



## Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Définition et perspective historique.....	4
3. La géo-ingénierie de l'environnement théorique.....	10
3.1. Les thèmes de recherche scientifiques.....	10
3.2. La place au GIEC.....	11
3.3. La place dans les médias.....	12
4. La recherche de terrain.....	14
4.1. La capture directe structurée par le mécénat privé.....	14
4.2. La fertilisation des océans en posture de précaution.....	16
4.3. L'injection de particules atmosphériques.....	18
5. Principes, politiques et programmes.....	21
5.1. La convention sur la diversité biologique.....	21
5.2. Les principes d'Oxford.....	22
5.3. Le rapport de la U.K. Royal Society.....	24
5.4. L'évaluation technologique aux Etats-Unis.....	25
5.5. Le programme SPP1689 en Allemagne.....	27
6. Conclusion.....	28
7. Références.....	29

## Index des illustrations

Illustration 1 : Progression des publications sur l'ingénierie climatique.....	4
Illustration 2 : Organisation de la littérature scientifique sur l'ingénierie climatique.....	7
Illustration 3: Finalistes du Virgin Earth Challenge.....	15
Illustration 4: Emblème et navire de la mission LOHAFEX 2009.....	17
Illustration 5: Navire de Planktos en opération.....	17
Illustration 6: Dispositif expérimental du projet SPICE.....	20

*Édition révisée du 16 juin 2014 : corrections de langage*

# 1. Introduction

L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) française a lancé en 2012 un appel d'offre pour une recherche de type "Atelier de Réflexion Prospectif" sur la géo-ingénierie de l'environnement. Le projet lauréat s'intitule *Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de géo-ingénierie de l'environnement*, coordonné par le CNRS et l'APESA.

Ce projet est organisé autour de deux séries d'ateliers de discussion. Les ateliers de la première série, organisés début 2013, portaient sur : *Définition et attributs de la géo-ingénierie, Géo-ingénierie physique et chimique, Géo-ingénierie biologique et Géo-ingénierie territoriale*. Ces discussions bottom-up visaient à faire émerger les thèmes importants pour la communauté scientifique nationale française. En effet, l'Agence nationale de la recherche qui commandite cette réflexion a pour mission d'augmenter la dynamique du système *français* de recherche et d'innovation.

Afin de mieux éclairer programmation de la recherche nationale, il est apparu utile de compléter la réflexion par une étude sur l'état des recherches dans le monde. C'est l'objet de ce rapport. Il s'agit donc ici de décrire l'état de la recherche en géo-ingénierie à l'international. Comment d'autres pays abordent-ils la recherche en géo-ingénierie, face à l'ambiguïté du sens de ce mot, à son image d'hubris<sup>1</sup> inadmissible, et au risque moral associé<sup>2</sup> (puisqu'on saura remédier demain, ne faisons rien aujourd'hui vis à vis pour le climat) ?

Cette description est motivée par deux questions sous-jacentes : Quelle est la place des recherches menées en France par rapport celles conduites dans les autres pays, est-on en retard ? Quelles voies pourraient ou devraient être soutenues en France, dans un contexte où une stratégie tous azimuts est difficilement compatible avec une stratégie d'excellence ?

Ce rapport examinera d'abord la perspective historique (chapitre 2). Les chapitres 3 et 4 présentent respectivement la recherche théorique et la recherche expérimentale actuellement en place. Enfin le chapitre 5 discute les réflexions institutionnelles sur la géo-ingénierie, qui ont abouti à des principes et des politiques ultimement traduits dans des programmes de recherche. La bibliographie (111 références) est disponible en archive Zotero avec les textes intégraux sur simple demande.

---

1 L'*hybris* (aussi écrit *hubris*, du [grec ancien](#) ὕβρις / *húbris*) est une notion grecque que l'on peut traduire par *démesure*. C'est un sentiment violent inspiré par les [passions](#), et plus particulièrement par l'[orgueil](#). L'*hybris* constitue la faute fondamentale dans la civilisation grecque. L'homme qui commet l'*hybris* est coupable de vouloir plus que la part qui lui est attribuée par la partition destinale. La démesure désigne le fait de désirer plus que ce que la juste mesure du destin nous a attribué. Le châtement de l'*hybris* est la [némésis](#), le châtement des dieux qui fait se rétracter l'individu à l'intérieur des limites qu'il a franchies. [Hérodote](#) l'indique clairement dans ce passage :

« Regarde les animaux qui sont d'une taille exceptionnelle : le ciel les foudroie et ne les laisse pas jouir de leur supériorité ; mais les petits n'excitent point sa jalousie. Regarde les maisons les plus hautes, et les arbres aussi : sur eux descend la foudre, car le ciel rabaisse toujours ce qui dépasse la mesure. »

La conception de l'*hybris* comme faute détermine la [morale](#) des Grecs comme étant une morale de la mesure, de la modération et de la sobriété, obéissant à l'adage *pan metron* (παν μετρον, qui signifie littéralement « de la mesure en tout », ou encore « jamais trop » et « toujours assez ». L'homme doit rester conscient de sa place dans l'univers, c'est-à-dire à la fois de son rang social dans une société hiérarchisée et de sa mortalité face aux dieux immortels. < <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hybris> >

2 On observe en effet que dans les controverses sur le climat, un certain nombre de climato-sceptiques comme Bjorn Lomborg ou Yuri A. Izrael se sont repliés sur la géo-ingénierie.

## 2. Définition et perspective historique

Cette étude reprend à son compte la définition proposée par le projet (Bensaude-Vincent et al. 2013), auquel nous renvoyons pour les discussions sur la pertinence du terme et ses alternatives (Bronson et al. 2010; Heyward 2013) :

*« La géo-ingénierie de l'environnement correspond à l'ensemble des techniques et pratiques développées en action corrective d'effets de la pression anthropique sur l'environnement et mettant en jeu des mécanismes qui contribuent à réguler le système planétaire terrestre »*

Le climat est le premier des mécanismes du système planétaire terrestre visés par cette définition. Comme le montre l'illustration 1, l'ingénierie climatique est un domaine de recherche qui a explosé depuis les années 2000. Toutefois comme le montre la synthèse historique de Keith (2000); l'histoire est plus ancienne. Dans REAGIR, (Bensaude-Vincent et al. 2013) en proposent cette perspective :

*L'historien de la météorologie états-unien James Fleming a identifié deux « âges d'or » de la géo-ingénierie dans la littérature scientifique : i) la Guerre froide, où la géo-ingénierie est envisagée comme opportunité belligérante ou positiviste, encouragée par les financements accrus pour la recherche publique et l'apparition de 'Big Technologies' (dont la bombe*

