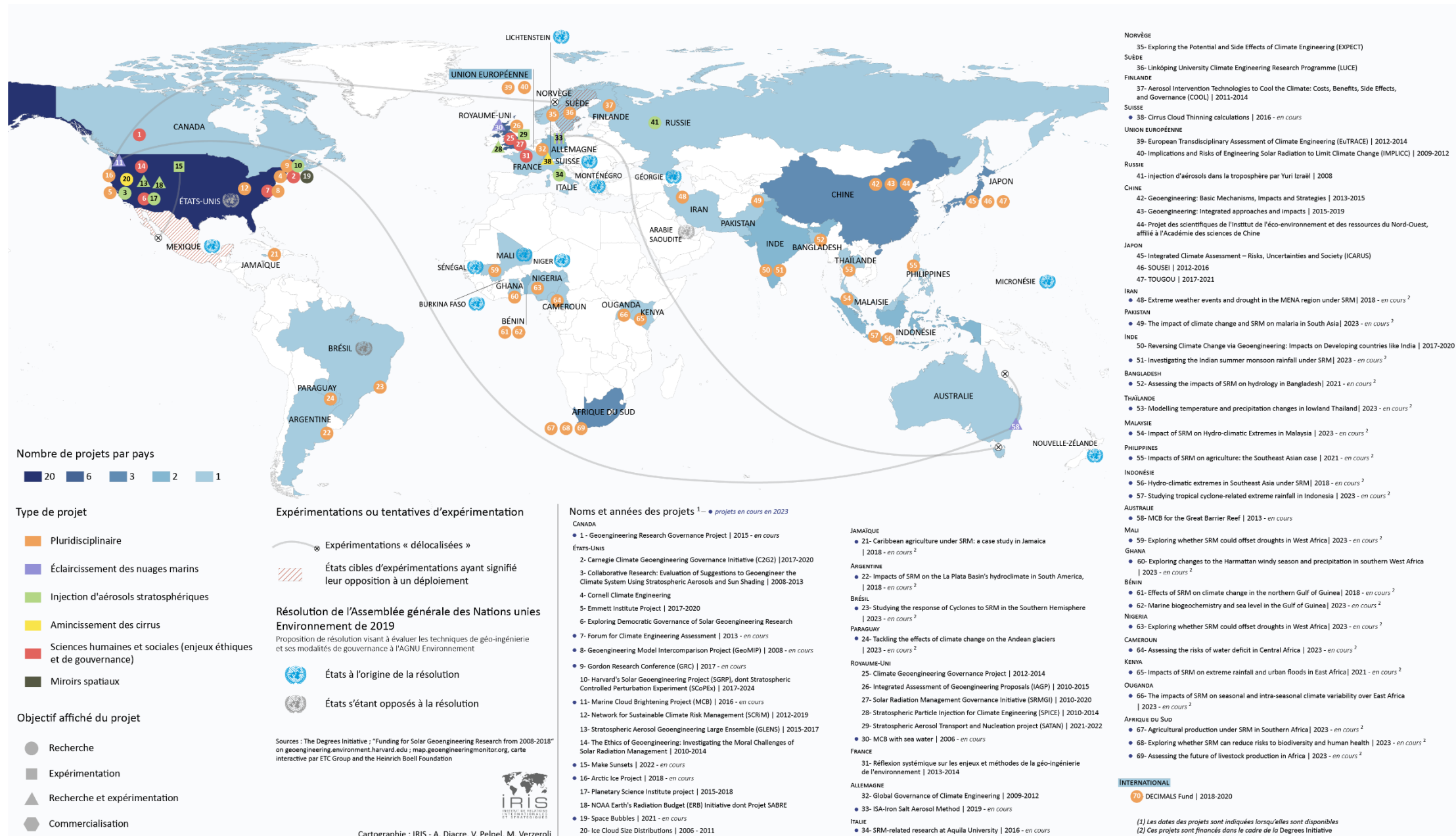
5

Promouvoir le partage d'information sur la géo-ingénierie solaire avec nos partenaires.

6

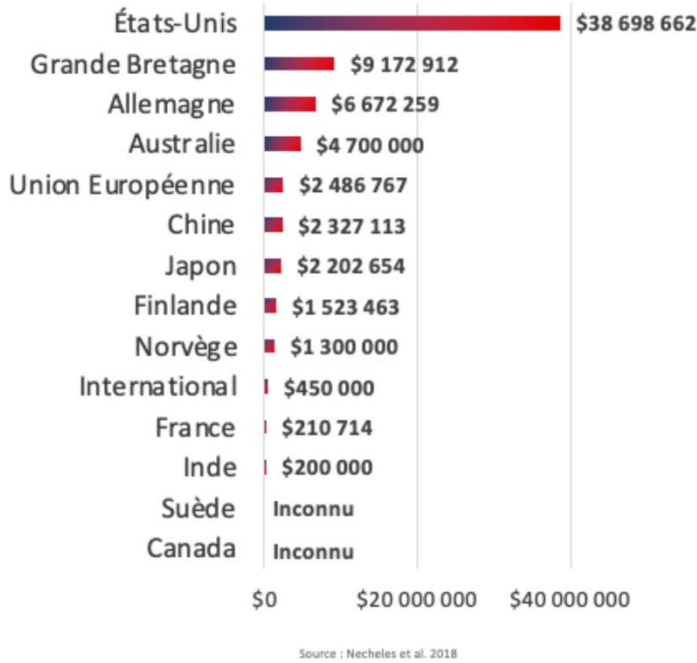
Renforcer les partenariats avec les instituts de recherches en sciences atmosphériques (Ex. MétéoFrance), et intégrer des recherches sur les effets possibles de la géo-ingénierie solaire.

Annexes 1. Carte : principaux projets de géo-ingénierie solaire dans le monde

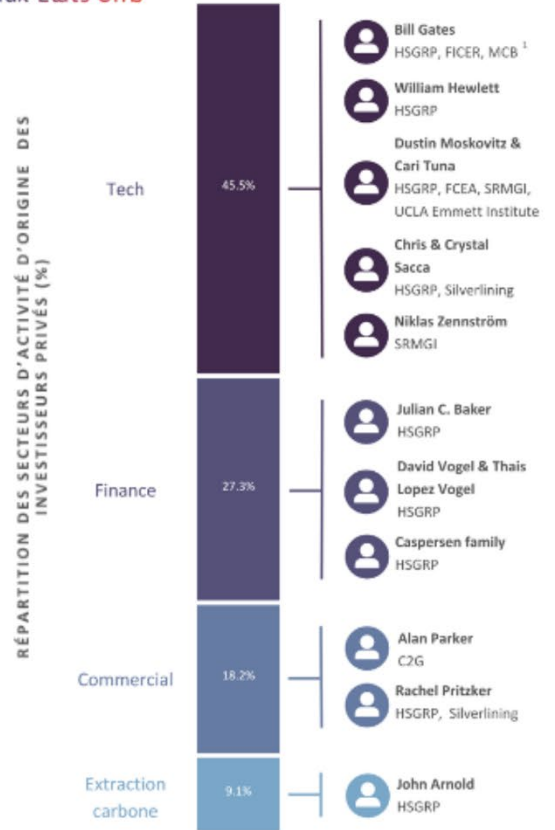


La géo-ingénierie solaire suscite de plus en plus d'attention et d'investissement à travers le monde. L'infographie ci-dessous (a) montre la domination des États-Unis en termes d'investissements, loin devant la Grande Bretagne et l'Allemagne en seconde et troisième position. Avec des investissements respectifs de 210 714 et 200 000 dollars US, la France et l'Inde se retrouvent derniers au classement. Le montant total des investissements de la Suède et du Canada reste inconnu.

a) Somme des investissements en géo-ingénierie solaire par pays entre 2008 et 2018



b) Répartition des principaux investisseurs privés en géo-ingénierie solaire en fonction de leur secteur d'activité aux États-Unis



c) La géo-ingénierie solaire comme outil politique



Un outil permettant de prolonger les modes de vies et intérêts dépendants des énergies fossiles.



Un outil permettant de protéger des territoires et des capacités militaires.



Un outil permettant de négocier sur la scène internationale.

d) Le potentiel conflictuel de la géo-ingénierie solaire

- 1 Tensions à cause des conséquences environnementales et leur attribution à un tiers.
- 2 Utilisation à des fins hostiles.
- 3 Divergences d'intérêts géopolitiques sur une zone précise.
- 4 Suspicion de surveillance.
- 5 Désaccords sur les effets et les modalités de déploiement.
- 6 Cible lors d'un conflit.

Au-delà de la possibilité d'utiliser la géo-ingénierie solaire comme outil d'adaptation au changement climatique, cette dernière pourrait également servir des intérêts politico-stratégiques. En outre, le développement et le possible déploiement de ces techniques contribuent à invisibiliser l'enjeu de l'atténuation. Ainsi, la géo-ingénierie solaire réduirait l'ambition mondiale de réduction des émissions et possède également un fort potentiel conflictuel (d).

¹ HSGRP: Harvard Solar Geoengineering Project; FICER: Fund for Innovative Climate and Energy Research; MCB: Marine Cloud Brightening Project; SRMGI: Solar Radiation Management Governance Initiative; FCEA: Forum for Climate Engineering Assessment; C2G: Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative.

L'ANALYSE DES ENJEUX SÉCURITAIRES ET DE DÉFENSE LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

PUBLICATIONS | PODCAST « SUR LE FRONT CLIMATIQUE » | ÉVÈNEMENTS



www.defenseclimat.fr



Note

GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : ENJEUX GÉOSTRATÉGIQUES ET DE DÉFENSE

Novembre 2023



L'Observatoire Défense et Climat, lancé en décembre 2016, a pour objectif d'étudier les enjeux de sécurité et de défense liés au climat.

Il est coordonné par l'IRIS dans le cadre du contrat réalisé pour le compte de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Fort d'une équipe pluri et transdisciplinaire, l'Observatoire est composé de chercheurs spécialisés en relations internationales, sécurité, défense, migrations, énergie, économie, climatologie et santé. Il est dirigé par Julia Tasse et François Gemenne.

L'Observatoire a initié de nombreuses collaborations avec des partenaires européens (Pays-Bas, Luxembourg) et internationaux (Australie, États-Unis, Inde), des ONG internationales, des organismes publics nationaux et internationaux. Ces initiatives ont permis de renforcer la coopération sur les enjeux climatiques et leurs implications sécuritaires.

L'Observatoire Défense et Climat propose des rapports et notes, organise des séminaires restreints et des conférences ouvertes au public, et anime le podcast « Sur le front climatique ».

www.defenseclimat.fr

Le ministère des Armées fait régulièrement appel à des études externalisées auprès d'instituts de recherche privés, selon une approche géographique ou sectorielle venant compléter son expertise externe. Ces relations contractuelles s'inscrivent dans le développement de la démarche prospective de défense, qui, comme le souligne le dernier Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, *« soit pouvoir s'appuyer sur une réflexion stratégique indépendante, pluridisciplinaire, originale, intégrant la recherche universitaire comme des instituts spécialisés »*.

Une grande partie de ces études sont rendues publiques et mises à disposition sur le site du ministère des Armées. Dans le cas d'une étude publiée de manière parcellaire, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie peut être contactée pour plus d'informations.

AVERTISSEMENT : Les propos énoncés dans les études et observatoires ne sauraient engager la responsabilité de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie ou de l'organisme pilote de l'étude, pas plus qu'ils ne reflètent une prise de position officielle du ministère des Armées.

À PROPOS DES AUTRICES DE LA NOTE

Autrices principales



Marine de Guglielmo Weber / IRIS

Directrice scientifique de l'Observatoire Défense & Climat, et chercheuse au sein du programme Climat, Énergie, Sécurité de l'IRIS. Elle travaille sur les enjeux stratégiques et sécuritaires transverses liés au dérèglement climatique, et s'est spécialisée dans l'étude des pratiques de modification de la météo et du climat.



Sofia Kabbej / Université du Queensland (Australie)

Membre de comité scientifique de l'observatoire Défense et Climat, Sofia Kabbej est doctorante au sein de l'école de sciences politiques et de relations internationales de l'Université du Queensland (Australie), où elle étudie l'approche française de la sécurité climatique. En parallèle, elle travaille sur les impacts sécuritaires du dérèglement climatique, et sur la géo-ingénierie.

Autrice secondaire



Laura Hebbel Boutang / IRIS

Étudiante en master Global Security à King's College London. Laura Hebbel Boutang a effectué un stage au sein du programme Climat, Énergie, Sécurité de l'IRIS à l'automne 2023.

TABLE DES MATIÈRES

GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : RISQUES NATURELS ET RISQUES HUMAINS.....	8
1. Quelles techniques, quels projets ?.....	9
A - <i>Géo-ingénierie solaire locale par modification des nuages.....</i>	<i>9</i>
B - <i>Géo-ingénierie solaire planétaire : Injection d'aérosols dans la stratosphère.....</i>	<i>12</i>
C - <i>Géo-ingénierie solaire spatiale par miroirs spatiaux.....</i>	<i>14</i>
2. Risques naturels, risques humains	14
A- <i>« Aléa moral » et compromission des politiques climatiques.....</i>	<i>14</i>
B- <i>Incertitudes scientifiques, et risques météo-climatiques, alimentaires, sanitaires.....</i>	<i>15</i>
Tableau – Risques naturels et humains des techniques de géo-ingénierie solaire selon leur type.....	16
C- <i>Verrouillage sociotechnique : vers un « choc terminal » ?.....</i>	<i>18</i>
GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : UN OBJET POLITIQUE AU POTENTIEL CONFLICTUEL.....	19
1. La géo-ingénierie solaire : un secteur en développement.....	20
A - <i>Une diversité d'acteurs aux rôles complémentaires.....</i>	<i>20</i>
B - <i>Un intérêt certain des grandes puissances, pourtant teinté d'opacité.....</i>	<i>22</i>
2. La géo-ingénierie solaire : un nouvel objet de gouvernance et de compétition	24
A - <i>Une gouvernance internationale de la géo-ingénierie solaire qui peine à émerger.....</i>	<i>24</i>
B - <i>Un secteur marqué par la rivalité entre puissances.....</i>	<i>25</i>
3. La géo-ingénierie solaire : un outil politique au potentiel conflictuel.....	26
A - <i>Une technologie permettant de faire valoir des intérêts, de protéger et de négocier..</i>	<i>26</i>
B - <i>Une technologie pouvant contribuer au déclenchement d'un conflit ou servir de cible</i>	<i>28</i>
PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS.....	32
1. Principales hypothèses de déploiement	33
A - <i>Hypothèse 1 : un déploiement multilatéral de la géo-ingénierie solaire.....</i>	<i>33</i>
B - <i>Hypothèse 2 : un déploiement unilatéral de la géo-ingénierie solaire.....</i>	<i>33</i>
C - <i>Hypothèse 3 : un déploiement par une coalition d'États.....</i>	<i>33</i>
D - <i>Hypothèse 4 : un déploiement par des acteurs non-étatiques.....</i>	<i>34</i>
2. Scénarii de prospective : la géo-ingénierie solaire à l'horizon 2050	34
Scénario 1 : <i>Déploiement unilatéral par les États-Unis.....</i>	<i>34</i>
Scénario 2 : <i>La Chine et le projet ArcticX.....</i>	<i>36</i>

<i>Scénario 3 : la géo-ingénierie solaire sur demande, un nouveau bien de consommation....</i>	<i>38</i>
3. Recommandations	41
GLOSSAIRE	42
ANNEXES	45
Annexes 1. Carte : principaux projets de géo-ingénierie solaire dans le monde.....	46
Annexes 2. Infographies : enjeux financiers, politiques et sécuritaires de la géo-ingénierie.....	47
SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE.....	48

Dans son 6^e rapport d'évaluation, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) alerte sur la **forte probabilité de dépassement du seuil d'augmentation de température de 1.5°C depuis la période préindustrielle d'ici la fin du siècle** (GIEC, 2022, v.). La trajectoire d'émission de gaz à effet de serre (GES) actuelle, qui devrait nous mener à un dépassement de ce seuil avant 2030, se traduit déjà par une **insécurité climatique extrêmement forte**. En témoigne la multiplication des aléas météo-climatiques qui ont frappé tout autour du globe au cours de l'année 2023, poussant le secrétaire général des Nations unies, Antonio Guterres, à déclarer : « L'effondrement climatique a commencé » (*Libération*, 2023, 6 septembre).

Cet échec de la communauté internationale à mettre en place des politiques efficaces et tangibles d'atténuation a suscité un regain d'intérêt pour le développement de « solutions », soit des réponses technologiques aux changements climatiques – à l'instar de **la géo-ingénierie climatique : un ensemble de techniques devant permettre l'intervention à grande échelle sur le système climatique, dans le but d'atténuer les changements climatiques et/ou d'en réduire les effets**. La géo-ingénierie s'articule autour de **deux grandes familles**, regroupant elles-mêmes des techniques et pratiques diversifiées : d'une part, **l'extraction du CO₂ présent dans l'atmosphère** (« *carbon dioxide removal* », ou CDR) et d'autre part, **la modification du bilan radiatif¹**, souvent assimilée à une modification du rayonnement solaire (« *solar radiation management* », ou SRM²), cherchant à **compenser l'augmentation de la température moyenne globale par une diminution du rayonnement absorbé par la Terre** (GIEC, 2022, 168).

Si la capture carbone a connu des développements rapides depuis le début des années 2000, les techniques de géo-ingénierie solaire, moins avancées technologiquement, n'ont connu leurs premiers projets d'application sur le terrain qu'au fil des dernières années. Contrairement à des techniques peu invasives telles que l'utilisation de peintures blanches pour augmenter l'albédo³ des surfaces urbaines, certains projets de géo-ingénierie solaire entendent déployer **des dispositifs techniques et/ou chimiques dans les nuages, dans l'atmosphère, ou dans l'espace**. C'est le cas de **l'injection d'aérosols dans la stratosphère** (*stratospheric aerosol Injection, SAI*), **l'éclaircissement des nuages marins** (*marine cloud brightening, MCB*), **l'amincissement des cirrus⁴** (*cirrus cloud thinning, CCT*) ou encore **l'installation de miroirs dans l'espace** (*space sunshades*).

¹ cf. définition dans le glossaire.

² Nous verrons cependant que certaines techniques ne cherchent pas à diminuer la part de rayonnement solaire absorbé par la Terre, mais à augmenter la part de rayonnement terrestre libéré par la Terre.

³ cf. définition dans le glossaire.

⁴ cf. définition dans le glossaire.

Ces techniques et leurs développements récents mettent en lumière la perspective d'un déploiement à grande échelle de la géo-ingénierie solaire au cours des décennies futures. Aussi apparaît-il nécessaire d'explorer les enjeux sécuritaires et stratégiques soulevés par ces techniques, ce que cette note se propose de faire en quatre temps : la **présentation des techniques étudiées et des risques naturels et humains associés (I)** ; l'**analyse des enjeux géostratégiques et de défense qu'elles soulèvent (II)** ; **quatre hypothèses, et trois scénarii de prospective narrant le déploiement de techniques de géo-ingénierie solaire à l'horizon 2050, associés à des recommandations à destination du ministère des Armées (IV).**

GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : RISQUES NATURELS ET RISQUES HUMAINS

1. Quelles techniques, quels projets ?

A - Géo-ingénierie solaire locale par modification des nuages

Deux techniques de géo-ingénierie solaire locale par modification des nuages ont été développées : l'éclaircissement des nuages marins, et l'amincissement des cirrus. Ces techniques peuvent être déployées localement dans le cadre d'une stratégie de refroidissement d'un espace précis, mais elles pourraient également être multipliées et adossées à d'autres techniques dans la perspective d'un refroidissement planétaire global.

L'éclaircissement des nuages marins a pour but d'augmenter la réflectivité et parfois la durée de vie de certains nuages. Il s'agit d'injecter des embruns dans les nuages marins de basse altitude, omniprésents dans les océans de zones subtropicales et de moyennes latitudes, qui jouent un rôle fondamental dans le réfléchissement des rayons solaires vers l'espace.

En Australie, des chercheurs de l'Institut des Sciences Marines de Sydney ainsi que de l'École des Géosciences de Sydney proposent, à travers le projet « **Marine cloud brightening for the Great Barrier Reef** » (*Great Barrier Reef Foundation, 2023*), l'éclaircissement des nuages marins au-dessus de la grande barrière de corail comme stratégie de protection du récif. La recherche et la modélisation du projet ont débuté en 2013, tandis que des essais en haute mer ont été effectués entre 2020 et 2022. Daniel Harrison, responsable du projet, envisage d'autres essais sur le terrain dans les années à venir (Weiss, 2022). En Écosse, Stephen Salter, professeur à l'Université d'Édimbourg, mène un projet similaire depuis 2006. Le procédé mis en œuvre dans le cadre de ces deux projets consiste à extraire, depuis un navire, de l'eau salée pour ensuite la vaporiser dans l'air par le biais d'une turbine (Latham et al., 2012).



Photographie d'un test dans le cadre du projet Marine cloud brightening (Crédits : Brendan Kelaher/SCU)

Les coûts réels associés à l'éclaircissement des nuages marins – et plus généralement, à l'ensemble des techniques de géo-ingénierie solaire – sont encore incertains, lorsqu'ils ne sont pas soumis au secret commercial. Le rapport publié par la Royal Society en 2009 propose cependant une estimation : **1,2 milliard de dollars américains pour la mobilisation de 300 à 400 bateaux par an, plus les coûts d'exploitation** (Royal Society, 2009).

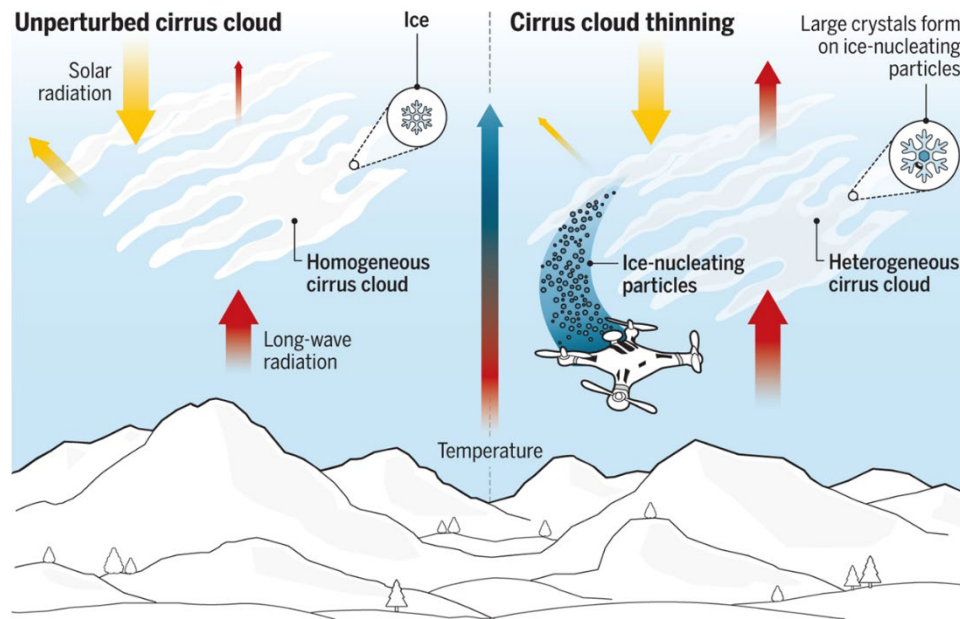
Tandis que l'éclaircissement des nuages marins consiste à augmenter la part de rayonnement solaire⁵ qu'ils réfléchissent, l'amincissement des cirrus consiste à diminuer la quantité de rayonnement terrestre⁶ absorbé par ces derniers. Localisés dans la haute troposphère⁷, ces nuages, épais et composés de cristaux de glace, piègent une large partie du rayonnement terrestre à l'intérieur de l'atmosphère. En ce sens, leur effet réchauffant est analogue à celui des GES (Ambassade de France aux États-Unis, 2021, 62).

Lorsque les cristaux de glace qui composent ces nuages sont petits et nombreux, les cirrus sont épais et laissent passer peu de rayonnement, maintenant la chaleur sur Terre. À l'inverse, un cirrus plus fin, laissant passer plus de rayonnement vers l'espace, est composé de cristaux plus volumineux et moins nombreux (Aslam et al., 2018). **Le processus d'amincissement des nuages cirrus vise ainsi à stimuler la création de cristaux plus volumineux en injectant de noyaux de glace tel que l'iodure de bismuth et des particules d'acide sulfurique ou nitrique, dans les zones où ces nuages se forment naturellement.** Ces injections produiraient donc des cirrus avec des particules de glace plus conséquentes ainsi qu'une durée de vie plus courte, permettant une **augmentation du rayonnement terrestre libéré dans l'espace.**

⁵ Cf. définition dans le glossaire.

⁶ Cf. définition dans le glossaire.

⁷ Cf. définition dans le glossaire.



Comportement d'un nuage cirrus avant/après intervention (Source : Lohmann & Gasparini, 2017)

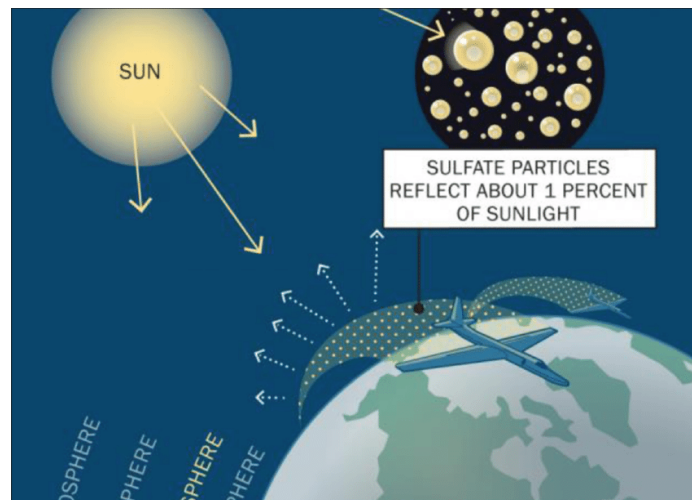
La connaissance des cirrus demeure cependant spéculative et incertaine, et les projets d'amincissement des cirrus sont encore en phase de modélisation à travers le monde. On y retrouve notamment des projets américains tels que l'***Ice Cloud Size Distributions*** introduits par l'Institut de Recherche du Désert en coopération avec l'Institut coopératif pour les Études Météorologiques Satellites de l'Université de Wisconsin, ou encore le projet ***Cirrus Cloud Thinning calculations*** de l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de Zurich.

À ne pas confondre : géo-ingénierie solaire et modification de la météo

L'éclaircissement des nuages marins et l'amincissement des cirrus sont deux techniques de géo-ingénierie solaire par ensemencement des nuages, c'est-à-dire par injection de particules dans les nuages. Cependant, ces techniques ne doivent pas être confondues avec l'ensemencement des nuages pour la modification de la météo, qui vise à influencer les précipitations en stimulant la formation de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace dans les nuages. Cette méthode repose sur l'introduction de substances telles que des particules de sel (utilisées dans le cadre de l'éclaircissement des nuages marins) ou d'iodure d'argent dans les nuages, favorisant la condensation ou la congélation de l'humidité atmosphérique. **L'objectif principal de l'ensemencement des nuages est de provoquer des précipitations dans des contextes de sécheresse, ou d'atténuer les chutes de grêle. Si cette technique a par le passé été utilisée à des fins militaires (par exemple, dans le cadre de l'opération Popeye menée par l'armée américaine durant la guerre du Vietnam), elle est aujourd'hui utilisée à des fins économiques, notamment agricoles.**

B - Géo-ingénierie solaire planétaire : Injection d'aérosols dans la stratosphère

Contrairement aux pratiques de géo-ingénierie locale par modification des nuages, **l'injection d'aérosols dans la stratosphère est une technique dont l'échelle d'intervention est planétaire**. Cette méthode consiste en la **diffusion par avion ou par ballon de particules réfléchissantes dans la stratosphère afin de créer des conditions de refroidissement similaires à celles qui suivent les évènements volcaniques majeurs**⁸. Il s'agit de la technique de modification du bilan radiatif la plus étudiée, mais également la plus controversée, précisément pour sa visée planétaire et l'incertitude scientifique qui l'accompagne (Pasztor, 2023).



Dispersion d'aérosols réfléchissants dans la stratosphère (Crédits : Funnel, Inc.)

Jusqu'à présent, la majorité des modélisations de ce procédé ont simulé des injections à basse latitude pour refroidir la planète de manière relativement uniforme. Cependant, **le lieu d'injection peut varier selon l'objectif du déploiement**. Une stratégie centrée sur la préservation de l'Arctique (avec, par exemple, une injection à 60°N), pourrait refroidir plus efficacement les hautes latitudes et moins efficacement les basses latitudes (Lee et al., 2022 ; Robock et al.2008). Du fait de la circulation atmosphérique, **l'ensemble de la planète serait néanmoins affecté par la dispersion d'aérosols dans la stratosphère**.

Il s'agit par ailleurs d'une **méthode complexe, énergivore, et potentiellement coûteuse**. En 2009, Alan Robock et ses collègues ont réalisé des estimations du coût annuel associé à l'injection d'un téragramme (10^{12} grammes) de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. Selon les méthodes utilisées, ce

⁸ L'émission de particules soufrées et de poussières associée aux éruptions volcaniques est en effet susceptible d'entraîner un refroidissement de la température planétaire. Après l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines en 1991, on a par exemple constaté une baisse d'un demi-degré de la température moyenne globale.

coût annuel pourrait aller **de 225 millions** (correspondant à la mobilisation de 9 avions de l'armée de l'air américaine McDonnell Douglas KC-10 Extender, qui feraient chacun 3 vols par jour), **à 21 milliards de dollars américains** (correspondant à l'envoi de 37 000 ballons stratosphériques par jour) (Robock et al., 2009). Wake Smith et Gernot Wagner considèrent quant à eux un scénario où l'on commencerait à déployer l'injection d'aérosols dans la stratosphère en 2033, ce avec huit aéronefs totalisant plus de 4 000 vols par an. Selon eux, ces chiffres devraient augmenter rapidement jusqu'en 2047, date à laquelle il faudrait réaliser plus de 60 000 vols par an, ce qui entraînerait **des coûts moyens de 2,25 milliards de dollars américains par an**. Ils considèrent également qu'aucun aéronef actuel ne dispose aujourd'hui des capacités techniques nécessaires à la dispersion d'aérosols dans la stratosphère, ce qui impliquerait **de nouveaux développements technologiques pour l'élaboration d'aéronefs dédiés** (Smith & Wagner, 2018).

De nombreux projets de modélisation et de recherche de SAI ont été menés depuis une dizaine d'années. Cependant, trois projets ont davantage attiré l'attention du fait de leurs expérimentations ou tentatives d'expérimentations à petite échelle.

Premier projet de grande ampleur : SCoPEX, dirigé par l'Université d'Harvard (Harvard University, 2023), visant à **injecter des aérosols dans la stratosphère grâce à un ballon de haute altitude à 20 kilomètres de la surface de la Terre**. Les sites d'expérimentation, initialement basés en Arizona et au Nouveau-Mexique, ont été déplacés en 2020 au nord de la Suède afin d'effectuer un premier test technique durant l'été 2021 : un premier envol de ballon, sans dispersion d'aérosols. Cependant, en mars 2021, les essais ont été annulés en raison de l'opposition du conseil Sami, de la société civile suédoise ainsi que d'un certain nombre de chercheurs.

En septembre 2022, des ballons *Stratospheric Aerosol Transport and Nucléation (SATAN)* ont été relâchés par une équipe de chercheurs britanniques, menée par Andrew Lockley et en partenariat avec European Astrotech. Ces ballons ont relâché une centaine de grammes de soufre dans la stratosphère. Il s'agirait de la première fois qu'une quantité de gaz mesurée a été libérée de manière vérifiable dans le cadre d'un projet de géo-ingénierie solaire (Temple, 2023).

Enfin, la start-up Make Sunsets, fondée par Luke Iseman et Andrew Song aux États-Unis, s'est démarquée par sa volonté de commercialiser la géo-ingénierie solaire. En 2022, l'entreprise a mené des expérimentations sur le sol mexicain, relâchant dans la stratosphère des ballons comportant approximativement 10g de dioxyde de soufre chacun. L'objectif de l'entreprise était de vendre, par la suite, des « crédits de refroidissement », un crédit étant équivalent à un gramme de leurs ballons relâchés dans l'espace. Ces expérimentations ayant suscité la désapprobation du gouvernement mexicain, le projet se poursuit maintenant à proximité de Reno, dans le Nevada.

C- Géo-ingénierie solaire spatiale par miroirs spatiaux

Certains projets de géo-ingénierie solaire envisagent de déployer des dispositifs réfléchissants dans l'espace extra-atmosphérique. Dans ce cadre, **la stratégie privilégiée serait de placer des miroirs en orbite dans l'espace, qui pourraient réfléchir environ 2% des rayons solaires** (UNEP, 2023). Il s'agit néanmoins de la technique la moins avancée et la moins étudiée (O'Neill, 2022), principalement pour sa complexité et pour ses coûts. De fait, les miroirs devraient être transportés par une fusée, et placés à approximativement 1 500 000 kilomètres de la Terre au point Lagrange L1. À cet endroit, l'attraction gravitationnelle de la Terre compense l'attraction gravitationnelle du Soleil, de telle sorte que les objets peuvent être fixés en orbite autour de la Terre (Siegel, 2020).

Selon le rapport publié sur la géo-ingénierie solaire par les Nations unies en 2023, **ces miroirs auraient une durée de vie d'approximativement 20 ans, et un coût d'implémentation de plusieurs milliards de dollars américains** (UNEP, 2023). Toutefois, cette technique pourrait faire l'objet d'un intérêt commercial croissant puisqu'il s'agirait également d'une **potentielle source d'énergie renouvelable, ainsi qu'une opportunité pour l'ouverture d'un nouveau marché** (Baum et al., 2022). À ce jour, seul un projet de géo-ingénierie spatiale, intitulé Space Bubbles (MIT Senseable City Lab, 2023), est porté par une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT), mais il demeure à un stade très théorique.

2. Risques naturels, risques humains

A- « Aléa moral » et compromission des politiques climatiques

La géo-ingénierie solaire, en masquant les effets des changements climatiques plutôt qu'en les traitant à leur source, constitue une distraction à l'égard des politiques tangibles et concrètes d'atténuation (C2G Carnegie Climate Governance Initiative, 2022). Ainsi, un « aléa 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 augmente sous l'effet des « **promesses technoscientifiques** » formulées par leurs promoteurs, qui diffusent l'espoir spéculatif d'une solution technique aux changements climatiques.