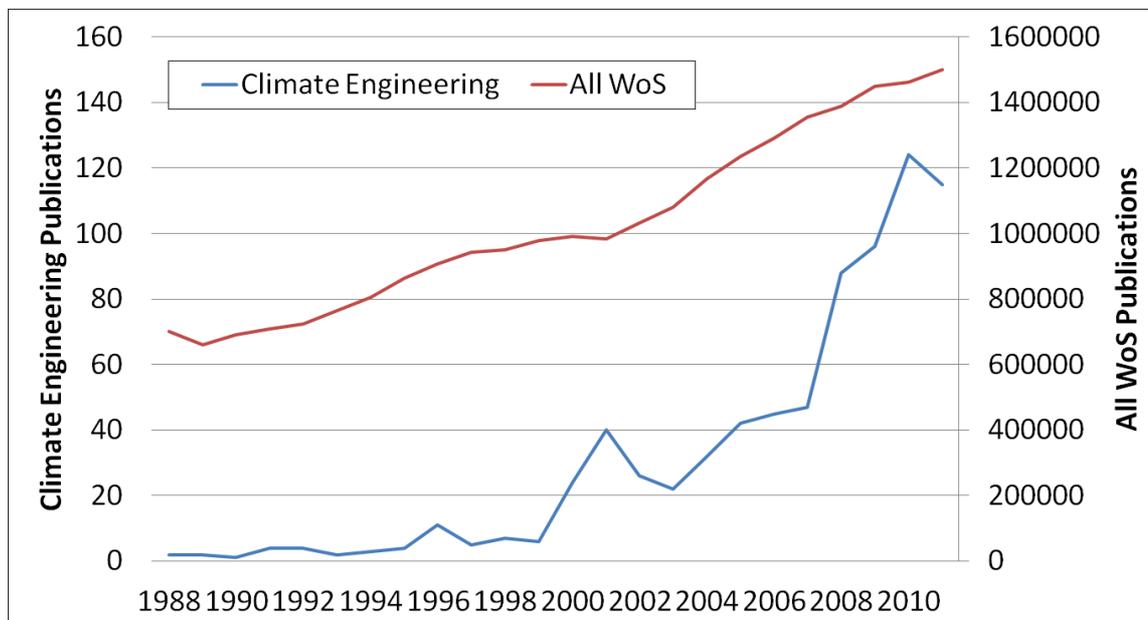


Illustration 1 : Progression des publications sur l'ingénierie climatique.

*Le nombre de publications scientifiques concernant l'ingénierie climatique (en bleu) progresse plus vite que le nombre total de publications scientifiques dans la base Web of Science, depuis les années 2000. (Belter & Seidel 2012)*

atomique)<sup>3</sup> ; ii) la période en cours débutant au milieu des années 2000, au moment où se multiplient les constats d'échecs de la gouvernance du changement climatique, inapte à maintenir les émissions de gaz à effet de serre à un niveau qui garantirait un réchauffement climatique global moyen inférieur à 2°C (objectif faisant l'objet d'un consensus large). Le dialogue entre ces deux époques est éclairant à plusieurs titres. Depuis la fin des années 1940, beaucoup se sont intéressés au changement climatique, qu'il soit associé à une prochaine glaciation, à l'effet de l'homme ou comme conséquence d'une guerre nucléaire. Alors que la bombe-A menaçait pour la première fois l'humanité d'autodestruction, la bombe-H suscitait de nouvelles craintes au début des années 1950, non seulement en raison de sa puissance destructrice mais aussi parce qu'une explosion pourrait modifier les conditions météorologiques et climatologiques. Utiliser les modifications de l'environnement comme une arme possible devint aussi un enjeu important pour les deux super-puissances, ou tout du moins auprès certains think tanks. Il était possible d'imaginer des scénarios tels que détruire la couche d'ozone stratosphérique protectrice au-dessus des territoires ennemis. Cependant, il s'agissait souvent là de spéculations car la compréhension de systèmes aussi complexes que le climat était limitée. Ces spéculations trouvèrent toutefois leurs premières applications concrètes (sans succès) en modifiant le climat aux États-Unis dans les années 1950 et 1960 et durant la guerre du Vietnam, au début des années 1970.

La littérature scientifique des années 1950-60 démontre que la géo-ingénierie ne saurait se développer indépendamment des autres tentatives d'ingénierie de l'environnement, et en particulier des ingénieries atmosphériques locales et régionales. Ainsi, pendant la Guerre froide, la pensée de la géo-ingénierie s'est développée en même temps que d'autres formes d'ingénierie de l'atmosphère, locales et régionales. Comme l'ont montré James Fleming et l'historien de l'écologie Chungling Kwa, dans les années 1950-70 aux États-Unis, la combinaison des échecs répétés des expériences de modification des pluies et des dompteurs de tornades, du caractère suspecté dangereux de leurs pratiques, ainsi qu'un certain tournant environnementaliste (avec une redéfinition des concepts de risque et d'incertitude, mutation culturelle, naissance d'institutions nationales et onusiennes de gestion/protection de l'environnement), avait suscité un rejet de l'ingénierie atmosphérique dans son ensemble, dans l'opinion et chez la plupart des scientifiques (Fleming 2010; Kwa 2001).

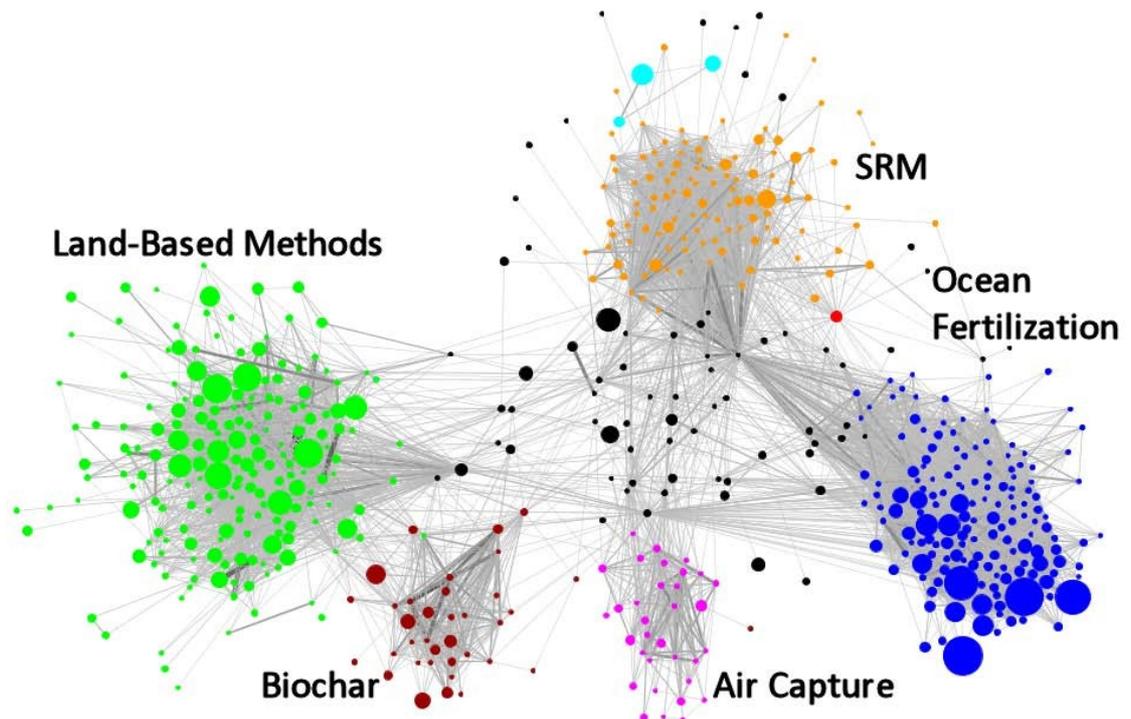
Au début des années 1970, l'ingénierie atmosphérique se trouva associée à l'impopulaire Guerre du Vietnam. Ceci constitua une épine supplémentaire dans le pied des ingénieurs de l'atmosphère. Le droit à la transparence fut exigé au sujet des expériences belligérantes d'ensemencement des nuages au Vietnam. L'URSS fit pression et, en 1977, un antécédent juridique international à la réglementation sur les activités de modification du temps fut signé par la plupart des grandes puissances militaires, États-Unis et URSS compris, France exclue : la "Convention on the Prohibition of