Ces promesses relaient plus spécifiquement l'idée d'un **problème climatique engendré par un dysfonctionnement chimique ou thermique que la géo-ingénierie se propose de réguler**, et non par le caractère inadéquat des modes de production et de consommation actuels. Elles **fragilisent en ce**

sens 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). Dans ce contexte, l'aléa moral est d'autant plus important que l'efficacité des techniques n'est pas certaine, et que les incertitudes scientifiques concernant les effets des techniques sur les humains et les écosystèmes sont grandes.

B- Incertitudes scientifiques, et risques météo-climatiques, alimentaires, sanitaires

Les techniques de modification du rayonnement solaire induisent nécessairement un certain nombre de risques sur les systèmes naturels, et sur les sociétés humaines qui en dépendent. Elles présentent, cependant, des stades de développement variables et globalement peu avancés. Cela induit **un niveau élevé d'incertitude quant à leurs effets sur les autres composantes du système Terre.** Les expérimentations de terrain restent rares, et les études de risques sont avant tout fondées sur des modélisations numériques, ce qui traduit **un manque de connaissances sur les risques induits par la géo-ingénierie solaire.** À ce jour, les études menées sur le sujet soulignent les risques suivants :

Tableau – Risques naturels et humains des techniques de géo-ingénierie solaire selon leur type

Technique	Risques sur le système Terre	Risques sur la sécurité humaine
Éclaircissement des nuages marins	<ul style="list-style-type: none"> - Dérèglement des précipitations et des températures (sécheresses en Amérique du Sud, multiplications des pluies tropicales) (Grisé et al., 2021). - Persistance des impacts associés à l'augmentation du niveau de CO₂. - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des rendements agricoles⁹(Sacha, 2022) - Réduction de la productivité primaire en Amazonie, et faible augmentation en Afrique (dérèglement des précipitations) (Jones et al., 2009 ; 2011). - Perte de services écosystémiques (baisse de la photosynthèse). - Risques sanitaires liés aux changements de température¹⁰ (Swiss Re, 2023). - Baisse de la qualité de l'air. - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.
Amincissement des cirrus	<ul style="list-style-type: none"> - Dérèglement des précipitations (intensification des précipitations dans le Sahel et de la mousson en Inde) (Gasparini et al., 2020). - Amplification du réchauffement climatique si les techniques sont menées dans des zones avec une faible couverture nuageuse ainsi qu'une humidité relativement élevée (Peters et al., 2011) ou en cas d'injection trop importante de particules (Gasparini et al., 2020). - Persistance des impacts associés à l'augmentation du niveau de CO₂. - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques sanitaires liés aux changements de température (Swiss Re, 2023). - Perte de services écosystémiques (baisse de la photosynthèse). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.
Injection d'aérosols stratosphériques	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation de la couche d'ozone (Lawrence et al., 2018). - Dérèglement des précipitations (notamment, sécheresses en Afrique sub-saharienne, en Méditerranée et en Inde, pluies torrentielles et inondations au Brésil ou en Europe du Nord) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des rendements agricoles (Proctor et al. 2018)¹². - Risques sanitaires liés aux substances diffusées ¹³ - Risques sanitaires liés aux changements de température.

⁹ En lien avec une baisse de la photosynthèse des cultures, mais aussi des températures et des précipitations.

¹⁰ La modification des températures et des régimes de précipitations pourrait entraîner le déplacement des zones géographiques de certaines maladies telles que la malaria, proliférant dans de nouvelles zones (Carlson et al., 2022).

¹² Certaines études mettent en lumière des risques de réduction des rendements agricoles suite à une opération d'injection d'aérosols stratosphériques, ce 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).

¹³ L'acide sulfurique, notamment, est extrêmement toxique (Lawrence et al., 2018). Le soufre pourrait par ailleurs retomber sous forme de précipitations acides (Chalecki & Ferrari, 2018).

	<p>(Baughman et al., 2012 ; Jones et al., 2022 ; Grisé et al., 2021).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Multiplication des ouragans dans l’Atlantique Nord (Grisé et al., 2021). - Variabilité des effets selon le lieu d’injection¹¹. - Interférence avec El Nino, l’Oscillation Nord Atlantique, l’Oscillation Quasi Béniale, le vortex polaire ainsi que la circulation Brewer-Dubson (Aquila et al., 2014 ; Jadwiga et al., 2018 ; Jones et al., 2022). - Persistance des impacts associés à l’augmentation du niveau de CO₂ et risque d’annulation des bénéfices induits par le SRM par la dégradation de la couverture nuageuse sous l’effet des GES (Schneider et al., 2020). - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d’humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d’arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s’adapter. 	<ul style="list-style-type: none"> - « Choc terminal » en cas d’arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s’adapter.
<p>Miroirs spatiaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Variations régionales des effets selon le positionnement des miroirs et les régions ombragées ou non (Sánchez & McInnes, 2015). - Modifications extrêmes du climat dans les zones terrestres aux températures et à l’écosystème fortement impactés par les radiations solaires (tropiques et pôles), qui impliquent en cascade les effets suivants : <ul style="list-style-type: none"> ➔ Dérèglement des précipitations (Nations Unies, 2023) ➔ Réduction de l’amplitude du cycle saisonnier (Nations Unies, 2023) ➔ Baisse de la photosynthèse impactant le taux d’humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022) - Les objets placés à L1 sont relativement stables, mais risquent de sortir de leur axe¹⁰. Sans intervention (remplacement ou remplacement) les miroirs sortiront de leur axe après un certain temps (Siegel, 2020 ; European Space Agency, 2023). - « Choc terminal » en cas d’arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s’adapter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des rendements agricoles, mais pas d’interférence chimique avec la biosphère terrestre (Sacha, 2022). - Risques sanitaires liés aux changements de température. - « Choc terminal » en cas d’arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s’adapter.

¹¹ Des aérosols injectés dans l’hémisphère nord pourraient créer de fortes sécheresses en Afrique sub-Saharienne ainsi qu’en Inde. Une injection dans l’hémisphère sud pourrait engendrer un effondrement du système pluvial au Brésil ainsi qu’une augmentation des ouragans dans l’Atlantique nord (Grisé et al., 2021).

C- Verrouillage sociotechnique : vers un « choc terminal » ?

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**, qui enchevêtrent en effet un certain nombre d'intérêts économiques et politiques (Cairns, 2014). En vertu de ces intérêts, **il est possible que des développements techniques soient maintenus et poursuivis, même en présence de preuves de leur inefficacité ou de leur nocivité**. 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 terminal** » (« termination shock ») (Parker & Irvine, 2018).

De fait, si une technique de géo-ingénierie solaire était déployée en l'absence d'une réduction drastique des émissions de GES, et si cette technique parvenait à neutraliser temporairement le réchauffement de la planète, il serait **impossible de mettre un terme à son déploiement sans provoquer une hausse brutale des températures**. Cette hausse des températures, beaucoup plus rapide que celle d'une trajectoire de réchauffement sans géo-ingénierie, serait telle que **les sociétés humaines, et une partie des écosystèmes ne parviendraient pas à s'y adapter** (Trisos et al., 2018).

En ce sens, si des dispositifs de géo-ingénierie solaire devaient être mis en œuvre, **leur vulnérabilité à des chocs environnementaux, économiques, géostratégiques, induirait des risques considérables pour la survie des sociétés humaines**. En témoignent les miroirs spatiaux, susceptibles de dériver (Siegel, 2020) ou d'être la cible d'affrontements militaires, et d'induire une hausse immédiate de la température planétaire. Ce risque est également prégnant pour les opérations de géo-ingénierie qui nécessitent des interventions chimiques. Pour exemple, 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 l'irréversibilité des déploiements de géo-ingénierie solaire, et 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, une rupture des approvisionnements ou un affrontement militaire mettraient fin au déploiement**.

GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE : UN OBJET POLITIQUE AU POTENTIEL CONFLICTUEL

L'échelle et le type de conséquences qu'aurait le déploiement de la géo-ingénierie solaire nécessitent de s'intéresser aux dynamiques de rivalités qui se jouent autour du développement de cette technologie, ainsi qu'à ses implications stratégiques et sécuritaires. La capacité pour un acteur étatique de maîtriser la température globale ou sur un territoire donné constituerait une avancée technologique majeure. **Ainsi, une question centrale est celle de l'objectif (ou des objectifs) visé par le déploiement d'une telle technologie.** Tandis que la majorité des scénarios reposent sur l'hypothèse d'un déploiement guidé par des objectifs climatiques globaux, le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait également être guidé par « des intérêts politiques particuliers » (Corry, 2023, 11 septembre).

Cette partie vise à décloisonner le débat autour de la géo-ingénierie solaire comme technologie environnementale, afin de l'inscrire également dans les dynamiques des relations internationales et des questions de sécurité. Pour ce faire, nous présentons les acteurs qui prennent part au développement de la géo-ingénierie solaire et détaillons le positionnement des grandes puissances. Nous dressons ensuite un état des lieux de la gouvernance internationale en matière de géo-ingénierie solaire et discutons des dynamiques de rivalités entre puissances autour de cette technologie. Enfin, nous explicitons les enjeux de sécurité associés à la géo-ingénierie solaire en présentant tout d'abord les manières dont cette technologie pourrait être utilisée comme outil politique. Nous revenons ensuite sur l'implication des acteurs de la défense dans le développement de la géo-ingénierie solaire aux États-Unis et discutons du potentiel conflictuel de la technologie.

1. La géo-ingénierie solaire : un secteur en développement

A- Une diversité d'acteurs aux rôles complémentaires

Les États et leurs gouvernements respectifs contribuent au développement de la géo-ingénierie solaire en octroyant des financements pour la recherche. L'Allemagne et le Royaume-Uni (ainsi que l'Union européenne) ont par exemple financé des projets de recherche à hauteur de 31,3 millions de dollars américains de 2008 à 2018 (Surprise & Sapinski, 2022, 27 octobre). On peut également citer le cas du gouvernement australien qui finance à hauteur de 4,7 millions de dollars australiens (environ 3 millions de dollars américains) la Great Barrier Reef Foundation et son projet de blanchiment des nuages marins (Readfearn, 2020, 14 juillet). **Les États peuvent aussi jouer un rôle à travers leur action**

au sein d'organisations internationales. C'est notamment le cas de la Suisse, qui pousse pour la mise à l'agenda de la géo-ingénierie aux Nations unies¹⁴ (Stefanini, 4 mars 2019).

La communauté scientifique est particulièrement active, car partie-prenante au développement de la géo-ingénierie solaire. Les programmes de recherche en cours sont ainsi hébergés au sein d'universités ou d'agences de recherches publiques. **Pour autant, le positionnement des scientifiques à l'égard de la géo-ingénierie solaire se caractérise par une extrême polarisation.** Un camp pour, à l'image de David Keith¹⁵, qui voit en cette technologie une solution au changement climatique (U Chicago News, 2023, 11 avril). Un camp contre, à l'image de Frank Biermann¹⁶, qui s'oppose à cette technologie au regard des risques qui y sont associés.

Les acteurs privés sont également actifs dans le développement de la géo-ingénierie solaire, notamment en matière de financement, et en particulier aux États-Unis. Les chercheurs Sapinski et Surprise ont montré que « la majorité des financements en géo-ingénierie solaire proviennent de fondations et d'individus issus des domaines de la *Tech* ou de la finance, dont nombreux sont connus pour leur philanthropie environnementale » (Surprise & Sapinski, 2022, 27 octobre). En outre, **des acteurs privés sont actifs en matière d'expérimentations, voire de commercialisation de la géo-ingénierie solaire**, à l'instar de start-up californienne *Make Sunsets*.

Enfin, les instances internationales et les organisations non-gouvernementales contribuent aux débats sur la géo-ingénierie solaire. Les premières, à l'image des Nations Unies (UNEP, 2023) ou de la Commission européenne (Abnett, 2023, 28 juin), se positionnent en faveur d'une gouvernance de la géo-ingénierie solaire. Les secondes défendent pour certaines une position favorable à la géo-ingénierie solaire (SilverLining, Degrees Initiative) et pour d'autres, déploient un plaidoyer largement défavorable à son développement (ETC Group, campagne Hands Off Mother Earth).

¹⁴ En mars 2019, la Suisse a présenté une résolution visant à évaluer les techniques de géo-ingénierie et ses modalités de gouvernance durant l'Assemblée générale des Nations unies Environnement. La résolution été également soutenue par le Burkina Faso, la Micronésie, la Géorgie, le Liechtenstein, le Mali, le Mexique, le Monténégro, la Nouvelle-Zélande, le Niger et le Sénégal. Cette résolution a été bloquée par les États-Unis, l'Arabie Saoudite et le Brésil.

¹⁵ David Keith est Professeur au sein du département de Sciences Géophysiques de l'Université de Chicago. Il a notamment dirigé le projet Solar Geoengineering Research Project de Harvard.

¹⁶ Frank Biermann est Professeur et chercheur en *Global Sustainability Governance* à la Utrecht University, fondateur du *Earth System Governance Project*.

*B- Un intérêt certain des grandes puissances, pourtant teinté d'opacité***États-Unis**

D'après les informations disponibles en sources ouvertes et les entretiens menés dans le cadre de cette note, **les États-Unis sont considérés comme le pays le plus avancé en matière de géo-ingénierie solaire**. Ils dominent le secteur avec plusieurs projets d'envergure à l'œuvre (Harvard, UCLA, Cornell). Ce pays se distingue par **l'implication du secteur de la défense**, que nous détaillons dans la section suivante. **Le secteur privé est quant à lui extrêmement actif dans le financement de la recherche**, et a ainsi octroyé approximativement 20 millions de dollars américains sur la période 2008-2018 à des initiatives et projets portant sur la géo-ingénierie solaire (Surprise & Sapinski, 2022, 27 octobre).

Les États-Unis sont considérés comme leader en matière d'expérimentations. Le projet *Stratospheric Controlled Perturbation Experiment* (SCOPEX), hébergé à Harvard, devait réaliser un test à petite échelle en Suède en 2021, mais ce dernier a été reporté à la suite de l'opposition du peuple indigène Sámi (Cooper, 20 mai 2021). Dans le cadre du nouveau projet SABRE - *Stratospheric Aerosol processes, Budget and Radiative Effects* de la *National Oceanic and Atmospheric Administration*) lancé en 2023, des expérimentations à des fins de recherche ont eu lieu en Alaska et sont prévues pour les tropiques en 2024, et dans l'hémisphère sud en 2025 (NOAA, 2023, 2 mars).

Depuis 2022, les Américains se positionnent publiquement en faveur de la recherche en géo-ingénierie au niveau fédéral, en témoigne le *2022 Federal Appropriations Act* signé par le Président Biden qui ordonne à l'*Office of Science and Technology Policy* de coordonner la recherche sur la géo-ingénierie solaire (United States of America, 9 mars 2022). Dans la continuité de ce mandat, un rapport publié en juin 2023 établit des recommandations pour la mise en place d'un cadre de gouvernance pour la recherche en géo-ingénierie solaire financée par des fonds publics. De plus, **il propose la création d'un programme de recherche au niveau fédéral dédié à la géo-ingénierie**, et mentionne la coopération internationale ainsi que la participation du public comme des aspects primordiaux de la gouvernance à établir (OSTP, 2023).

Chine

La Chine est active en matière de recherche sur la géo-ingénierie solaire, comme le montre l'existence du programme de recherche *Chinese geoengineering research project* (2015-2019) financé par des fonds publics - de 100 000 (Harvard Solar Geoengineering Research Program, 2019) à 3 millions de dollars américains (Temple, 2017). Ce dernier visait à étudier les impacts climatiques de la géo-ingénierie solaire et à explorer les enjeux de gouvernance associés. Par ailleurs, **la Chine a conduit en**

août 2020 une expérimentation de géo-ingénierie solaire locale sur le glacier Dagu dans le Sichuan, en recouvrant ce dernier par un textile de 500 m² et 5 à 8mm d'épaisseur, avec pour objectif de réduire la fonte du glacier pendant l'été (Zizhu, 2020, 9 novembre).

Pour l'heure, les déclarations publiques de la Chine indiquent que le pays ne serait pas intéressé par un déploiement à grande échelle de la géo-ingénierie solaire. Pour autant, tous les chercheurs interrogés dans le cadre de cette note s'accordent à dire que, d'une part, peu d'informations officielles sont disponibles, et d'autre part, il est très peu probable que ce pays ne s'y intéresse pas. En outre, l'attitude de la Chine sur la modification de la météo et la manière dont son déploiement à grande échelle a été conduit¹⁷ laisse penser qu'un changement de position brutal serait également possible dans le cas de la géo-ingénierie solaire (Jayaram, 2023, 8 septembre).

Russie

D'après les informations disponibles en sources ouvertes, la Russie ne dispose pas de programme de recherche en matière de géo-ingénierie solaire. Pour autant, l'URSS est historiquement le lieu de naissance de l'injection d'aérosols dans la stratosphère, proposée par le chercheur Budyko dès la fin des années 1970 (Budyko, 1977, 239). Depuis, le chercheur Yuri Izrael a repris ces recherches. Ce dernier est considéré comme un « enthousiaste » (Mooney, 2009) de la géo-ingénierie au regard de ses nombreuses publications et prises de positions (Oldfield & Poberezhskaya, 2022, 8). En outre, **Izrael a mené en 2009 avec son équipe de recherche une expérimentation à petite échelle de géo-ingénierie solaire en Russie** qui consistait à injecter des aérosols à 200m d'altitude (Mooney, 2009).