---

3 NdA : Par exemple la série de tests nucléaires spatiaux [Operation Fishbowl](#) en 1962, et les tests de dispersion d'aiguilles de cuivre en orbite [Project West Ford](#) en 1961 et 1963.

*Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques (ENMOD)" (Fleming 2010; Brahic 2009). En 1975, Canada et États-Unis avaient déjà signé un Accord bilatéral « relatif à l'échange d'informations sur les activités de modification du temps » civiles. Dans un article daté de 1975, Alexandre-Charles Kiss, considéré aujourd'hui comme l'un des pionniers du droit international de l'environnement, faisait référence à des expériences précédentes en matière de droit national sur la modification du temps. « Depuis 1951, écrivait-il, quelques 31 États ont adopté des lois concernant soit toute modification du temps, soit certains de ses aspects. » Puis, Kiss proposait que des « solutions juridiques soient recherchées dès maintenant », à l'image du « précédent du droit de l'espace extra-atmosphérique, ... lieu pour lequel des règles juridiques appropriées étaient, selon lui, déjà en place au moment où l'exploration de l'espace était entrée dans une phase où pouvaient précisément se poser des problèmes majeurs de droit international. » (Kiss 1975)*

*Dans le contexte du « virage environnementaliste » et des protestations contre la guerre du Vietnam à la fin des années 1960 et 1970 mentionnées ci-dessus, l'idée de manipuler l'environnement à grande échelle est alors devenu moins de projets militaires mais davantage de l'essor exponentiel de la science de l'espace, avec par exemple l'influence de l'astronome américain Carl Sagan. Au début des années 1970, les scientifiques obtinrent une meilleure compréhension des climats et atmosphères planétaires du système solaire et estimaient possible la transformation de l'atmosphère de Mars, la rendant habitable par les êtres humains (terraformation). Du fait d'une meilleure compréhension du climat planétaire, ces résultats ont été par la suite projetés sur le système Terre, dans le contexte du débat autour de l'hiver nucléaire (1983) et du changement climatique.*



*Illustration 2 : Organisation de la littérature scientifique sur l'ingénierie climatique.*

*SRM = Solar Radiation Management (Gestion du rayonnement solaire). Les nœuds colorés en noir représentent soit des articles généraux, soit des méthodes trop peu représentées dans la littérature pour constituer un groupe thématique visible. (Belter & Seidel 2012)*

L'illustration 2 montre que la littérature sur l'ingénierie climatique s'organise en cinq thèmes : la fertilisation des océans ; la capture du dioxyde de carbone à partir de l'air ; l'amélioration ou la restauration des sols avec du charbon de bois pilé (biochar) ; les autres méthodes de séquestration du carbone dans les sols ; et enfin la gestion du rayonnement solaire.

La majorité des recherches porte sur la mitigation et la séquestration du dioxyde de carbone, puisque les quatre premiers thèmes représentent 68 % des articles analysés par (Belter & Seidel 2012). La gestion du rayonnement solaire représente seulement 13 % des articles. Cette orientation n'est pas toujours perçue dans la compréhension du terme « ingénierie climatique ». Pour beaucoup d'auditeurs, ce terme renvoie d'abord à la gestion du rayonnement solaire. L'effet de primauté, c'est-à-dire le fait qu'on accorde une attention plus grande à l'option à laquelle on a été exposé en premier, explique en partie ce biais.

En effet, la gestion du rayonnement solaire est l'une des plus anciennes techniques de d'ingénierie du climat envisagées. Le projet REAGIR (Bekki et al. 2013) propose les réflexions suivantes à propos de la géo-ingénierie reposant sur les aérosols stratosphériques :

*La proposition de créer un « smog stratosphérique » pour augmenter l'albédo de l'atmosphère et ainsi réduire le rayonnement solaire incident et obtenir un refroidissement climatique date du début des années 1970*

*(Fleming 2010). Kellog & Schneider (1974) discutent cette option et la rejettent pour des raisons qui sont toujours d'actualité. Ils considèrent la connaissance du système climatique insuffisante pour prédire les effets des interventions stratosphériques (sur le climat régional, l'agriculture, etc), ce qui rendrait son déploiement irresponsable. Il y aura des perdants et des gagnants, une situation susceptible de conduire à des conflits, à moins que les perdants ne soient compensés généreusement. De plus, il y aurait aussi un problème d'attribution et de responsabilité puisque les relations de cause à effet sont incertaines et en partie inconnues, peut-être même inconnaisables pour un système aussi complexe que le climat mondial. Et d'ailleurs qui contrôlera les contrôleurs de climat ?*

*[...] Dans les années 1970 et 1980, des programmes de recherche, des infrastructures de télédétection et des événements naturels tels que l'éruption du El Chichon en 1982 ont accru la connaissance de l'effet du refroidissement climatique des éruptions volcaniques, et le soufre a été identifié comme un agent de refroidissement (Dörries 2006). Points de passages entre cette ligne de recherche et le développement de modèles radiatifs de l'atmosphère, l'évaluation de la pollution stratosphérique des vols supersoniques (avec des effets possibles sur la couche d'ozone) et la recherche des conséquences possibles d'une guerre nucléaire ont contribué à une continuité généalogique avec les propositions de géo-ingénierie stratosphérique qui ont ressurgi dans les années 1990.*