Le positionnement officiel de Moscou semble assez favorable à la géo-ingénierie solaire. La Russie s'intéresserait de près à la technologie, motivée par l'avancée des autres grandes puissances (États-Unis et Chine) et la place qu'occupent les secteurs de la sécurité et du renseignement dans ce pays (Corry, 2023, 11 septembre). Le gouvernement aurait par ailleurs demandé à inclure un paragraphe sur la géo-ingénierie « comme solution possible » aux changements climatiques lors des préparations du rapport de 2013 du GIEC et déclaré que « ses scientifiques sont en train de développer des technologies de géo-ingénierie » (Lukacs, Goldenberg et Vaughan, 19 septembre 2013). Pour autant,

¹⁷ Tandis que pendant des années la Chine utilisait la modification de la météo uniquement sur des zones agricoles ou lors de grands événements (Jeux Olympique de Beijing), le gouvernement a soudainement annoncé en 2020 que le pays disposera d'un dispositif de modification de la météo développé d'ici 2025 qui recouvrira 5,5 millions de km², soit l'équivalent du territoire de l'Inde.

les chercheurs interrogés dans le cadre de cette note déplorent tous le manque d'informations sur l'état d'avancement de la Russie en matière de recherche en géo-ingénierie solaire.

2. La géo-ingénierie solaire : un nouvel objet de gouvernance et de compétition

A- Une gouvernance internationale de la géo-ingénierie solaire qui peine à émerger

À l'exception d'un moratoire non contraignant adopté par les pays signataires de la Convention sur la Biodiversité biologique en 2010 et comprenant une exception pour la recherche à petite échelle (Convention on Biological Diversity, 2017, 23 mars), il n'existe pour l'heure aucun cadre de gouvernance multilatéral dédié à la géo-ingénierie solaire (United Nations Environment Programme, 2023, 6). Par ailleurs, les traités internationaux existants sont incomplets pour gouverner la géo-ingénierie dans la mesure où ceux-ci ne couvrent pas explicitement « l'intention, la portée et les effets de la géo-ingénierie » (Sacco et al., 2022, 24). Par exemple, l'amendement de 2013 au Protocole de Londres, lorsqu'il entrera en vigueur, ne couvrira que la géo-ingénierie marine (OMI, 2022, 10 octobre). De la même manière, la Convention ENMOD adoptée en 1977 ne prohibe que l'utilisation des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles (Nations Unies, 2023).

La nécessité de construire un cadre de gouvernance international en matière de géo-ingénierie solaire est avancée par des États comme la Suisse (Stefanini, 2019, 4 mars), **des ONGs** (Carnegie Governance Initiative) **ou encore des instances interétatiques** : Union européenne ou Nations unies. Les technologies en cours de développement soulèvent en effet des enjeux « éthiques, moraux, légaux, d'équité et de justice » (United Nations Environment Programme, 2023, 1) qui émergent « de la recherche, lors de l'expérimentation, au moment du déploiement de ces techniques, mais aussi une fois celles-ci mises en place, du fait de leurs impacts à différentes échelles » (Doumergue & Kabbej, 2021, 5-6).

La capacité à construire un cadre de gouvernance multilatéral contraignant en matière de géo-ingénierie solaire est largement remise en question (Victor, 2008), voire considérée comme impossible (Biermann, 2023, 8 septembre). Le contexte géopolitique actuel caractérisé par une polarisation importante entre l'Est et l'Ouest ainsi qu'entre le Nord et le Sud, ajouté à une incapacité à voir émerger des accords contraignants sur le climat sont souvent cités comme des facteurs bloquants. Le blocage en 2019 par les États-Unis, l'Arabie Saoudite et le Brésil d'une proposition de résolution visant à évaluer les techniques de géo-ingénierie et ses modalités de gouvernance durant

l'Assemblée générale des Nations unies Environnement (Stefanini, 2019, 4 mars) montre que des barrages se dressent dès que les discussions deviennent concrètes (Corry, 2023, 11 septembre). Les pays bloquants considéraient que les questions entourant la géo-ingénierie devaient être placées sous l'égide du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC).

Au regard des risques associés à la géo-ingénierie solaire et du manque de connaissances scientifiques sur le sujet, une coalition de plus de 450 chercheurs a appelé en 2022 à un accord international de non-utilisation de la géo-ingénierie solaire (*Solar geoengineering non-use agreement*, publié le 17 janvier 2022). En outre, des États ou un groupement d'États, qui adopteraient une déclaration de non-utilisation de la géo-ingénierie solaire constitueraient une première étape, avec un effet politique (Biermann, 2023, 8 septembre). **Une proposition de moratoire « sur le déploiement ou les expérimentations à grande échelle » de la géo-ingénierie solaire a également été avancée en septembre 2023 dans un rapport publié par la *Overshoot Commission*.** Pour autant, cette dernière considère que cette technologie « pourrait compléter d'autres approches » pour répondre aux enjeux associés à un potentiel dépassement des +1,5°C de réchauffement en comparaison à l'ère préindustrielle (*Climate Overshoot Commission*, 2023, septembre).

L'émergence d'un cadre de gouvernance contraignant en matière géo-ingénierie solaire étant pour l'heure incertaine, d'autres possibilités se présentent. Tout d'abord, **un accord entre l'Union européenne et les pays dits du « Sud global » au regard de leurs intérêts et avancement actuel** (Jayaram, 2023, 8 septembre). Ensuite, un cadre de gouvernance « très permissif pour ceux se considérant comme les plus gros joueurs dans le domaine » (Corry, 2023, 11 septembre). Enfin, un cadre de gouvernance **plus réaliste pourrait voir le jour « à travers la dissuasion », avec une négociation bilatérale entre grandes puissances**, de la même manière que la course à l'armement durant la guerre froide (Corry, 2023, 11 septembre). Un parallèle entre la gouvernance de la géo-ingénierie solaire et du nucléaire est par ailleurs établi par certains chercheurs (Young, 2023 ; Scharf, 2023).

B- Un secteur marqué par la rivalité entre puissances

La gouvernance internationale de la géo-ingénierie solaire, étant encore largement à établir, constitue un espace de confrontation entre différentes visions. D'une part sur les objectifs que vise cette technologie, de l'autre sur les manières dont elle devrait être régulée. Ainsi, les différents acteurs et leurs visions se confrontent pour influencer le cadre de gouvernance en réflexion, ou

bloquer son émergence. Le rapport publié en juin 2023 par la Maison-Blanche (OSTP, 2023) constitue un exercice scientifique, mais surtout politique en ce qu'il « a ouvert la porte aux États-Unis pour façonner et faire progresser unilatéralement le développement de la géo-ingénierie solaire » (Stephens et al., 2023,172).

Les dynamiques de rivalité entre puissances sont au centre du développement de la géo-ingénierie solaire dans la mesure où « **les capacités de recherche sont vues par les États comme des sources de puissance** » et **des leviers d'influence**. Par ailleurs, le fait qu'il soit impossible de supposer que tous les États soient transparents sur leurs activités en matière de géo-ingénierie solaire indique que cette technologie constitue un objet potentiel de rivalités : « si certains États le font, ils ne veulent pas nécessairement le rendre public » (Corry, 2023, 11 septembre).

La compétition entre les grandes puissances est profondément ancrée dans les dynamiques de développement de la géo-ingénierie, autour de l'idée que « si les autres le font, alors nous devons le faire aussi » (Corry, 2023, 11 septembre). **En outre, le positionnement public du gouvernement fédéral américain sur cette technologie a, et continuera d'avoir, des conséquences directes sur le positionnement d'autres acteurs étatiques** (Jayaram, 8 septembre). Cette position est également partagée par la chercheuse chinoise Chen Ying, pour qui « la Chine n'a d'autre choix que de suivre le rythme des puissances occidentales en matière de recherche en géo-ingénierie » (Moore & Freymann, 2023, 21 février). **Les dynamiques de rivalités entre grandes puissances s'exercent également dans le sens inverse, où les avancées de la Chine en matière de géo-ingénierie solaire motivent les États-Unis à se positionner** (Corry, 2023, 11 septembre).

3. La géo-ingénierie solaire : un outil politique au potentiel conflictuel

A- Une technologie permettant de faire valoir des intérêts, de protéger et de négocier

Premièrement, le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait permettre d'assurer ou de prolonger les modes de vie fortement dépendants des énergies fossiles, et/ou servir les intérêts publics ou privés des acteurs dépendants du marché des énergies fossiles. Cet argument selon lequel la géo-ingénierie solaire pourrait être utilisée afin de préserver les intérêts d'une certaine élite politique et économique est notamment avancé par Corry et McLaren (Corry & McLaren, 2023). Allant encore plus loin, les chercheurs Surprise et Sapinski développent l'argument selon lequel ce sont les États-Unis qui seraient les plus à même d'avoir recours à la géo-ingénierie solaire dans le but de

maintenir leur hégémonie, laquelle est fortement liée aux énergies fossiles, au (pétro)dollar, et à leur puissance militaire (également fortement dépendante du pétrole) (Surprise, 2020).

Deuxièmement, la géo-ingénierie solaire pourrait permettre d'atténuer les conséquences des changements climatiques sur un territoire donné, mais également sur la capacité opérationnelle des appareils de défense. Dans un contexte où les changements climatiques et leurs conséquences sont qualifiés de menaces à la sécurité nationale par différents pays, notamment par l'administration américaine (The White House, 2015), **la géo-ingénierie solaire pourrait ainsi être approchée comme un outil de protection.** Ainsi, la géo-ingénierie solaire pourrait être déployée dans des environnements extrêmes afin de protéger les installations militaires de la fonte des glaces (bases en Arctique), ou encore pour diminuer les risques liés à l'élévation du niveau des mers (Sovacool et al., 2023, 9).

Troisièmement, la géo-ingénierie solaire pourrait être utilisée comme outil de négociation, afin d'obtenir des concessions de la part d'autres acteurs. La façon la plus probable dont la géo-ingénierie solaire pourrait être utilisée serait d'en faire une menace politique. Certains États particulièrement vulnérables aux impacts des changements climatiques pourraient faire peser la menace d'un déploiement sur les pays riches. Par exemple, si ces derniers ne leur offrent pas de compensation suffisante, ne les aident pas à financer les pertes et dommages liés aux changements climatiques, ou encore ne leur accordent pas d'accords commerciaux préférentiels (Sovacool et al., 2023, 8). Cette idée est aussi partagée par le Professeur Matt McDonald, pour qui « la menace d'un déploiement » permettrait à certains pays de se faire écouter¹⁸ (McDonald, 2023, 11 septembre).

¹⁸ Matt McDonald est Professeur associé au sein du département de sciences politiques et d'études internationales de l'Université du Queensland, Australie.

Une implication du secteur de la défense aux États-Unis

Historiquement, les acteurs de la défense ont été parmi les premiers à s'intéresser à la géo-ingénierie solaire dès la fin des années 1990, voyant en cette technologie une potentielle réponse aux changements climatiques (Surprise, 2023, 19 septembre). **Aujourd'hui encore, le développement de la géo-ingénierie solaire se fait avec la participation active du Département de la Défense et/ou des institutions qui y sont apparentées, notamment les agences de renseignements et de recherche** (Surprise, 2020). La *Central Intelligence Agency* (CIA) explore les possibilités de cette technologie depuis au moins 2011, tandis que la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) finance des études sur le sujet (Collins, 2 novembre 2022) et développe aux côtés du *Naval War College* des modèles visant à détecter le déploiement unilatéral de la géo-ingénierie (Surprise, 2023, 19 septembre).

Par ailleurs, l'implication des militaires dans le développement de la géo-ingénierie solaire est liée aux savoir-faire et équipements dont dispose l'institution de défense. Les militaires disposent en effet de connaissances cruciales en matière d'opérations logistiques à haute altitude ou encore en haute mer. Par exemple, l'expérimentation prévue en 2021 dans le cadre du *Stratospheric Controlled Perturbation Experiment* (SCOPEX) devait se faire en partenariat avec *Raven Aerostar*, un contractant de longue date du Département de la Défense (Surprise, 2020).

B- Une technologie pouvant contribuer au déclenchement d'un conflit ou servir de cible

La géo-ingénierie solaire ne doit pas être considérée comme un déclencheur de conflit, mais plutôt comme un facteur qui complique les relations entre États, et de ce fait pouvant contribuer au déclenchement d'un conflit, ou servir de cible pendant un conflit.

Une première source de tensions entre États est liée aux conséquences environnementales du déploiement de la géo-ingénierie solaire, et l'attribution de manifestations sur un territoire à l'intervention d'un tiers. Le cas des tensions entre la Chine et l'Inde peut être avancé, avec l'idée que la Chine pourrait être accusée par l'Inde d'être responsable de la perturbation des phénomènes de moussons sur son territoire (Sovacool et al., 2023, 11). Des tensions diplomatiques ont en effet déjà éclaté entre les deux pays à la suite d'opérations de modifications de la météo et/ou constructions de barrages hydrauliques par la Chine, notamment dans le plateau du Tict, une zone déjà militarisée (Kishimoto & Suzuki, 2021, 27 juillet).

L'occurrence d'évènements climatiques extrêmes pourrait être considérée comme le résultat de l'action délibérée d'un État (ou coalitions d'États) ayant déployé la géo-ingénierie solaire¹⁹. Il

¹⁹ Ce type de dynamique s'observe également dans le cas des tensions entre l'Iran et Israël, les États-Unis, ainsi que les Émirats Arabes Unis. Téhéran accuse en effet les États déployant des techniques de modification de la météo d'être responsables des sécheresses qui frappent son territoire. Plus généralement, les pratiques de modification de l'environnement (qu'il s'agisse de la modification de la météo comme de la modification du

pourrait en résulter des demandes de compensations financières des pertes causées, par exemple les récoltes. En outre, le recours à la voie militaire pourrait être motivé par les conséquences environnementales d'un déploiement (par exemple la modification des moussons) sur la sécurité économique ou celle de la population. **L'incapacité à prouver l'origine des perturbations ressenties sur un territoire permettrait à des acteurs de se positionner comme victimes et donc de justifier des réponses politiques, notamment militaires** (Sovacool et al., 2023, 12). En cas de déploiement de la géo-ingénierie solaire, il serait en effet difficile de savoir si des manifestations environnementales sont le résultat de variations naturelles du climat, du changement climatique d'origine anthropique ou d'une intervention climatique (Surprise, 2023, 19 septembre).

Une seconde source de tensions interétatiques serait liée aux désaccords entre États sur les effets souhaités du déploiement de la géo-ingénierie solaire planétaire, et sur les modalités de déploiement. Les intérêts nationaux des États, en fonction des gains et des pertes économiques associées à une température donnée, divergent largement. Des tensions pourraient émerger pour fixer l'objectif de température à atteindre (limitation de la hausse de la température moyenne globale à +1,5°C, +2°C, + 2,5°C comparativement à la période préindustrielle), mais également sur la technologie déployée²⁰, le lieu de déploiement, et la manière de déployer la technologie : produits chimiques et/ou matériaux utilisés, altitude d'injection dans le cadre d'une opération chimique, vecteurs sollicités pour le déploiement (ballons, avions, pulvérisateurs, fusées). **En outre, des tensions interétatiques pourraient émerger dans le cas d'utilisation de techniques de géo-ingénierie locale, dans la mesure où les intérêts géopolitiques peuvent diverger autour d'une zone géographique donnée et des conséquences qu'aurait une modification de la température.** L'exemple de l'Arctique est régulièrement cité autour des tensions entre les États-Unis et la Russie, avec « des intérêts divergents à accélérer ou ralentir la fonte des glaces » (McLaren, 2023, 13 septembre).

Outre la décision d'un recours à la géo-ingénierie, la multitude de choix à faire pour conduire son déploiement ne pourra probablement pas se faire avec un consensus international. Le programme des Nations unies pour l'environnement considère ainsi que les divergences d'opinions autour de l'usage

climat), déployées par les États développés, nourrissent un anti-occidentalisme qui risque de se manifester à chaque grande catastrophe naturelle, même d'origine non-climatique. Pour exemple, les États-Unis ont été accusés par des responsables politiques turcs d'être à l'origine du séisme qui a frappé la Turquie et la Syrie au début de l'année 2023 (Wei, 2023, 14 août ; i24news, 30 août ; de Guglielmo, 2021).

²⁰ Des désaccords pourraient en effet naître entre les promoteurs d'une injection d'aérosols dans la stratosphère visant un refroidissement planétaire immédiat, les promoteurs d'opérations de géo-ingénierie locale par modification des nuages cherchant à empêcher le franchissement de points de bascule spécifiques, par exemple en ciblant la protection des pôles, (position qui semble aujourd'hui tenue par la Chine, notamment), et enfin, les acteurs qui refuseraient catégoriquement de voir la géo-ingénierie solaire s'immiscer dans les négociations internationales.

et des modalités de déploiement de la géo-ingénierie solaire « pourraient générer un conflit politique, voire militaire » (*United Nations Environment Programme, 2023, 19*).