*L'ingénierie stratosphérique a ensuite été mise au point dans les laboratoires comme le Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) aux États-Unis, par le scientifique de l'atmosphère Michael MacCracken (1991) et plus tard par le physicien nucléaire Edward Teller et ses collègues (Teller et al. 1997). Puis la US National Academy of Sciences a publié [...un chapitre...] sur la géo-ingénierie (1992). L'option a également été abordée dans les deuxième, troisième et quatrième évaluations du GIEC. Ce sont des scientifiques américains qui ont pris les devants (MacCracken, Flannery, Marland, Keith). En 2001, MacCracken a suggéré au président Bush de considérer l'injection d'aérosols dans la basse stratosphère arctique pour protéger la glace de l'Arctique (MacCracken 2006). [...]*

*Un essai de Paul Crutzen (2006) a catalysé le débat et l'évaluation des climatologues de la géo-ingénierie stratosphérique avec un financement substantiel de recherche au Royaume-Uni à partir de 2009. Des recherches aux États-Unis (NCAR, LLNL, etc) et en Europe (IMPLICC programme) ont fourni des évaluations, principalement sur la base de la simulation.*

*Certains scientifiques suggèrent une « optimisation » de la géo-ingénierie stratosphérique : compromis (température et précipitations), en jouant sur l'emplacement et la taille des particules dans la mesure où celles-ci seraient contrôlables; d'autres sont beaucoup plus critiques. Les critiques rejettent le paradigme des physiciens du climat qui croient dans les processus contrôlables et / ou notent des effets indésirables, des effets incertains et inconnus, étant donné la complexité des processus microphysiques et chimiques et les défauts dans les modèles. Certaines de ces critiques jettent le doute sur l'analogie entre les éruptions volcaniques et l'injection*

*d'aérosols stratosphériques. L'injection de soufre dans la stratosphère pendant des décennies est différente de l'éruption sporadique d'un volcan tropical, ce qui limite la validité de l'analogie et rend les effets de l'intervention plus imprévisibles. De manière surprenante, le Pinatubo est souvent l'analogie volcanique utilisé, alors que d'autres éruptions volcaniques majeures du passé, telle que le Toba, pourraient aussi être considérées.*

### **3. La géo-ingénierie de l'environnement théorique**

#### **3.1. Les thèmes de recherche scientifiques**

Au delà des sciences du climat, l'ingénierie climatique mobilise déjà des recherches en sciences économiques, politiques et sociales.

Les modèles de simulation numérique sont une catégorie importante d'instrument de recherches sur le système Terre. Govindasamy et Caldeira (2000) ont été parmi les premiers à utiliser cette approche pour étudier les effets de la gestion du rayonnement solaire. C'est aujourd'hui une voie de recherche en géo-ingénierie de l'environnement qui reste très active. Ainsi le Geoenvironment Model Intercomparison Project (GEOMIP) (Kravitz et al. 2011) se propose de comparer les résultats de différents modèles pour quatre expériences idéalisées ou d'émission d'aérosols de sulfate dans la stratosphère.

Au delà des effets directs sur le bilan énergétique, les résultats obtenus par recherche sur la gestion du rayonnement solaire portent sur divers compartiments du système terre comme : l'élévation du niveau de la mer (Moore et al. 2010) ; les rendements agricoles (Pongratz et al. 2012) ; les réponses climatiques régionales (Ricke et al. 2010; Robock et al. 2008) ; ou encore les impacts sur les couches supérieures de l'atmosphère (Tilmes et al. 2009).

A côté des modèles, voire avant eux, il existe une tradition de recherche plus top-down du système Terre, qui s'intéresse aux bilans thermodynamiques globaux (Lovelock & Margulis 1974; Kleidon 2010). Lovelock (2008) compare l'état actuel de l'ingénierie du système Terre à la médecine du 19e siècle, et rappelle que la simulation numérique n'est pas un substitut acceptable pour l'expérimentation et l'observation. Un apport important de ces approches est d'accorder une grande attention au rôle de la vie dans l'homéostasie, ce que les modèles prennent difficilement en compte.

La perspective de coûts modérés relativement à d'autres réponses possibles au changement climatique est l'une des justifications principales de l'intérêt pour la géo-ingénierie de l'environnement (Pielke Jr. 2009). Cet argument relève d'un bon sens certain : il est toujours utile d'avoir plus d'options à disposition pour répondre à un problème. Toutefois il soulève de nombreuses questions de recherche.

Les modèles technico-économiques servant à évaluer les coûts de la géo-ingénierie comportent de nombreuses hypothèses techniques idéalisées qui résistent rarement aux contingences matérielles de la construction d'un prototype, puis d'un pilote. Les évaluations de coûts pour les technologies futures sont biaisées puisqu'il n'existe pas de marché observable et seuls les promoteurs de la technologie, qui ont un intérêt à l'affaire, portent l'information. De plus les coûts qui importent sont les coûts à long terme, après les effets d'apprentissage et d'échelle, et ceux ci sont difficilement prévisibles. Le coût de la capture du dioxyde de carbone à partir de l'air est un exemple de tels controverses (House et al. 2011)

À l'autre bout de l'échelle, l'analyse économique utilise aussi des modèles intégrés d'évaluation des stratégies optimales des politiques climatiques à l'échelle globale, à

l'aide du paradigme du décideur bienveillant. Cette classe de modèles a d'abord été appliquée à l'étude de la politique climatique optimale compte tenu de la possibilité de capture directe à partir de l'air (Chen & Tavoni 2013; Keith et al. 2006). L'analyse des réponses optimales face aux risques et aux incertitudes liées à la gestion du rayonnement solaire est aussi un thème récurrent dans ces recherches (Goes et al. 2011; Moreno-Cruz & Keith 2012).

Les recherches sur la géo-ingénierie s'intéressent aussi aux implications juridiques, éthiques et de gouvernance (Hale & Dilling 2011; Michaelson 1998). Hulme (2012) attire l'attention sur le risque moral : si la gestion du rayonnement solaire est considérée comme « abordable » et « efficace », cela peut-il être argument contre l'urgence de limiter la pollution aujourd'hui ? La possibilité de mise en œuvre unilatérale de certaines technologies pourrait changer les conditions de la négociation climat (Barrett 2008).

Un point de vue plus appliqué consiste à analyser les différentes attitudes que le gouvernement pourrait adopter vis-à-vis de la recherche sur la géo-ingénierie –du moratoire au laisser-faire. Lempert et Prosnitz (2011) comparent les conséquences de ces diverses options notamment en termes de sécurité nationale pour les USA, alors que (Bodansky 2013) adopte un point de vue plus global.

Les recherches en sociologie sur la connaissance et la perception de l'ingénierie climatique par le grand public sont encore rares, (Mercer et al. 2011) constitue l'un des premiers articles publiés sur le sujet. Les recherches analogues sur le stockage du CO<sub>2</sub> montrent qu'il convient d'utiliser avec prudence la notion « d'opinion publique » pour une technologie qui n'existe pas et est donc peu connue. Ce point est d'autant plus important que le sens du mot « géo-ingénierie » est ambigu voire manipulé.

Les recherches sur la géo-ingénierie comme « science en société » sont plus nombreuses et mieux fondées. La France est bien placée avec les travaux de Régis Briday et Mieke van Hemert sous la direction de Amy Dahan au centre A. Koyré. À l'étranger (Bellamy et al. 2012) a examiné sous quel angle la géo-ingénierie était abordée dans les rapports d'évaluation sur cette technologie. Les auteurs ont montré que la technologie était en général considérée isolément des autres options de lutte contre le changement climatique, et plutôt sous un angle d'expertise technique. Ils en concluent que la fermeture des débats serait prématurée à ce stade.

### **3.2. La place au GIEC**

Signe de l'intérêt que les politiques et les scientifiques portent à l'ingénierie climatique, le thème occupe une place croissante dans les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). L'idée n'est pas encore mûre au point d'avoir suscité un rapport spécial du GIEC sur la question, mais le thème a fait l'objet d'un séminaire de travail entre experts des trois groupes de travail (Edenhofer et al. 2011).

L'ingénierie climatique est évoquée comme suit dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5). Le groupe de travail I examine les effets de la capture du CO<sub>2</sub> au chapitre 6, dans la section « Geoengineering involving the carbon cycle ». Il examine la gestion du rayonnement solaire et les cirrus au chapitre 7, dans la section « Geoengineering

involving clouds and aerosols ». Enfin le chapitre 11 comporte une section sur les conséquences intitulée « Possible effects of geoengineering ».

Le terme n'est pas employé dans le plan de travail du Groupe II.

Le plan de travail donné au groupe III prévoyait que le chapitre 5 traite de la géo-ingénierie avec une section « Carbon and radiation management and other geoengineering options including environmental risks ». Un tel mandat est toutefois difficile à porter dans un chapitre essentiellement consacré à l'analyse rétrospective. En effet le chapitre 5 « Drivers, Trends and Mitigation » s'intéresse aux tendances lourdes concernant l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. De fait la section est échue au chapitre 6, qui traite d'évaluation intégrée des trajectoires de transformation.

Dans la contribution du Groupe III, la géo-ingénierie est aussi présente dans d'autres chapitres. Le chapitre 3 traite d'éthique et de justice, il discute les arguments moraux pour et contre ces technologies. Le chapitre 13 sur la coopération internationale examine « The special case of international cooperation regarding carbon dioxide removal (CDR) and solar radiation management (SRM) ». Cette présence se sent dans le chapitre 1 introductif qui évoque largement l'ingénierie climatique.

Dans un entretien accordé à Tollefson (2010), Ottmar Edenhofer, économiste en chef au Potsdam Institute for Climate Impact Research in Germany et co-chairman du groupe III du GIEC, remarque que les engagements de réduction d'émissions de gaz à effet de serre ne seront probablement pas suffisants pour atteindre les objectifs communément évoqués de limitation du changement climatique, comme un réchauffement inférieur à 1.5–2 °C à la fin du siècle.

*"Geoengineering is one option, and it should be included in a portfolio of other options," says Edenhofer.*

En clarification, le GIEC a toutefois précisé ultérieurement qu'il ne recommandait aucune stratégie de mitigation ou politique climatique, et qu'il ne recommandait pas la géo-ingénierie comme une façon de limiter le réchauffement global à 1.5-2 °C à la fin du siècle.

### **3.3. La place dans les médias**

Le sujet de la géo-ingénierie a déjà trouvé une petite place dans les pages à vocation scientifique et technique des médias grand public (voir par exemple Science et Vie hors série n°240 « Le climat » pages 158 à 162 ; Science et Vie n° 1071, pages 56 à 67 ; Libération du 8 avril 2013 ; Le Monde du 30 septembre 2006 ; épisode de X:enius du 15 février 2013 sur Arte ; La Recherche du 19 juin 2012).

À l'étranger, l'émission [Project Earth](#), une série diffusée sur Discovery Channel aux États-Unis en 2008, constitue l'un des documentaires les plus volumineux autour de la géo-ingénierie. En effet, chacun des 8 épisodes de cette série examinait un groupe de scientifiques qui étudie une approche radicale pour lutter contre le changement climatique. Le Tableau 1 donne le programme, où l'on constate que la bonne télévision et la bonne science sont deux univers bien différents.

<b>Episode</b>	<b>Sujet</b>	<b>Note on results</b>
Wrapping Greenland	Seeing if glacier melting on <a href="#">Greenland</a> can be prevented by wrapping them in blankets. White tarps, held in place by bamboo, were used on two acres.	Test results better than expected. Material saved and compressed ice by two feet, saved 5000 tons of ice from melting. Ramping up to full scale to cover all of Greenland would cost \$400 billion for 771 million blankets, plus delivery and wages.
Raining Forests	Led by scientist Mark Hodges, they attempt <a href="#">to reforest</a> areas of bare <a href="#">Earth</a> from helicopters using canisters holding a tree seedling.	Fail: The propagules were unable to take root after three months.
Brighter Earth	Led by atmospheric physicist John Latham and engineer Stephen Salter, the team attempted a Cloud reflectivity enhancement experiment. Geoengineer regular clouds. Use sea water to redistribute the molecules of water in clouds to redirect more sunlight back into space.	Water jet: fail. Particles created averaged 14 microns, the goal was about 1 micron. Salt flares: success. 300 flares set off simultaneously off the back of a boat. Particles were carried up in thermals into the condensing layer. Created cloud about 100 feet wide by about 4 miles long, volume about six million cubic meters.
Infinite Winds	Testing of a revolutionary wind turbine led by engineer Fred Ferguson in an attempt to harness the energy of high-altitude winds.	200W produced. Not geoengineering by our definition..
Hungry Oceans	Dr. Brian von Herzen and the Discovery team join Professors David M Karl (University of Hawaii) and Ricardo M Letelier (Oregon State University) to test waveday powered pumps in an effort to bring nutrients from the depths of the oceans to the surface.	Mixed results. First pump failed completely, second pump worked for half a day.
Space Sunshield	Attempting to create a 100,000-square-mile (260,000 km <sup>2</sup> ) sunshade by placing trillions of lenses in space, led by astronomer and professor Roger Angel.	Fail. Rocket crashed, everything destroyed.
Orbital Power Plant	Former NASA physicist John Mankins's vision of launching thousands of satellites into space, gathering solar energy from the Sun and beaming it down to Earth as microwave energy.	Not geoengineering by our definition.
Fixing Carbon	Testing to see if the air can be scrubbed clean of its <a href="#">carbon dioxide</a> . <a href="#">David Keith</a> builds a machine prototype that sucks air into one end and sprays with a <a href="#">sodium hydroxide</a> solution, then expelling clean air out.	Capture work, there is no storage.