Un autre enjeu est celui du risque d'escalade, en lien avec les risques de tensions interétatiques entourant les désaccords autour des modalités de déploiement et/ou les conséquences d'un déploiement. Dans le cas où une première opération était réalisée par un État ou une coalition d'États sans consensus international, d'autres États pourraient déployer des opérations de « contre-géo-ingénierie » afin de répondre à l'opération initiale. 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 premiers produits diffusés ; et une « contre-géo-ingénierie » de « compensation », cherchant à inverser les effets de ces produits en injectant des agents de réchauffement (particules ou gaz à effet de serre) (Heyen et al., 2019).

Les infrastructures et dispositifs nécessaires au déploiement de la géo-ingénierie solaire constituent d'autres sources potentielles de tensions entre États, dans la mesure où celles-ci pourraient faire l'objet d'une suspicion de surveillance. La majorité des scénarii de déploiement prévoient en effet d'utiliser des avions capables de voler en haute altitude qui pourraient avoir un usage double - à la fois de diffusion des particules chimiques et de surveillance des territoires sur lesquels ces particules seraient diffusées. Comme le souligne le Professeur Olaf Corry, « dans les conflits contemporains (...) n'importe quel objet impliquant une surveillance étroite d'espaces est à même de devenir conflictuel » (Corry, 2023, 11 septembre).

Enfin, le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait également conduire à une militarisation de la technologie. Les infrastructures (avions, bases, outils de surveillance, etc.) nécessaires au déploiement pourraient être prises pour cibles et faire l'objet d'une attaque physique, ou cyber. Ainsi, **il serait nécessaire de sécuriser toutes les infrastructures sollicitées, sur un temps long, et par des moyens notamment militaires dans la mesure où celles-ci constitueraient une vulnérabilité** (Sovacool et al., 2023, 10).

La militarisation de la technologie est également liée au déploiement de la géo-ingénierie solaire à des fins hostiles, afin d'affecter négativement les régimes pluviométriques d'un État, l'agriculture et les récoltes associées, ou encore la disponibilité des ressources en eau et/ou des ressources halieutiques. Un des arguments avancés autour de cet usage hostile repose sur la capacité de certaines techniques de géo-ingénierie solaire locale (l'amincissement des cirrus et le blanchiment des nuages marins) à être déployées très rapidement et à moindres coûts, permettant de « modifier la météo en

quelques jours » (Sovacool et al., 2023, 11). Cette idée est pour autant remise en question par le cadre réglementaire existant autour de Convention ENMOD (1977), qui empêcherait théoriquement ce type d'utilisation.

Pour conclure, le développement et le déploiement de la géo-ingénierie solaire contribueront à faire évoluer le concept de puissance, qui peut se définir comme « la capacité d'une unité politique d'imposer sa volonté aux autres unités » (Aron, 1984). D'une part, la géo-ingénierie solaire implique une nouvelle échelle d'intervention des États, leur permettant de contrôler les conditions de vie sur Terre en contrôlant la température. D'autre part, la géo-ingénierie constitue un nouvel outil de puissance, s'ajoutant aux leviers militaires, de renseignement, de commerce ou encore diplomatiques (Corry & McLaren, 2023). En ce sens, les acteurs traditionnels de la sécurité (dont les militaires) devront intégrer à leur réflexion stratégique la possibilité pour un tiers d'avoir recours à une intervention de géo-ingénierie solaire pour faire valoir leurs intérêts.

PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS

1. Principales hypothèses de déploiement

Plusieurs hypothèses de déploiement de la géo-ingénierie solaire ont été formulées par la littérature existante sur le sujet, et par les chercheurs interrogés. Ces hypothèses mêlent notamment plusieurs possibilités de gouvernance, qui demeure incertaine au regard de l'état actuel du cadre réglementaire.

A- *Hypothèse 1 : un déploiement multilatéral de la géo-ingénierie solaire*

Le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait avoir lieu **dans un cadre multilatéral, où un accord international serait trouvé sur l'objectif de température à atteindre ainsi que les modalités de déploiement**. Cette hypothèse, selon laquelle la communauté internationale parviendrait à s'accorder sur la température à atteindre et sur le mode de déploiement est utilisée par les chercheurs modélisant le déploiement de la géo-ingénierie solaire et ses effets sur le climat, à l'instar du projet geoMIP (geoMIP, 2023).

B- *Hypothèse 2 : un déploiement unilatéral de la géo-ingénierie solaire*

Le déploiement de la géo-ingénierie solaire pourrait se faire **par un État, de manière unilatérale, en dehors de toute consultation ou accord international**. Ce scénario est notamment développé par le *National Intelligence Council* qui a publié en 2021 un *National Intelligence Estimate* dans lequel est identifié comme risque croissant le « déploiement de technologies de géo-ingénierie solaire à grande échelle par un pays » (National Intelligence Council, 2021, 11). En outre, on remarque dans la littérature une référence au concept d'État voyou (*rogue state*) lorsque ce scénario est présenté (Sovacool et al., 2023 ; National Intelligence Council, 2021).

C- *Hypothèse 3 : un déploiement par une coalition d'États*

3.1 Un déploiement par une coalition de 10 États au niveau de développement avancé et aux intérêts géopolitiques alignés

La géo-ingénierie solaire pourrait être déployée **par une coalition d'États riches, industrialisés, et aux intérêts géopolitiques alignés**. La littérature existante sur le sujet développe notamment l'idée que cette coalition d'États (Canada, Japon, Suisse, entre autres) serait amenée à initier un déploiement, car aucun cadre de gouvernance n'aurait émergé, et qu'il serait selon eux urgent d'intervenir sur le climat (Parson & Reynolds. 2021, 133).

3.2 Un déploiement par une coalition de 10 États vulnérables aux changements climatiques

En l'absence de résultats tangibles et rapides en matière d'atténuation, et au regard des conséquences actuelles et projetées des changements climatiques, il est envisageable que la géo-ingénierie solaire soit déployée **par une coalition d'États particulièrement vulnérables aux changements climatiques** (États insulaires, pays du Moyen-Orient, certains pays dits du « Sud Global »). La géo-ingénierie

pourrait également apparaître, pour les États les plus vulnérables, comme un moyen de se faire entendre sur la scène internationale dominée par les États développés. Cette hypothèse est formulée dans plusieurs travaux (Sovacool et al., 2023 ; Parson & Reynolds, 2021).

D- Hypothèse 4 : un déploiement par des acteurs non-étatiques

4.1 Un déploiement par un acteur privé

Au regard de l'implication importante, dans le secteur de la géo-ingénierie solaire, des acteurs privés issus des domaines de la finance et de la Tech aux États-Unis, une autre hypothèse pourrait être celle d'un **déploiement par un philanthrope, doté d'un capital économique et matériel conséquent**. Par le financement d'une ONG ou d'une entreprise dédiée, ce philanthrope pourrait mettre en œuvre le déploiement d'une technologie de géo-ingénierie à l'échelle planétaire, dans une perspective de « sauvetage de l'humanité » (Sovacool et al., 2023, 7). Pour autant, les chercheurs interrogés dans le cadre de cette note s'accordent à dire qu'un déploiement par un acteur individuel, à l'instar de Bill Gates ou d'Elon Musk, ne pourrait se faire sans l'accord formel ou informel d'un État.

4.2 Un déploiement décentralisé porté par les consommateurs

Si le secteur privé est très largement impliqué dans les développements technologiques liés à la géo-ingénierie solaire, celui-ci manifeste également une volonté d'impliquer les consommateurs dans la commercialisation des technologies. C'est le cas de l'entreprise *Make Sunset*, dont le *business model* est fondé sur le financement des opérations d'injection d'aérosols dans la stratosphère par des particuliers. Ainsi, l'on pourrait envisager un déploiement **porté par les consommateurs qui, sous l'influence de certains acteurs publics ou privés, pourraient acquérir des dispositifs de géo-ingénierie solaire et procéder à des opérations individuelles**. Cette hypothèse est notamment formulée par Gernot Wagner qui imagine, en Arabie saoudite, une multitude de géo-ingénieurs se procurant des ballons stratosphériques sur Alibaba pour injecter des aérosols dans la stratosphère (Wagner, 2021).

2. Scénarii de prospective : la géo-ingénierie solaire à l'horizon 2050

Scénario 1 : Déploiement unilatéral par les États-Unis

En 2047, la température moyenne globale atteint les +2,5°C en comparaison à l'ère préindustrielle. Les émissions de GES n'ont pas assez diminué, et la communauté internationale n'a pas réussi à respecter les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat. Chaque année, tous les pays du monde sont touchés par des catastrophes naturelles d'ampleur, faisant des milliers de victimes et de déplacés. En conséquence, la situation économique de tous les pays est fragilisée. Aux États-Unis, la situation politique est extrêmement tendue. Dépassé par la Chine, le pays a été relégué au rang de seconde puissance mondiale depuis 2039. Au cours des dix dernières années, les inégalités sociales n'ont cessé d'augmenter, faisant quasiment disparaître la classe moyenne. La paupérisation de la société

américaine s'explique également par les nombreuses catastrophes climatiques qui touchent le pays. De plus en plus nombreuses et intenses, les inondations et les tempêtes détruisent des centaines d'infrastructures civiles chaque année (routes, ponts, écoles, habitations, hôpitaux, centrales électriques, etc.). Les infrastructures militaires sont également affectées, causant des pertes d'équipements (hélicoptères, avions, voitures) et d'infrastructures (piste de décollage, bâtiments militaires). En outre, les sécheresses et la raréfaction de la ressource en eau affectent durement le secteur agricole. Les cultures de coton et de maïs sont devenues impossibles, tandis que les rendements de soja et de blé ont diminué de près de 40 % depuis 2025. Les victimes de catastrophes naturelles se comptent désormais par milliers chaque année, tandis que les coûts des dommages sont d'environ 230 milliards de dollars par an.

Dans ce contexte, la population américaine est de plus en plus critique à l'égard du gouvernement, accusé de ne pas avoir assez anticipé les effets des changements climatiques et d'avoir retardé les efforts d'adaptation. Le 3 juin 2047, le gouvernement républicain annonce officiellement le déploiement de l'injection d'aérosols dans la stratosphère, une technique de géo-ingénierie solaire visant à abaisser artificiellement la température globale en réduisant la quantité de rayonnement solaire pénétrant dans l'atmosphère. Ce déploiement suscite beaucoup d'espoir pour les Américains, lesquels se sont vu promettre par leur gouvernement « une solution efficace qui affectera rapidement et positivement les conditions climatiques sur son territoire ». Le secteur de la défense est alors au cœur du dispositif de déploiement, octroyant des moyens financiers, humains, et techniques. Chaque jour depuis l'annonce du gouvernement, des centaines d'avions décollent de bases militaires pour diffuser des particules chimiques en haute altitude. Ce déploiement se fait de manière unilatérale, mais ne viole pas le droit international. Les États-Unis n'avaient en effet jamais ratifié la Convention sur la Géo-ingénierie solaire adoptée en 2035 qui prohibait le déploiement unilatéral de la technologie. Consciente que sa décision a été prise en dehors de tout cadre multilatéral, la diplomatie américaine se lance alors dans un effort de plaidoyer visant à faire accepter à la communauté internationale sa décision. Pour ce faire, les États-Unis se positionnent comme défenseur des conditions humaines et garants de la sécurité internationale.

Cette décision unilatérale continue de polariser les relations entre États alors que les Nations unies sont déjà au bord de la dissolution. Malgré les propositions de résolution au Conseil de Sécurité initiées par la Russie, aucune n'a pu être adoptée du fait du veto américain. La Chine et la Russie, rejoints par quelques partenaires amorcent une campagne diplomatique dénonçant l'acte « égoïste » des États-Unis, et menacent d'avoir recours à une intervention militaire pour détruire les infrastructures du dispositif de déploiement si ce dernier n'est pas stoppé dans les plus brefs délais. Ils préviennent qu'un survol de leur territoire mènera à une riposte directe, et à la destruction de l'appareil. En outre, des discussions s'amorcent au sein de la coalition pour discuter du lancement d'opérations de contre géo-ingénierie visant à annuler les effets du déploiement américain. Les pays occidentaux, alliés historiques des États-Unis, sont divisés : certains soutiennent la décision américaine, d'autres se désolidarisent et dénoncent une décision dangereuse, demandant également son arrêt immédiat. En France, les conséquences environnementales du déploiement sont encore incertaines, mais causeront avec

certitude une modification des régimes pluviométriques. Les tensions entre les États-Unis et la coalition sino-russe augmentent, et la probabilité d'un conflit armé également.

Le gouvernement français déploie alors des efforts diplomatiques visant à « ramener à la raison » son partenaire américain, avançant la nécessité de stopper ce déploiement en l'absence d'accords internationaux. Il tente également d'œuvrer par le biais des ministres des Armées et des Affaires étrangères pour une non-escalade, en amorçant des discussions avec la coalition sino-russe. La crédibilité de la France comme acteur central de la diplomatie internationale est mise à rude épreuve. L'isolement américain face au reste du monde amène le gouvernement à se désolidariser de son partenaire historique. Les renseignements français sont accusés d'avoir failli à identifier et prévenir le déploiement américain en amont de sa mise en œuvre. Le Président de la République convoque les directeurs des services de renseignement (DRM, DGSE) et un conseil de défense exceptionnel est organisé en urgence. Par ailleurs, le dispositif de déploiement américain d'une part, et les mouvements des armées chinoises et russes d'autre part forcent les armées françaises à augmenter leurs activités de surveillance dans le but de prévenir le déclenchement d'un conflit ouvert entre les grandes puissances. De plus, les avions utilisés par les États-Unis survolent de nombreux territoires, dont la France métropolitaine et les TAAF. Ces derniers sont alors soupçonnés d'activités de surveillance, et amènent à des efforts de brouillage de la part des forces françaises. Dans ce contexte, la France propose l'établissement d'une force conjointe à l'échelle de l'Union européenne dont le but est de coordonner les efforts de surveillance et de brouillage.

Scénario 2 : La Chine et le projet ArcticX

En 2050, la planète atteint un réchauffement de +2,6°C par rapport à l'ère préindustrielle. Dans ce contexte, plusieurs points de bascule sont en cours de dépassement, et trois points de bascule sont irrémédiablement dépassés : l'effondrement de la calotte glaciaire du Groenland, la disparition totale de la glace hivernale de la mer de Barents, ainsi que la fonte totale de la glace estivale en Arctique. Le dépassement de ces points de bascule a causé une hausse moyenne du niveau de la mer de deux mètres, engloutissant des milliers d'habitations et laissant des communautés entières sans territoire habitable. Plusieurs îles et archipels – à l'instar des Maldives et des Tuvalu – ont déjà disparu, et d'autres ont perdu jusqu'à 50% de leur territoire habitable - notamment la Polynésie française. La biodiversité subit, par ailleurs, des extinctions en cascade. Plusieurs milliers d'espèces végétales et animales ont disparu depuis les années 2020. L'appauvrissement des écosystèmes et des services écosystémiques fragilise les sociétés humaines, et entretient un contexte d'insécurité climatique extrême frappant l'ensemble des pays du monde. Par ailleurs, les conflits pour les ressources hydriques et alimentaires, ainsi que les conflits socio-environnementaux se multiplient, les mouvements citoyens de résistance pour la protection des écosystèmes se faisant de plus en plus virulents. Chaque année, plusieurs centaines d'affrontements armés éclatent dans des zones naturelles sensibles, à l'instar de la forêt amazonienne, ou des glaciers européens, ainsi que dans les capitales des principaux émetteurs de CO₂ – Pékin, Washington, New Delhi, Berlin, Paris...

Dans ce contexte, une coalition d'États en faveur du déploiement d'une opération de géo-ingénierie solaire se forme, impliquant notamment les États-Unis, la Chine et l'Inde. Pour ces États, une opération visant à abaisser artificiellement la température terrestre est le seul moyen de ralentir les effets des changements climatiques et d'apaiser les troubles sociétaux qui s'intensifient. Cependant, ces pays peinent à obtenir un consensus international autour d'une opération planétaire d'injection d'aérosols dans la stratosphère, opération jugée trop risquée par le reste de la communauté internationale. Suite au refus de plusieurs propositions de déploiement adressées aux Nations unies, la Chine finit par proposer, plutôt qu'une opération planétaire, une opération de géo-ingénierie régionale pour la protection de l'Arctique, opération qui ne nécessiterait que l'aval des pays de la région. Membre observateur au conseil de l'Arctique, la Chine a précisément renforcé ses liens avec ces derniers, et multiplié les dialogues bilatéraux et multilatéraux pour accroître sa présence dans la région. Le 31 mars 2020, la Chine annonce donc le déploiement de son projet de géo-ingénierie solaire : *ArcticX*, projet ayant pour objectif d'éclaircir des nuages marins au-dessus de l'Arctique. Ce déploiement est soutenu par l'ensemble des pays de la coalition, et par la plupart des nations de la région (Canada, Norvège, Danemark, Islande), souhaitant à tout prix protéger les pôles.

Toutefois, ce projet fait grincer des dents Moscou. La fonte des calottes glaciaires du Groenland et de la mer de Barents permet à la Russie d'utiliser l'Arctique comme voie de navigation commerciale, bien plus efficace que le canal du Panama ou de Suez. Cette zone possède également de vastes gisements de pétrole, de gaz naturel et de minéraux, ainsi que des eaux riches en poisson, qui intéressent au premier chef la Russie. Aussi dénonce-t-elle la mise en place du projet *ArcticX* sans son accord, et menace de s'attaquer militairement aux navires déployés par la Chine pour son opération de géo-ingénierie. Malgré des tensions grandissantes entre la coalition et Moscou, *ArcticX* est déployé le 1er mai, un mois après l'annonce du projet par la Chine. La Russie tient sa promesse : deux des trois navires de géo-ingénierie en Arctique sont détruits le 15 juillet. Souhaitant apaiser les tensions, les pays de la coalition ne ripostent pas immédiatement, mais Washington et Pékin mobilisent tout de même leurs armées afin de faire signe de force.