*Tableau 1 : Programme des épisodes de la série documentaire « Project Earth »*

## 4. La recherche de terrain

Parallèlement à la recherche théorique examinée plus haut, nombre de projets et expériences prennent déjà place sur le terrain. Cette section en examine trois catégories : les expériences de capture directe du CO<sub>2</sub> à partir de l'air ; les expériences de fertilisation océanique ; et les expériences de modification du temps.

### 4.1. La capture directe structurée par le mécénat privé

La recherche sur la capture directe se caractérise par un soutien privé important. Les deux programmes privés majeurs dans le champ sont le [Virgin Earth Challenge](#) et le Fund for Innovative Climate and Energy Research ( [FICER](#) ).

Le Fund for Innovative Climate and Energy Research ( [FICER](#) ) est un programme de subvention directe à la recherche. Abondé par M. Bill Gates sur fonds personnels, il est géré à l'université de Calgary par Drs. D. Keith et K. Caldeira. Depuis 2007, il a supporté treize projets de recherche et des conférences, pour un montant total de 4.6 millions de dollars. Différents aspects de l'ingénierie climatique ont été supportés, en particulier le développement de technologie de capture du CO<sub>2</sub> à partir de l'air et des analyses des technologies et politique climat avec modélisation du système climatique.

Le Virgin Earth Challenge est une compétition visant à récompenser l'invention d'une technologie économiquement viable et écologiquement durable pour retirer les gaz à effet de serre de l'atmosphère. Le prix est de 25 millions de dollars américains. Le jury se compose de James E. Hansen ; Tim Flannery ; James Lovelock ; Crispin Tickell; Al Gore et Richard Branson qui est à l'initiative du prix.

Il s'agit d'une opération majeure de structuration de l'innovation privée. Cette méthode s'inscrit dans une tradition établie de stimulation de la recherche en ingénierie. Cette tradition a connu un certain renouveau depuis le milieu des années 1990, avec le DARPA, la NASA ou encore le [X prize](#), lancé en 1996 promouvoir l'accès à l'espace. Ce dernier s'appuyait sur le modèle du Orteig prize pour le vol transatlantique, gagné en 1927 par Lindbergh. La tradition remonte même à 1714, année où le gouvernement anglais<sup>4</sup> a lancé un prix pour une invention permettant de déterminer la longitude.

Tout en reconnaissant que le prix ne saurait être décerné avant de nombreuses années, le jury a retenu les onze finalistes représentés Illustration 3. Ces onze finalistes représentent cinq voies de capture différentes.

Trois compagnies sont sur le biochar (Woolf et al. 2010) :

- Biochar Solutions produit et installe des équipements industriels de pyrolyse contrôlée de résidus forestiers. Leur B-1000 peut coproduire par heure environ 60 kilos de charbon de bois et de la chaleur.
- Black Carbon produit et installe des équipements industriels de pyrolyse contrôlée de résidus forestiers avec cogénération. Leur BC300 peut coproduire par heure 35 kW d'électricité tout en générant 25kg de charbon de bois et 110kW

---

4 Mentionnons ici par patriotisme Nicolas Appert, qui reçut le 30 janvier 1810 le prix lancé par Napoléon pour l'invention d'une méthode de conservation de la nourriture.



*Illustration 3: Finalistes du Virgin Earth Challenge*

d'eau chaude pour le chauffage urbain.

- Full Circle a développé des technologies de pyrolyse et viserait les grands marchés agricoles, sans référence précise toutefois.

Cinq finalistes proposent des technologies de capture directe du CO<sub>2</sub> à partir de l'air par des solvants chimiques (Stephens & Keith 2008) :

- Carbon Engineering développe sur la base de technologies industrielles existantes. Leur prototype a la taille d'un conteneur de 40 pieds environ. Durant l'été et l'automne 2012, il a capturé 2 tonnes de CO<sub>2</sub>. Leur programme pour 2013-2015 est de construire un pilote intégré de bout en bout. Leur stratégie est d'insérer la capture directe dans le cycle de production de carburants liquides : production de CO<sub>2</sub> pour la récupération assistée du pétrole, pour la culture des algues, ou pour la synthèse directe de carburants.
- Climeworks développe une technologie dont le cycle de régénération utilise de l'énergie de basse qualité : de la chaleur à moins de 100°C. Ils opèrent un démonstrateur mobile de capacité d'une tonne de CO<sub>2</sub> par an (4 kg par jour) et prévoient la disponibilité à l'échelle industrielle pour 2015.
- COAWAY se propose d'utiliser les tours de refroidissement existantes pour la séparation multiphasique et la régénération à basse température également.
- Global Thermostat's utilise la chaleur résiduelle des procédés industriels pour leur process. Le pilote opérationnel est sis à SRI International, Menlo Park, CA.
- Kilimanjaro Energy utilise un adsorbant qui capte le CO<sub>2</sub> quand il est sec mais le relâche quand il est humide (Gunter 2011).

Enfin trois compagnies explorent d'autres voies :

- Biorecro est une société de services spécialisée dans l'énergie de la biomasse avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (BECCS). La compagnie a par exemple participé au panel d'experts pour le projet d'Archer Daniels Midlan à Decatur, Illinois, projet de captage et injection du CO<sub>2</sub> sur une unité de production de

méthanol biocarburant.

- Le **Savory** Institute promeut un modèle d'exploitation agricole qui permet une utilisation durable des savanes et prairies : la gestion holistique des troupeaux. Le système est basé sur la compréhension de la dynamique naturelle entre les troupeaux de grands herbivores sauvages, leurs prédateurs et le milieu. Il permet de restaurer la qualité des sols, donc leur contenu en carbone.
- Smart Stones étudie la minéralisation du CO<sub>2</sub> ex-situ par réaction avec les olivines, un minéral silicaté abondant dans la croûte terrestre. Ils proposent de co-produire les olivines lors de l'extraction de minerais dans de grandes mines à ciel ouvert -de nickel par exemple-, de les broyer très finement (100 microns) et de les répartir quelques centaines de kilomètres à la ronde.

## **4.2. La fertilisation des océans en posture de précaution**

La fertilisation des océans se caractérise par une recherche académique expérimentale internationale d'intérêt écologique et océanographique bien encadré, mais à l'image troublée par l'action de quelques francs-tireurs entrepreneurs.

Boyd et al. (2007) font la synthèse de 12 expériences de fertilisation des océans par ajout de fer, entre 1993 et 2005. Ces expériences montrent sans équivoque que le fer est facteur limitant dans un tiers des surfaces de l'océan. Elles montrent que la disponibilité en fer contrôle la dynamique des efflorescences algales (plankton bloom), qui affectent les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore, du silicium et du soufre, qui eux-mêmes influencent le climat.

Stimuler une floraison algale n'implique pas que du carbone soit transféré dans les couches profondes de l'océan. L'expérience LOHAFEX (Indian and German Iron Fertilization Experiment, voir Illustration 4 page 17) en 2009 le montre. L'épandage de sels ferriques sur quelques 900 kilomètres carrés dans l'Atlantique sud a bien conduit à une efflorescence de phytoplancton. Mais ce plancton ne contenait pas de diatomées, auxquelles il manquait un autre nutriment essentiel. En leur absence, la séquestration de carbone a été faible car les autres phytoplanctons sont vulnérables à la prédation par le zooplancton et ne coulent pas rapidement après leur mort. L'expérience a donc montré que le choix du lieu de fertilisation était crucial pour l'efficacité de la séquestration.

Ces résultats impliquent aussi que le système n'est pas assez connu pour être un levier de géo-ingénierie. La science devrait comprendre l'ensemble des facteurs biogéochimiques comme les dérivés azotés, les phosphates, le rôle des cendres volcaniques, valider les simulations numériques, être capable de connaître l'état de base, le fonctionnement des écosystèmes. Il serait aussi nécessaire de disposer de moyens fiables pour observer les changements induits notamment le transfert du carbone vers les couches profondes qu'on cherche à provoquer. Dans l'ensemble, les chercheurs concluent que la science ne permet pas aujourd'hui d'évaluer les risques et les bénéfices de la fertilisation de l'océan (Buesseler et al., 2008; Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2009).



*Illustration 4: Emblème et navire de la mission LOHAFEX 2009*



*Illustration 5: Navire de Planktos en opération.*

Cette position n'empêche pas quelques entrepreneurs d'envisager la fertilisation de l'océan sur une base commerciale.

- La société Ocean Nourishment Corporation (ONC) créée en 2004 est positionnée sur l'expertise technique dans le domaine de la fertilisation des océans. Ses deux axes stratégiques sont la durabilité des systèmes alimentaires et la séquestration biologique du carbone. Elle propose de la recherche académique et des études de faisabilité.
- La société Climos se proposait de commercialiser des services de fertilisation des océans par le fer pour capter le CO<sub>2</sub>. Dan Whaley a annoncé la cessation d'activité en février 2011, lorsqu'il a rejoint le consortium ISIS (*in situ* iron studies).
- En 2008 la compagnie Planktos de Russ George a été conduite à abandonner un projet de fertilisation des océans par le fer et de vente de certificats de réduction volontaire pour ne pas avoir pu lever les fonds nécessaires et suite à une controverse sur le bien-fondé de la mission (Courtland 2008). En 2012, la compagnie Haida Salmon Restoration Corporation du même Russ George (Illustration 5 ci-dessus) a épandu 100 tonnes de sulfate de fer dans l'océan Pacifique, 200 miles à l'ouest des îles Haida Gwaii, archipel canadien au large de la Colombie Britannique. Une efflorescence algale a bien été observée, ce qui pourrait en faire l'acte de géo-ingénierie le plus étendu à ce jour (Lukacs 2012). Les [critiques](#) accusent l'opération de violer le droit international, plus précisément la Convention de Londres et la Convention sur la Biodiversité (voir ci-dessous).

Enfin, sans que cela soit de la fertilisation, Cquestrate (Tim Kruger) propose de capturer le dioxyde de carbone atmosphérique par épandage de chaux dans l'océan, avec le co-bénéfice de lutter contre l'acidification. La chaux serait produite par calcination du calcaire, et le CO<sub>2</sub> dégagé à ce stade pourrait servir à fertiliser des algues pour produire des biocarburants. Subventionné initialement par deux bourses de Shell, le projet adopte aujourd'hui une posture « open source » innovante dans le champ.

### **4.3. L'injection de particules atmosphériques**

Cette section montre que les recherches à l'international sur la gestion du rayonnement solaire se déroulent dans des contextes divers, et que ce qui peut être inacceptable dans un pays peut très bien être pratiqué sans problème ailleurs.

Le Marine Clouds Brightening (MCB) consiste à injecter de l'eau dans l'atmosphère au-dessus des océans afin d'augmenter la réflectivité des nuages marins (Latham et al., 2012). Le projet Silver Lining, par exemple, examine l'idée d'une flotte de navires injecteurs. FICER a financé une partie des recherches sur la faisabilité sans aller jusqu'à l'expérimentation de terrain qui exigerait des développements technologiques en particulier au niveau des dispositifs d'injection (Temple 2013).

Le Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) est un projet de recherche britannique, dont le but est d'étudier la possibilité d'injecter des particules dans la stratosphère afin de réfléchir les rayons du soleil et d'ainsi modifier le climat rapidement. Il est financé publiquement par l'EPSRC/NERC à la suite d'un « sandpit » qui a sélectionné deux projets (SPICE et IAGP) et se déroule d'octobre 2010 à mars

2014. Le projet prévoyait un volet expérimental à petite échelle en extérieur. Il consistait à nébuliser 30 g d'eau par seconde à une hauteur de 1 km. Suite à des controverses sur la géo-ingénierie, ce volet a été différé de six mois en octobre 2011, avant d'être purement annulé en mai 2012. Le coordinateur a cité deux raisons pour cette annulation : premièrement certains participants avaient pris des brevets sur la technologie étudiée, ce qui générerait des conflits d'intérêt potentiel ; et deuxièmement on ne disposait pas du cadre réglementaire pour ce type de projet sur la géo-ingénierie (Pidgeon *et al.*, 2013).

Le blocage du projet SPICE contraste avec la situation ailleurs dans le monde. En Russie par exemple, l'académicien réputé Yuri A. Izrael (2009a; 2009b; 2011) et son équipe pratiquent une recherche de terrain en géo-ingénierie sur la gestion du rayonnement solaire. L'injection d'aérosols s'est faite à partir d'hélicoptères à 200 m d'altitude (Mooney, 2009).

Les techniques de gestion du rayonnement solaire se rapprochent –ne serait-ce que dans l'esprit des gens– des techniques de modification du temps, dont la pratique est acceptée et continue dans de nombreux pays, malgré une efficacité qui est loin d'être établie. La technique d'ensemencement des nuages a été lancée en France dans les années 50 pour lutter contre les ravages de la grêle sur les cultures, qui s'élèvent à plusieurs centaines de millions d'euros par an d'après l'ANELFA (Association nationale d'études et de lutte contre les fléaux atmosphériques).