Ne faisant pas partie de la coalition et ne disposant d'aucune capacité de déploiement de la géo-ingénierie, la France reste relativement impuissante face aux échanges diplomatiques et à l'escalade de tensions. Cependant, en vertu de son rôle de membre permanent du conseil de sécurité de l'OTAN, la France apporte son soutien à la coalition et prépare ses armées : augmentation des bâtiments disponibles pour une potentielle opération en Arctique, entraînements en situation au nord du Canada et au Groenland. De plus, la France étant membre observateur du Conseil de l'Arctique et défenseur de la libre circulation dans les eaux internationales, elle prend la décision immédiate d'augmenter sa présence militaire dans la région en déployant plus de personnels et de moyens. En parallèle, des troubles émergent au Sénégal, où une période prolongée de sécheresse est imputée, par les communautés scientifique et politique locales, au déploiement des premières opérations du projet *ArcticX*. Ces troubles entachent les relations entre le Sénégal et la Chine, devenue principale pourvoyeuse de fonds du pays, et ayant, au cours des décennies précédentes, construit plusieurs dizaines d'infrastructures de transport sur son territoire. Ces infrastructures, notamment un port commercial, des routes et des chemins de fer, sont la cible de sabotages ciblés par des groupes armés,

en guise de résistance à ce qu'ils appellent « l'occupation chinoise ». Face à ces groupes, qui prennent à parti l'armée sénégalaise, le Sénégal sollicite l'aide de la France, qui déploie des forces sur place avec deux objectifs : d'une part, appuyer la lutte contre les groupes armés en apportant un soutien en matière de renseignement et de formation ; d'autre part, délivrer aux populations des ressources alimentaires et hydriques dans le cadre d'un appui HADR.

Scénario 3 : la géo-ingénierie solaire sur demande, un nouveau bien de consommation

Au cours de la première moitié du XXI^e siècle, la forêt amazonienne s'est progressivement savanisée, relarguant des quantités croissantes de CO₂ dans l'atmosphère jusqu'à franchir de manière irrémédiable son point de bascule. Le taux de carbone présent dans l'atmosphère augmente rapidement, de même que la température moyenne globale, qui atteint, en 2037, les +3°C par rapport à la période préindustrielle. Ce réchauffement, bien plus rapide que celui qui avait été modélisé par la communauté scientifique, se fait notamment sentir sous la forme de vagues de chaleur et de sécheresses, causant chaque année plus deux millions de morts dans le monde, et des pertes agricoles touchant 40 % de la production mondiale. Face à la libération en cours de dizaines de milliards de tonnes de CO₂ par l'Amazonie, l'objectif d'une réduction du taux de carbone dans l'atmosphère apparaît toutefois inatteignable. Ainsi, malgré la montée en puissance de l'insécurité climatique dans le monde, les objectifs d'atténuation sont considérés comme obsolètes au sein des arènes de négociations internationales, et les discussions tendent à porter, presque exclusivement, sur les politiques d'adaptation et leur financement. Les développements technologiques dans le domaine de l'extraction du carbone atmosphérique se sont quant à eux soldés par un échec commercial et politique, du fait de l'inefficacité des techniques et des nombreux conflits socio-environnementaux qui ont émergé autour de la monopolisation de terres agricoles pour l'installation d'usines de captage. L'échec de l'extraction du carbone, qui était au fondement de l'ensemble des stratégies d'atténuation, signe la fin des stratégies d'atténuation elles-mêmes.

Dans ce contexte, un certain nombre d'États (parmi eux, les États-Unis, le Royaume-Uni, les pays du Golfe, la Russie et les pays du Maghreb), appuyés par les lobbies pétroliers, se positionnent en faveur d'un déploiement de géo-ingénierie solaire. L'Europe, quant à elle, est divisée, la Suède, la Norvège et l'Espagne se positionnant contre toute opération de géo-ingénierie solaire et pour la mise en œuvre d'un plan d'atténuation d'urgence, quand des pays tels que la France, l'Allemagne et l'Italie soulignent la nécessité d'une mesure de refroidissement d'urgence, des politiques d'atténuation ne pouvant être menées dans le cadre d'une telle insécurité climatique. Le sujet de la géo-ingénierie solaire, qui avait déjà fait l'objet de sommets internationaux dédiés au cours des années précédentes, se voit à nouveau consacrer des discussions internationales lors du sommet sur la menace climatique existentielle d'octobre 2037. À cette occasion, les États-Unis proposent le déploiement rapide d'une opération d'injection d'aérosols dans la stratosphère, avec pour but un refroidissement immédiat et uniforme autour du globe. Cette proposition est immédiatement refusée par l'Union africaine qui dénonce « la tendance occidentale à préférer l'innovation technologique à la remise en question des modes de production et de consommation, quand bien même cette innovation technologique est à l'origine de

la menace existentielle qui pèse sur l'humanité ». La Russie, initialement en faveur d'un déploiement, et la Chine, emboîtent le pas à l'Union africaine et expriment également leur refus.

Ne parvenant pas à obtenir l'assentiment de la communauté internationale pour une opération d'injection d'aérosols dans la stratosphère, les lobbies pétroliers, soutenus par les États-Unis et les pays du Golfe, mettent en place une stratégie de promotion publicitaire de la géo-ingénierie solaire à destination des consommateurs particuliers. Par le biais d'une importante campagne de marketing, passant notamment par les réseaux sociaux et la collaboration avec des influenceurs géo-ingénieurs, mais aussi par le biais d'un partenariat avec une entreprise américaine commercialisant des ballons stratosphériques et des torches de diffusion, ces lobbies rendent la géo-ingénierie solaire attractive, et accessible à tout un chacun. Un nouveau marché commercial s'ouvre ainsi par la promotion d'une nouvelle forme d'engagement climatique chez les particuliers : la diffusion individuelle de petites quantités d'aérosols dans la stratosphère. Cela fonctionne : plusieurs milliers de personnes libèrent au quotidien des ballons stratosphériques diffusant des aérosols soufrés. Ce mouvement touche prioritairement, et presque exclusivement les consommateurs des pays développés. Un certain nombre d'États du G77, sous le leadership de la Chine, dénoncent avec virulence ce mouvement, qui traduit, selon eux, l'hypocrisie de pays occidentaux se faisant les champions de la démocratie, mais contournant néanmoins les arènes de discussion internationale pour mettre en place de la géo-ingénierie clandestinement. La France, qui avait exprimé un soutien explicite à la proposition des États-Unis lors du sommet d'octobre 2017, voit par ailleurs un grand nombre de ses citoyens participer de ce mouvement de consommateurs. Cela entraîne une dégradation des relations de la France avec un certain nombre de partenaires, notamment la Chine, qui exige des pays européens qu'ils interdisent ces pratiques sur leur territoire, et menace de paralyser une partie du réseau électrique européen dont elle a fait l'acquisition. Cependant, la France, ne souhaitant pas se mettre en porte à faux avec le secteur et les États pétro-gaziers, ne se prononce pas en défaveur de ce mouvement.

Sur le plan diplomatique, cet épisode se traduit par une forte extension des zones d'influence de la Chine, qui se voit confirmée dans son rôle de puissance écologique internationale, et contre-puissance face à l'impérialisme occidental. La lutte contre la géo-ingénierie par injection d'aérosols dans la stratosphère apparaît, de fait, comme la continuité directe de la lutte contre la pollution de l'air amorcée des décennies plus tôt par le pays. À l'inverse, la France souffre d'une perte d'influence auprès des pays en développement, perçue comme une puissance irresponsable sur le plan environnemental, à laquelle on impute une volonté néocolonialiste de poursuivre le dérèglement des conditions atmosphériques pour servir les intérêts économiques occidentaux. Par ailleurs, si cette pression diplomatique devait s'accroître, et si la France devait *in fine* se positionner contre les opérations de géo-ingénierie solaire individuelle, elle pourrait mettre en péril ses approvisionnements fossiles, et par extension, les capacités opérationnelles de ses forces armées qui en dépendent encore très largement. Une interruption brutale de ces approvisionnements énergétiques serait d'autant plus paralysante pour les forces armées que celles-ci sont déjà sursollicitées dans le cadre d'une insécurité climatique accrue, et qu'elles doivent faire face à une montée en puissance des tensions internationales autour de la prise en charge de cette insécurité. Enfin, l'usage massif de ballons stratosphériques sur le territoire français et sur les territoires d'intérêt induit de nouveaux problèmes

opérationnels devant être pris en charge par les forces : cela induit en effet une augmentation de la densité du trafic aérien, avec pour conséquences une complication des activités de surveillance de l'espace aérien, des risques de collision, et enfin, des risques d'utilisation, par un ennemi, du ballon stratosphérique pour dissimuler une menace (missiles, drones, dispositifs munis de systèmes de brouillage).

3. Recommandations

En guise de conclusion aux analyses stratégiques ainsi qu'aux réflexions prospectives menées plus haut, six recommandations à destination du ministère des Armées ont été élaborées :

1

Intégrer dans nos stratégies de défense une réflexion sur la géo-ingénierie solaire en tant qu'outil politique, géostratégique et militaire, et sur ses conséquences géostratégiques.

2

Mettre en place une veille scientifique, technologique et géostratégique afin de suivre l'évolution des projets de géo-ingénierie solaire, en particulier les expérimentations à échelle réelle (zone géographique, acteurs impliqués) et anticiper la capacité de différents acteurs à maintenir une avance technologique leur permettant de déployer unilatéralement la technologie à grande échelle.

3

Estimer les opportunités et les risques que présente la géo-ingénierie solaire pour la France, et développer, en lien étroit avec le ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, une réflexion sur le positionnement géostratégique de la France sur cette question dans le cadre des discussions internationales.

4

Caractériser l'état d'avancement des États-Unis, de la Chine et de la Russie en matière de géo-ingénierie solaire, exercice compliqué par le manque de transparence sur le sujet, et justifiant un dialogue dédié avec les acteurs clés.

5

Promouvoir le partage d'information sur la géo-ingénierie solaire avec nos partenaires notamment en évoquant la thématique à l'occasion des stratégies dialogues bilatéraux et en mettant en place des initiatives de coopération.

6

Renforcer les partenariats avec les instituts de recherches en sciences atmosphériques (à l'instar de MétéoFrance), et intégrer, aux recherches sur les conséquences des changements climatiques sur les systèmes naturels, des recherches sur les effets possibles de la géo-ingénierie solaire, qui ne font l'objet d'aucun travail de modélisation en France.

GLOSSAIRE

Albédo : La capacité d'une surface à réfléchir l'énergie solaire.

Amincissement des cirrus (*cirrus cloud thinning, CCT*) : Stimulation de la création de cristaux de glace dans les cirrus afin de diminuer la quantité de rayonnement terrestre absorbé par ces derniers.

Biosphère terrestre : L'ensemble des organismes vivants sur l'ensemble de la planète, incluant toutes ses strates et ses couches.

Choc terminal : Augmentation brutale de la température planétaire suite à une interruption des dispositifs de géo-ingénierie solaire.

Cirrus : Nuages présents dans la couche supérieure de la troposphère, formés de cristaux de glace. Ils ont pour particularité de retenir une partie du rayonnement terrestre, entraînant un effet similaire à celui des gaz à effet de serre.

Circulation Brewer-Dubson : La circulation Brewer-Dubson fait référence à la circulation méridionale de renversement lagrangien moyenne dans la stratosphère. Elle présente une structure à deux cellules dans laquelle l'air monte sous les tropiques, puis se déplace vers les pôles et descend aux latitudes moyennes et élevées des deux hémisphères.

Éclaircissement des nuages marins (*marine cloud brightening, MCB*) : Injection d'embruns dans les nuages marins de basse altitude pour augmenter leur réflectivité.

El Niño : Variation chaude de l'oscillation australe, qui modifie plusieurs fois par décennie une circulation des vents et des courants sur l'axe est-ouest dans l'océan Pacifique (circulation de Walker). El Niño constitue la fluctuation la plus importante du système climatique et perturbe la circulation de l'atmosphère à l'échelle globale.

Ensemencement des nuages : La modification intentionnelle des conditions météorologiques par la diffusion de particules dans les nuages afin de réduire les chutes de grêle ou d'augmenter les chutes de pluie.

Géo-ingénierie solaire / modification du bilan radiatif : ensemble de projets techniques cherchant à compenser l'augmentation de la température moyenne globale sous l'effet des changements climatiques par une modification du bilan radiatif de la Terre (GIEC, 2022, 168). La plupart de ces techniques entendent diminuer la part de rayonnement solaire entrant dans l'atmosphère, à l'instar

de l'**injection d'aérosols dans la stratosphère** et l'**éclaircissement des nuages marins** (*marine cloud brightening, MCB*) et l'**installation de miroirs dans l'espace** (*space sunshades*), quand d'autres cherchent à diminuer la part de rayonnement terrestre retenu par l'atmosphère, à l'instar de l'**amincissement des cirrus** (*cirrus cloud thinning, CCT*).

Injection d'aérosols dans la stratosphère (*stratospheric aerosol Injection, SAI*) : Diffusion par avion ou par ballon de particules réfléchissantes dans la stratosphère afin de créer des conditions de refroidissement similaires à celles qui suivent les événements volcaniques majeurs.

Oscillation Nord Atlantique (NOA-oNA) : Mouvement des masses d'air situées au-dessus de l'Arctique et de l'Islande en direction des Açores et de la péninsule ibérique. La NOA influence le climat de l'Atlantique nord, principalement l'Europe. L'oscillation Nord Atlantique peut se produire de manière annuelle ou à l'inverse à plusieurs décennies d'écart.

Oscillation quasi biennale (OQB) : Variation régulière des vents qui soufflent en ceinture autour de la planète, à une altitude entre 15 et 50 kilomètres au-dessus de l'équateur. Composés de deux phases, les vents soufflent vers l'est puis vers l'ouest environ tous les quatorze mois. L'OQB a un impact sur la puissance du vortex polaire qui influence à son tour les modèles de pression de surface.

Rayonnement terrestre : Énergie dégagée par la Terre, composée d'énergie thermique et de la réflexion du rayonnement solaire.

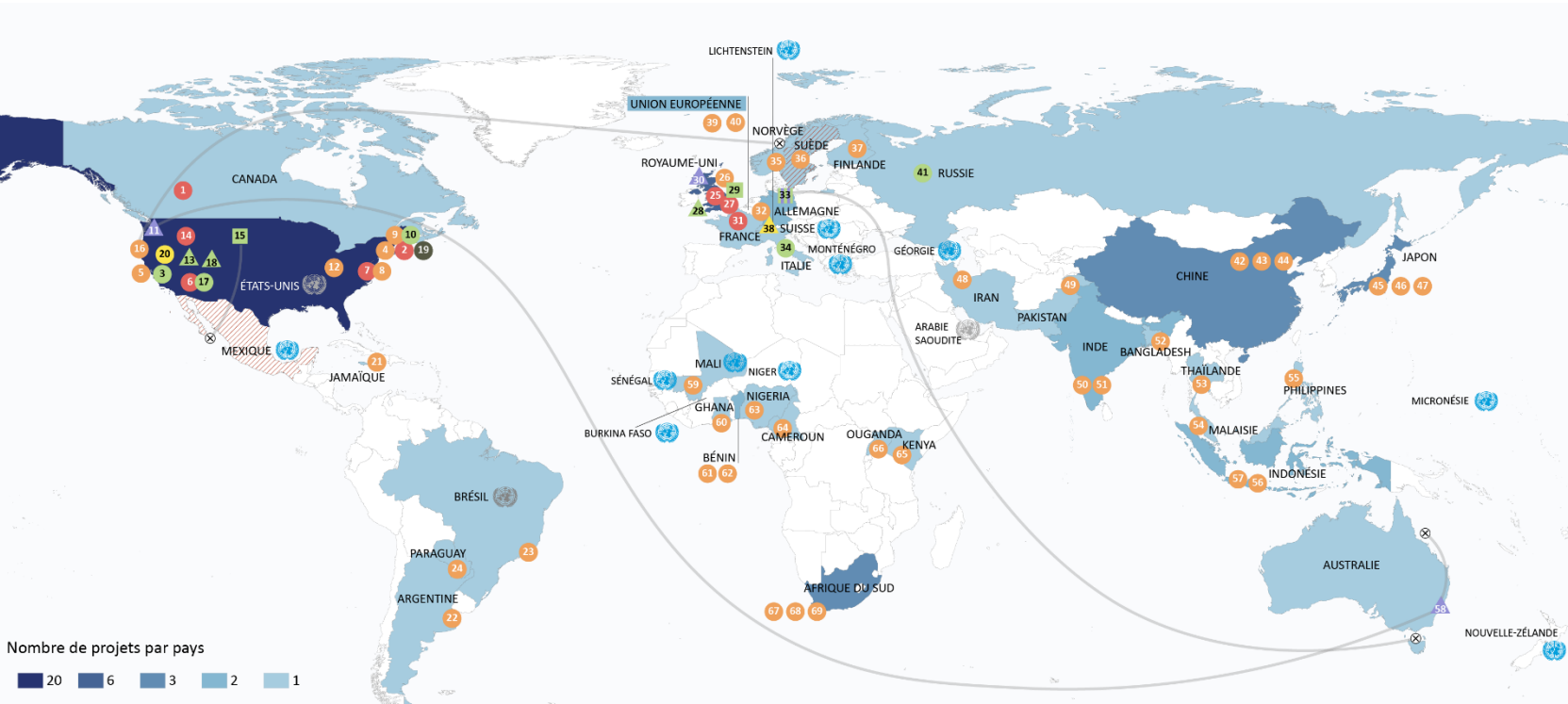
Rayonnement solaire : Énergie en provenance du soleil, essentiellement captée par la Terre sous forme de lumière.

Troposphère : Partie de l'atmosphère située entre le sol et la stratosphère.

Vortex polaire : Une dépression s'installant de manière durable dès la moyenne troposphère et jusque dans la stratosphère, à proximité de l'un des pôles géographiques de la Terre. Ces vents de haute altitude correspondent à une déviation du jet-stream.

ANNEXES

Annexe 1. Carte : principaux projets de géo-ingénierie solaire dans le monde



Nombre de projets par pays

- 20
- 6
- 3
- 2
- 1

Type de projet

- Pluridisciplinaire
- Éclaircissement des nuages marins
- Injection d'aérosols stratosphériques
- Amincissement des cirrus
- Sciences humaines et sociales (enjeux éthiques et de gouvernance)
- Miroirs spatiaux

Objectif affiché du projet

- Recherche
- Expérimentation
- Recherche et expérimentation
- Commercialisation

Expérimentations ou tentatives d'expérimentation

- Expérimentations « délocalisées »
- États cibles d'expérimentations ayant signifié leur opposition à un déploiement

Résolution de l'Assemblée générale des Nations unies Environnement de 2019

Proposition de résolution visant à évaluer les techniques de géo-ingénierie et ses modalités de gouvernance à l'AGNU Environnement

- États à l'origine de la résolution
- États s'étant opposés à la résolution

Sources : The Degrees Initiative ; "Funding for Solar Geoengineering Research from 2008-2018" on geoenvironment.harvard.edu ; map.geoenvironmentmonitoring.org, carte interactive par ETC Group and the Heinrich Boell Foundation

Noms et années des projets ¹ - ● projets en cours en 2023

- CANADA**
 - 1 - Geoengineering Research Governance Project | 2015 - en cours
- ÉTATS-UNIS**
 - 2- Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative (C2G2) | 2017-2020
 - 3- Collaborative Research: Evaluation of Suggestions to Geoengineer the Climate System Using Stratospheric Aerosols and Sun Shading | 2008-2013
 - 4- Cornell Climate Engineering
 - 5- Emmett Institute Project | 2017-2020
 - 6- Exploring Democratic Governance of Solar Geoengineering Research
 - 7- Forum for Climate Engineering Assessment | 2013 - en cours
 - 8- Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) | 2008 - en cours
 - 9- Gordon Research Conference (GRC) | 2017 - en cours
 - 10- Harvard's Solar Geoengineering Project (SGRP), dont Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCoPEX) | 2017-2024
 - 11- Marine Cloud Brightening Project (MCB) | 2016 - en cours
 - 12- Network for Sustainable Climate Risk Management (SCRIM) | 2012-2019
 - 13- Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble (GLENS) | 2015-2017
 - 14- The Ethics of Geoengineering: Investigating the Moral Challenges of Solar Radiation Management | 2010-2014
 - 15- Make Sunsets | 2022 - en cours
 - 16- Arctic Ice Project | 2018 - en cours
 - 17- Planetary Science Institute project | 2015-2018
 - 18- NOAA Earth's Radiation Budget (ERB) Initiative dont Projet SABRE
 - 19- Space Bubbles | 2021 - en cours
 - 20- Ice Cloud Size Distributions | 2006 - 2011
- JAMAÏQUE**
 - 21- Caribbean agriculture under SRM: a case study in Jamaica | 2018 - en cours ²
- ARGENTINE**
 - 22- Impacts of SRM on the La Plata Basin's hydroclimate in South America, | 2018 - en cours ²
- BRÉSIL**
 - 23- Studying the response of Cyclones to SRM in the Southern Hemisphere | 2023 - en cours ²
- PARAGUAY**
 - 24- Tackling the effects of climate change on the Andean glaciers | 2023 - en cours ²
- ROYAUME-UNI**
 - 25- Climate Geoengineering Governance Project | 2012-2014
 - 26- Integrated Assessment of Geoengineering Proposals (IAGP) | 2010-2015
 - 27- Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI) | 2010-2020
 - 28- Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) | 2010-2014
 - 29- Stratospheric Aerosol Transport and Nucleation project (SATAN) | 2021-2022
 - 30- MCB with sea water | 2006 - en cours
- FRANCE**
 - 31- Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement | 2013-2014
- ALLEMAGNE**
 - 32- Global Governance of Climate Engineering | 2009-2012
 - 33- ISA-Iron Salt Aerosol Method | 2019 - en cours
- ITALIE**
 - 34- SRM-related research at Aquila University | 2016 - en cours

- NORVÈGE**
 - 35- Exploring the Potential and Side Effects of Climate Engineering (EXPECT)
- SUÈDE**
 - 36- Linköping University Climate Engineering Research Programme (LUCE)
- FINLANDE**
 - 37- Aerosol Intervention Technologies to Cool the Climate: Costs, Benefits, Side Effects, and Governance (COOL) | 2011-2014
- SUISSE**
 - 38- Cirrus Cloud Thinning calculations | 2016 - en cours
- UNION EUROPÉENNE**
 - 39- European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE) | 2012-2014
 - 40- Implications and Risks of Engineering Solar Radiation to Limit Climate Change (IMPLICC) | 2009-2012
- RUSSIE**
 - 41- Injection d'aérosols dans la troposphère par Yuri Izrael | 2008
- CHINE**
 - 42- Geoengineering: Basic Mechanisms, Impacts and Strategies | 2013-2015
 - 43- Geoengineering: Integrated approaches and impacts | 2015-2019
 - 44- Projet des scientifiques de l'Institut de l'éco-environnement et des ressources du Nord-Ouest, affilié à l'Académie des sciences de Chine
- JAPON**
 - 45- Integrated Climate Assessment – Risks, Uncertainties and Society (ICARUS)
 - 46- SOUSEI | 2012-2016
 - 47- TOUGOU | 2017-2021
- IRAN**
 - 48- Extreme weather events and drought in the MENA region under SRM | 2018 - en cours ²
- PAKISTAN**
 - 49- The impact of climate change and SRM on malaria in South Asia | 2023 - en cours ²
- INDE**
 - 50- Reversing Climate Change via Geoengineering: Impacts on Developing countries like India | 2017-2020
 - 51- Investigating the Indian summer monsoon rainfall under SRM | 2023 - en cours ²
- BANGLADESH**
 - 52- Assessing the impacts of SRM on hydrology in Bangladesh | 2021 - en cours ²
- THAÏLANDE**
 - 53- Modelling temperature and precipitation changes in lowland Thailand | 2023 - en cours ²
- MALAYSIE**
 - 54- Impact of SRM on Hydro-climatic Extremes in Malaysia | 2023 - en cours ²
- PHILIPPINES**
 - 55- Impacts of SRM on agriculture: the Southeast Asian case | 2021 - en cours ²
- INDONÉSIE**
 - 56- Hydro-climatic extremes in Southeast Asia under SRM | 2018 - en cours ²
 - 57- Studying tropical cyclone-related extreme rainfall in Indonesia | 2023 - en cours ²
- AUSTRALIE**
 - 58- MCB for the Great Barrier Reef | 2013 - en cours
- MALI**
 - 59- Exploring whether SRM could offset droughts in West Africa | 2023 - en cours ²
- GHANA**
 - 60- Exploring changes to the Harmattan windy season and precipitation in southern West Africa | 2023 - en cours ²
- BÉNIN**
 - 61- Effects of SRM on climate change in the northern Gulf of Guinea | 2018 - en cours ²
 - 62- Marine biogeochemistry and sea level in the Gulf of Guinea | 2023 - en cours ²
- NIGÉRIE**
 - 63- Exploring whether SRM could offset droughts in West Africa | 2023 - en cours ²
- CAMÉROUN**
 - 64- Assessing the risks of water deficit in Central Africa | 2023 - en cours ²
- KENYA**
 - 65- Impacts of SRM on extreme rainfall and urban floods in East Africa | 2021 - en cours ²
- OUGANDA**
 - 66- The Impacts of SRM on seasonal and intra-seasonal climate variability over East Africa | 2023 - en cours ²
- AFRIQUE DU SUD**
 - 67- Agricultural production under SRM in Southern Africa | 2023 - en cours ²
 - 68- Exploring whether SRM can reduce risks to biodiversity and human health | 2023 - en cours ²
 - 69- Assessing the future of livestock production in Africa | 2023 - en cours ²

INTERNATIONAL

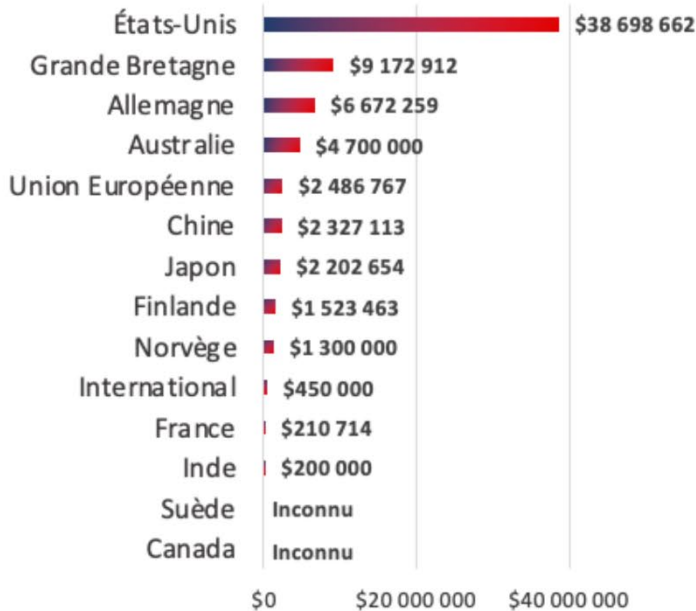
- 70- DECIMALS Fund | 2018-2020

[1] Les dates des projets sont indiquées lorsqu'elles sont disponibles
 [2] Ces projets sont financés dans le cadre de la Degrees Initiative



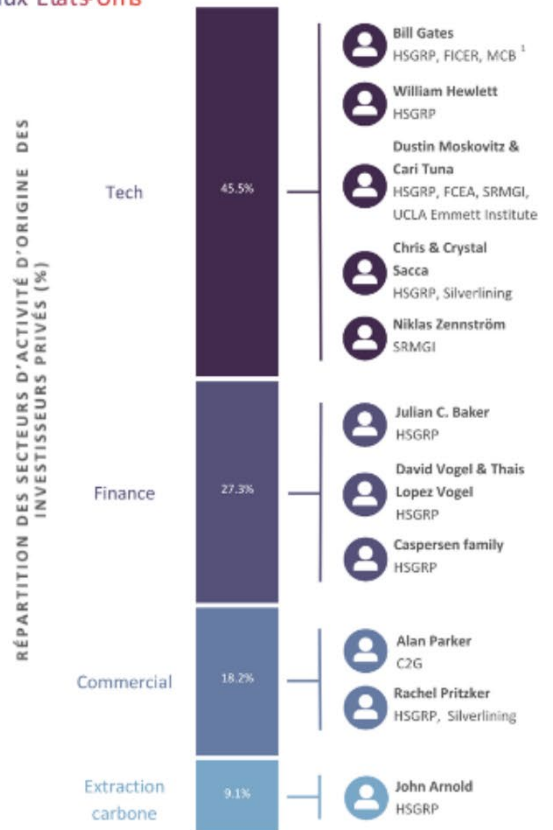
La géo-ingénierie solaire suscite de plus en plus d'attention et d'investissement à travers le monde. L'infographie ci-dessous (a) montre la domination des États-Unis en termes d'investissements, loin devant la Grande Bretagne et l'Allemagne en seconde et troisième position. Avec des investissements respectifs de 210 714 et 200 000 dollars US, la France et l'Inde se retrouvent derniers au classement. Le montant total des investissements de la Suède et du Canada reste inconnu.

a) Somme des investissements en géo-ingénierie solaire par pays entre 2008 et 2018



Source : Necheles et al. 2018

b) Répartition des principaux investisseurs privés en géo-ingénierie solaire en fonction de leur secteur d'activité aux États-Unis



Source : Necheles et al. 2019

c) La géo-ingénierie solaire comme outil politique



Un outil permettant de prolonger les modes de vies et intérêts dépendants des énergies fossiles.



Un outil permettant de protéger des territoires et des capacités militaires.



Un outil permettant de négocier sur la scène internationale.

d) Le potentiel conflictuel de la géo-ingénierie solaire

- 1 Tensions à cause des conséquences environnementales et leur attribution à un tiers.
- 2 Utilisation à des fins hostiles.
- 3 Divergences d'intérêts géopolitiques sur une zone précise.
- 4 Suspicion de surveillance.
- 5 Désaccords sur les effets et les modalités de déploiement.
- 6 Cible lors d'un conflit.

Au-delà de la possibilité d'utiliser la géo-ingénierie solaire comme outil d'adaptation au changement climatique, cette dernière pourrait également servir des intérêts politico-stratégiques. En outre, le développement et le possible déploiement de ces techniques contribuent à invisibiliser l'enjeu de l'atténuation. Ainsi, la géo-ingénierie solaire réduirait l'ambition mondiale de réduction des émissions et possède également un fort potentiel conflictuel (d).

¹ HSGRP: Harvard Solar Geoengineering Project; FICER: Fund for Innovative Climate and Energy Research; MCB: Marine Cloud Brightening Project; SRMGI: Solar Radiation Management Governance Initiative; FCEA: Forum for Climate Engineering Assessment; C2G: Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative.



SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE

Articles scientifiques et autres publications académiques

- Aquila, V., Garfinkel, C. I., Newman, P. A., Oman, L. D., & Waugh, D. W. (2014). Modifications of the quasi-biennial oscillation by a geoengineering perturbation of the stratospheric aerosol layer. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1738-1744. <https://doi.org/10.1002/2013gl058818>
- Corry, O et McLaren, D. (2023). "Our Way of Life is not up for Negotiation!": Climate Interventions in the Shadow of 'Societal Security'. *Global Studies Quarterly*. 3 (3). p.1-14. <https://doi.org/10.1093/isagsq/ksad037>
- De Guglielmo, M. (2021). Géopolitique des nuages : enjeux stratégiques et sécuritaires de la modification du temps. *La Revue internationale et stratégique*. <https://doi.org/10.3917/ris.121.0029>
- Gasparini, B., McGraw, Z., Storelvmo, T., & Lohmann, U. (2020c). To what extent can cirrus cloud seeding counteract global warming ? *Environmental Research Letters*, 15(5), 054002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab71a3>
- Grisé, M., Yonekura, E., Blake, J. S., DeSmet, D., Garg, A., & Preston, B. L. (2021). Climate Control : International legal mechanisms for managing the geopolitical risks of geoengineering. Dans *RAND Corporation eBooks*. <https://doi.org/10.7249/pe-a1133-1>
- Jadwiga, H. R., Tilmes, S., Glanville, A. A., Kravitz, B., MacMartin, D. G., Mills, M. J., Simpson, I. R., Vitt, F., Tribbia, J., & Lamarque, J. (2018). Stratospheric response in the first geoengineering simulation meeting multiple surface climate objectives. *Journal Of Geophysical Research : Atmospheres*, 123(11), 5762-5782. <https://doi.org/10.1029/2018jd028285>
- Jones, A., Haywood, J. M., & Boucher, O. (2010). A comparison of the climate impacts of geoengineering by stratospheric SO2 injection and by brightening of marine stratocumulus cloud. *Atmospheric Science Letters*, 12(2), 176-183. <https://doi.org/10.1002/asl.291>
- Jones, A., Haywood, J. M., & Boucher, O. (2009). Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. *Journal of Geophysical Research*, 114(D10). <https://doi.org/10.1029/2008jd011450>
- Jones, A., Haywood, J. M., Scaife, A. A., Boucher, O., Henry, M., Kravitz, B., Lurton, T., Nabat, P., Niemeier, U., Séférian, R., Tilmes, S., & Vioni, D. (2022). The impact of stratospheric aerosol intervention on the North Atlantic and Quasi-Biennial oscillations in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeOMIP) G6Sulfur experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(5), 2999-3016. <https://doi.org/10.5194/acp-22-2999-2022>
- Keutsch, F (s.d.) Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCOPEX). Harvard's Solar Geoengineering Research Program. <https://geoengineering.environment.harvard.edu/frank-keutsch-stratospheric-controlled-perturbation-experiment>
- Latham, J., Bower, K., Choulaton, T. W., Coe, H., Connolly, P., Cooper, G., Craft, T., Foster, J., Gadian, A., Galbraith, L., Iacovides, H., Johnston, D., Launder, B. E., Leslie, B., Meyer, J. F., Neukermans, A., Ormond, B., Parkes, B., Rasch, P. J., Wood, R. (2012). Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370(1974), 4217-4262. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0086>
- Lawrence, M. G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oschlies, A., Vaughan, N. E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J. M., & Scheffran, J. (2018). Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement Temperature goals. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Lee, W. R., MacMartin, D. G., Vioni, D., Kravitz, B., Chen, Y., Moore, J. C., et al. (2023). High-latitude stratospheric aerosol injection to preserve the Arctic. Earth's future. <https://doi.org/10.1029/2022EF003052>
- Lohmann, U., & Gasparini, B. (2017b). À Cirrus cloud climate dial ? *Science*, 357(6348), 248-249. <https://doi.org/10.1126/science.aan3325>
- Oldfield, J.D et Poberezhskaya, M. (2022). Soviet and Russian perspectives on geoengineering and climate management. *Wire Climate Change*. 1-14. <https://doi.org/10.1002/wcc.829>
- Parker, A., & Irvine, P. J. (2018). The risk of termination shock from solar geoengineering. *Earth's Future*, 6(3), 456-467. <https://doi.org/10.1002/2017ef000735>
- Pongratz, J., Lobell, D. B., Cao, L., & Caldeira, K. (2012). Crop yields in a geoengineered climate. *Nature Climate Change*, 2(2), 101-105. <https://doi.org/10.1038/nclimate1373>
- Proctor, J., Hsiang, S., Burney, J., Burke, M., & Schlenker, W. (2018). Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions. *Nature*, 560(7719), 480-483. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0417-3>
- Robock, A., Oman, L., & Stenchikov, G. L. (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO2 injections. *Journal of Geophysical Research*, 113(D16), D16101. <https://doi.org/10.1029/2008JD010050>
- Sánchez, J., & McInnes, C. R. (2015). Optimal sunshade configurations for Space-Based geoengineering near the Sun-Earth L1 point. *PLOS ONE*, 10(8), e0136648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136648>
- Sovacool, B.J. Baum, C et Low, S. (2023). The next climate war? Statecraft, security, and weaponization in the geopolitics of a low-carbon future. *Energy strategy reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101031>
- Stephens et al. (2023). Toward Dangerous US Unilateralism on Solar Geoengineering. *Environmental politics*. 32-1. <http://dx.doi.org/10.1080/09644016.2022.2156182>
- Surprise, K. (2020). Geopolitical ecology of solar geoengineering: from a 'logic of multilateralism' to logics of militarization. *Journal of Political Ecology*. 27 (1), 213-235. <https://doi.org/10.2458/v27i1.23583>

- Trisos, C. H., Amatulli, G., Gurevitch, J., Robock, A., Xia, L., & Zambri, B. (2018). Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination. *Nature Ecology and Evolution*, 2(3), 475-482. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0>
- Victor, D.G. (2008). On the Regulation of Geoengineering. *Oxford Review of Economic Policy*. 24 (2). 322-336.
- Young, D. (2023). Considering stratospheric aerosol injections beyond an environmental frame: The intelligible 'emergency' techno-fix and preemptive security. *European Journal of International Security*. 8. 262–280. <https://doi.org/10.1017/eis.2023.4>

Rapports et notes

- Bekki, S., Boucher, O., Jammes, L., Séférian, R., Viovy, N. (2021). « Interventions » sur le climat : États des lieux des initiatives aux États-Unis. Ambassade de France aux États-Unis. https://france-science.com/wp-content/uploads/2021/10/rapport_complet_les-interventions_sur_le_climat-version-final.pdf
- Climate Overshoot Commission (2023). Reducing the risks of climate overshoot. https://www.overshootcommission.org/files/ugd/0c3b70_bab3b3c1cd394745b387a594c9a68e2b.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2023). *AR6 Synthesis Report : Climate Change 2023*.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022). *Climate change 2022, mitigation of climate change. IPCC Sixth Assessment report*.
- National Intelligence Council. (2021). *Climate Change and International Responses Increasing Challenges to US National Security Through 2040. National Intelligence Estimate*. https://www.dni.gov/files/ODNI/documents/assessments/NIE_Climate_Change_and_National_Security.pdf
- OSTP. (2023). *Congressionally Mandated Research Plan and an Initial Research Governance Framework Related to Solar Radiation Modification*. Office of Science and Technology Policy. Washington. DC. USA. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/06/Congressionally-Mandated-Report-on-Solar-Radiation-Modification.pdf>
- Royal Society. (2009). *Geoengineering the climate : Science, governance and uncertainty*.
- Sacco, N. Janssens-Maenhout, G. Galmarini, S. Michel, Q. (2022). Geo-engineering: A Roadmap Towards International Guidelines. EUR 27733 EN. *Publications Office of the European Union*. Luxembourg.
- United Nations Environment Programme, UNEP (2023). *One Atmosphere: An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment*
- Unites States of America. (2022,9 mars). Congressional Record. *Proceedings and debates of the 117th congress*. Second Session. <https://www.congress.gov/117/crec/2022/03/09/168/42/CREC-2022-03-09-bk3.pdf>

Actualités, Presse et Revues

- Abnett, K. (2023, 28 juin). EU calls for global talks on climate geoengineering risks. *Reuters*. Consulté le 22 septembre, à l'adresse <https://www.reuters.com/sustainability/eu-calls-global-talks-climate-geoengineering-risks-2023-06-28/>
- Collins, F. (2022, 2 novembre). America's defence department is looking for rogue geoengineers. *The Economist*. Consulté le 22 septembre 2023, à l'adresse <https://www.economist.com/science-and-technology/2022/11/02/americas-defence-department-is-looking-for-rogue-geoengineers>
- Cooper, A.M. (2021, 20 mai). Sámi Council resistance to SCoPEX highlights the complex questions surrounding geoengineering and consent. *The Arctic Institute*. Consulté le 24 septembre 2023, à l'adresse <https://www.thearcticinstitute.org/sami-council-resistance-scopex-highlights-complex-questions-geoengineering-consent/>
- Doumergue, E et Kabbej, S. (2021). Entre promesse prométhéenne et préservation de la nature : le cas de la géo-ingénierie du climat. *RIS n°124*. 103-115. <https://doi.org/10.3917/ris.124.0103>
- Freedman. (2023, 28 février). Scientists want near moratorium on geoengineering to cool climate - for now. *AXIOS*. Consulté le 22 septembre 2023, à l'adresse <https://www.axios.com/2023/02/28/geoengineering-climate-change-research-scientists>
- Harvey, C. (2023, 1er août). A sun shield over Earth ? Catch an asteroid, and it might work. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/a-sun-shield-over-earth-catch-an-asteroid-and-it-might-work/>
- i24news. (2022, 30 août). A new battleground - the rain rivalry in the Middle East. Consulté le 17 septembre 2023, à l'adresse <https://www.i24news.tv/en/news/middle-east/environment/1661872536-a-new-battleground-the-rain-rivalry-in-the-middle-east>

- *Libération, & Afp.* (2023, 6 septembre). « L'effondrement climatique a commencé » prévient l'ONU : l'année 2023 pourrait être la plus chaude de l'histoire de l'humanité. https://www.liberation.fr/environnement/climat/lannee-2023-pourrait-etre-la-plus-chaude-de-l-histoire-selon-l-observatoire-copernicus-20230906_IZSGEKEQQRAJNIECEXV4AOQ7OY/#:~:text=R%C3%A9chauffement%20climatique-%C2%ABl'effondrement%20climatique%20a%20commenc%C3%A9%C2%BB%20pr%C3%A9vient%20l'ONU,europe%C3%A9enne%20ce%20mercredi%206%20septembre.
- Lukacs, M. Goldenberg, S et Vaughan, A. (2013, 19 septembre). Russia urges UN climate report to include geoengineering. *The Guardian*. Consulté le 17 septembre 2023, à l'adresse <https://www.theguardian.com/environment/2013/sep/19/russia-un-climate-report-geoengineering>
- Moore, S et Freymann, E. (2023, 21 février). China Doesn't Want a Geoengineering Disaster. Argument. *Foreign Policy*. Consulté le 19 septembre 2023, à l'adresse <https://foreignpolicy.com/2023/02/21/china-geoengineering-rules-climate-change/>
- Mooney. (2009). Copenhagen: Geoengineering's Big Break?. *Mother Jones*. Consulté le 18 septembre 2023, à l'adresse <http://www.motherjones.com/environment/2009/12/copenhagen-geoengineerings-big-break>
- Parson and Reynolds. 2021. Solar geoengineering: Scenarios of future governance challenges. 133. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102806>
- Pasztor, J. (2023, 21 juillet). Que l'on soit pour ou contre, la géo-ingénierie solaire doit être encadrée par des règles de gouvernance. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/07/21/que-l-on-soit-pour-ou-contre-la-geo-ingenierie-solaire-doit-etre-encadree-par-des-regles-de-gouvernance_6182951_3232.html
- Readfearn, G. (2020, 14 juillet). Coalition backs 'cloud-brightening' trial on Great Barrier Reef to tackle global heating. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2020/jul/15/coalition-backs-cloud-brightening-trial-on-great-barrier-reef-to-tackle-global-heating>
- Scharf, C. (2023, 21 août). Can we learn from Oppenheimer in responding to climate change?. *Foreign Policy*. <https://foreignpolicy.com/2023/08/21/oppenheimer-movie-atom-bomb-climate-change-geoengineering-solar-radiation-modification-srm-regulation/>
- Siegel, E. (2020, 4 janvier). Ask Ethan : Could we just build a « Space sunshade » to counteract global warming ? *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2020/01/04/ask-ethan-could-we-just-build-a-space-shade-to-counteract-global-warming/>
- Stefanini, S. (2019, 4 mars). Switzerland puts geoengineering governance on UN agenda. *Euractiv*. <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/switzerland-puts-geoengineering-governance-on-un-agenda/>
- Temple. (2017, 2 août). China Builds One of the World's Largest Geoengineering Research Programs. Climate change and energy. *MIT Technology Review*. <https://www.technologyreview.com/2017/08/02/4291/china-builds-one-of-the-worlds-largest-geoengineering-research-programs/>
- Wei, L. (2023, 14 août). Provoquer la pluie, une technique de modification météorologique controversée. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/08/14/provoquer-la-pluie-une-technique-de-modification-meteorologique-controversee_6185336_3244.html
- Weiss, S. (2022, 20 janvier). Scientists are tinkering with clouds to save the Great Barrier Reef. *WIRED UK*. <https://www.wired.co.uk/article/coral-reef-cloud-brightening-australia>
- Zizhu, Z. (2020, 9 novembre). Has geoengineering arrived in China. Climate. *China Dialogue*. <https://chinadialogue.net/en/climate/how-to-supervise-geoengineering/>

Pages Web

- Carnegie climate governance initiative. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.c2g2.net>
- Climate engineering. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://climate-engineering.mae.cornell.edu/>
- Climate Overshoot Commission. Reducing the risks of Climate Overshoot. Consulté le 24 septembre 2023, à l'adresse https://www.overshootcommission.org/files/ugd/0c3b70_bab3b3c1cd394745b387a594c9a68e2b.pdf

- Convention on Biological Diversity. (2017, 23 mars). Climate-related Geoengineering and Biodiversity. Technical and regulatory matters on geoengineering in relation to the CBD. . Consulté le 03 octobre 2022, à l'adresse <https://www.cbd.int/climate/geoengineering/>
- ETC Group. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.etcgroup.org/fr>
- European Space Agency. What are lagrange points? Consulté le 12 octobre 2023 à l'adresse https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/What_are_Lagrange_points
- GeoMip. GeoMip About. Consulté le ... à l'adresse <http://climate.envsci.rutgers.edu/geomip/about.html>
- Hands of mother earth. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.handsofmotherearth.org/>
- Harvard Solar Geoengineering Research Program. (2019). SG Funding Chart 2008-2018 (updated Aug 2019). Consulté le 14 septembre 2023, à l'adresse https://geoengineering.environment.harvard.edu/files/sgrp/files/sg_funding_chart_2008_2018_updated_aug_2019.pdf
- Great Barrier Reef Foundation. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.barrierreef.org/>
- Make sunsets. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://makesunsets.com/>
- National Environmental Satellite, Data, and Information Service (2015). Points of Lagrange : a satellite a million miles from home. <https://www.nesdis.noaa.gov/news/points-of-lagrange-satellite-million-miles-home>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023, 2 mars). NOAA research in the stratosphere is taking off. <https://research.noaa.gov/2023/03/02/noaa-research-in-the-stratosphere-is-taking-off/>
- Nations Unies. (2023) . Convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles. <https://disarmament.unoda.org/fr/le-desarmement-a-geneve/convention-sur-linterdiction-dutiliser-des-techniques-de-modification-de-lenvironnement-a-des-fins-militaires-ou-toutes-autres-fins-hostiles/>
- OMI. (2022, 10 octobre). Techniques de géo-ingénierie marine : incidences potentielles. Consulté le 22 septembre 2023, à l'adresse <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/PressBriefings/pages/Marine-geoengineering.aspx>
- O'Neill, M. (2022, 19 juillet). In case of climate emergency : deploying space bubbles to block out the sun. *SciTechDaily*. <https://scitechdaily.com/in-case-of-climate-emergency-deploying-space-bubbles-to-block-out-the-sun/>
- Overshoot commission. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.overshootcommission.org/>
- Sacha. (2022, 1 octobre). Space Bubbles : un projet du MIT pour refléter les rayons solaires depuis l'espace. *Ariel Paper*. <https://www.arielpaper.fr/societe/science/space-bubbles-un-projet-du-mit-pour-refleter-les-rayons-solaires-depuis-lespace/>
- Silverlining. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.silverlining.ngo/>
- Solar geoengineering non-use agreement. (2022, 17 janvier). We Call for an International Non-Use Agreement on Solar Geoengineering. Open letter. <https://www.solargeoeng.org/non-use-agreement/open-letter/>
- Spwadmin. (2021). Cooling by cloud brightening. *Reef Restoration and Adaptation Program*. <https://gbrrestoration.org/program/cooling-by-cloud-brightening/#:~:text=Marine%20cloud%20brightening%20is%20one,longer-term%20climate%20change%20mitigation.>
- Surprise et Sapinski. (2022, 27 octobre). Economic interests and ideologies behind solar geoengineering research in the United States. *Solar geoengineering*. <https://www.solargeoeng.org/economic-interests-and-ideologies-behind-solar-geoengineering-research-in-the-united-states/>
- Swiss Re. (2023b, juin 13). Solar radiation management – risks from reversing climate change. <https://www.swissre.com/institute/research/sonar/sonar2023/solar-radiation-risks-climate-change.html>
- The degrees initiative. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://www.degrees.ngo/>
- UCLA Law. Geoengineering governance. Consulté le 27 octobre 2023 à l'adresse <https://law.ucla.edu/academics/centers/emmett-institute-climate-change-environment/geoengineering-governance>
- UNEP Law and Environment Assistance Platform (s. d.). Geoengineering. Consulté le 20 septembre 2023 à l'adresse <https://leap.unep.org/knowledge/glossary/geoengineering>
- The White House. (2015). Findings from Select Federal Reports: the national security implications of a changing climate. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/National_Security_Implications_of_Changing_Climate_Final_051915.pdf

Ouvrages et chapitres d'ouvrages

- Aron, R. (1984). *Paix et guerre entre les nations*. Paris. Calmann-Lévy.
- Budyko, M.I. (1977). Climatic changes. *American Geophysical Union*.
- Horton, J et Keith, D. (2016). Solar Geoengineering and Obligations to the Global Poor. In *Climate Justice and Geoengineering*, edited by C.J. Preston, 79–92. London and New York: Rowman and Littlefield.
- Koller, M., & Saleh, H. E. M. (2018). *Green Chemistry*. IntechOpen.
- 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., JeltschThömmes, 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.
- Niemeier, U., Schmidt, H., & Timmreck, C. (2011). The dependency of geoengineered sulfate aerosol on the emission strategy. *Atmospheric science letters*. 12, 189-194.
- Wagner, G. (2021). *Geoengineering: The gamble*.

Sources multimédias

- Biermann, F. (2023, 8 septembre). Intervention de Frank Biermann à la table ronde géoingénierie climatique. CAPS. (en ligne).

Communications personnelles

- Dhanasree Jayaram. (2023, 8 septembre). Entretien Zoom avec Sofia Kabbej.
 - Dhanasree Jayaram est professeure adjointe au département de géopolitique et de relations internationales et co-coordinatrice du Centre d'études climatiques de l'Académie d'enseignement supérieur de Manipal (MAHE), Karnataka, Inde.
- Olaf Corry. (2023, 11 septembre). Entretien Zoom avec Sofia Kabbej.
 - Olaf Corry est Professeur de Global Security Challenges à l'Université de Leeds.
- Matt McDonald. (2023, 13 septembre). Entretien Zoom avec Sofia Kabbej.
 - Matt McDonald est Professeur au sein du département de sciences politiques et d'études internationales de l'Université du Queensland, Australie.
- Duncan McLaren. (2023, 13 septembre). Entretien Zoom avec Sofia Kabbej.
 - Duncan McLaren est post-doctorant en intervention climatique au sein de l'École de droit de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA).
- Kevin Surprise. (2023, 19 septembre). Entretien Zoom avec Sofia Kabbej.
 - Kevin Surprise est un Visiting Lecturer en Études environnementales au Mount Holyoke College.

L'ANALYSE DES ENJEUX SÉCURITAIRES ET DE DÉFENSE LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

PUBLICATIONS | PODCAST « SUR LE FRONT CLIMATIQUE » | ÉVÈNEMENTS



www.defenseclimat.fr