La modification du temps peut viser à faire pleuvoir pour lutter contre la sécheresse, à des fins agricoles ou pour améliorer la qualité de l'air. La Chine a probablement le plus important programme au monde. Le Beijing Municipal Meteorological Bureau aurait ainsi tiré plus de mille fusées pour garantir contre la pluie la cérémonie d'ouverture des jeux olympiques en 2008.

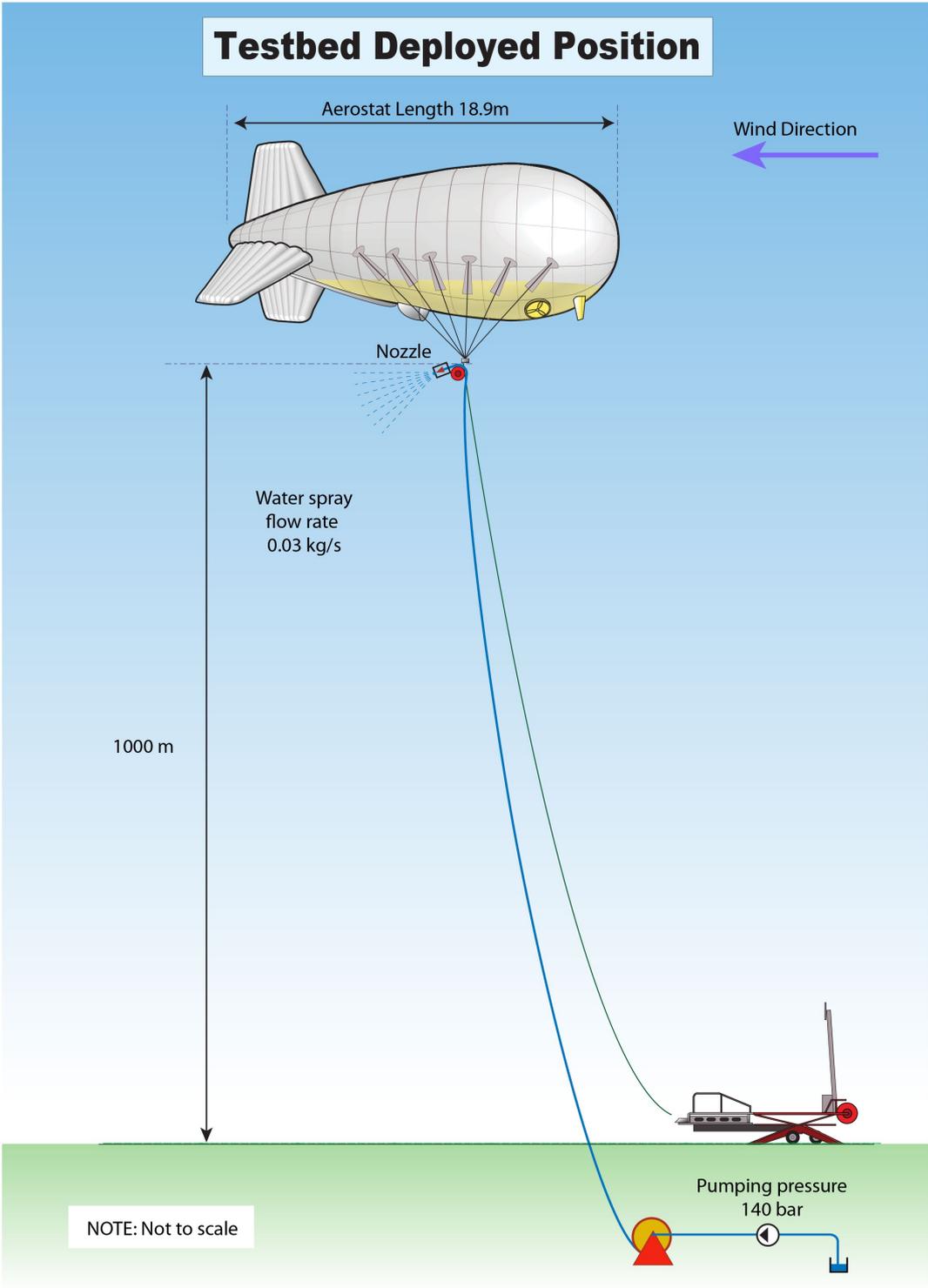


Illustration 6: Dispositif expérimental du projet SPICE.

## 5. Principes, politiques et programmes

La géo-ingénierie de l'environnement est une technologie duale (civile et militaire), dont les risques potentiels pour l'environnement sont d'une échelle extrême, et qui intervient en réponse à un problème de risque lui-même controversé. La conduite de la recherche dans ce domaine s'accompagne d'une approche réflexive sur les principes et les raisons qui sous-tendent cette recherche. Ces réflexions prennent place dans des instances politiques (comme la convention sur la biodiversité), académiques (Oxford), ou parfois les deux.

### 5.1. La convention sur la diversité biologique

La Convention sur la Diversité Biologique ([CDB](#)) est un traité international signé au sommet de la Terre de Rio en 1992. Cette convention est ratifiée à ce jour par environ 190 pays, dont la France le 1er juillet 1994. Cette convention vise trois objectifs : la conservation de la biodiversité ; l'utilisation durable des espèces et des milieux naturels ; et le partage juste et équitable des bénéfices issus de l'utilisation des ressources génétiques. Comme tous les traités internationaux, la CDB est n'engage que les États qui l'ont ratifiée. De plus la Conférence des Parties à la CDB jouit d'une légitimité pour se prononcer sur la géo-ingénierie de l'environnement. Elle l'a fait à deux reprises, en 2008 et en 2010.

En mai 2008 à Bonn, la Conférence des Parties à la CDB a demandé un moratoire sur la fertilisation des océans par le fer (Convention sur la Diversité Biologique 2008 alinéa C.4) :

*Compte tenu de l'analyse scientifique et juridique en cours menée en vertu de la Convention de Londres (1972) et du Protocole de Londres de 1996, prie les Parties et exhorte les autres gouvernements, en application des principes de précaution, de s'assurer qu'il n'y aura pas d'activités de fertilisation des océans tant qu'il n'existera pas de fondement scientifique qui justifie de telles activités, y compris l'évaluation des risques associés, et qu'un mécanisme de réglementation et de contrôle efficace, mondial et transparent ne sera pas en place pour ces activités, sauf pour les recherches scientifiques de petite échelle menées dans des eaux côtières. Ces études ne devraient être autorisées que lorsque la nécessité de recueillir des données scientifiques la justifie. Elles doivent faire l'objet d'une évaluation préalable approfondie des risques potentiels des études de recherche sur l'environnement marin, et être strictement contrôlées. Elles ne doivent pas être utilisées pour produire et vendre des contreparties d'émissions de la fixation de carbone ou à toute autre fin commerciale.*

Ce moratoire entravait en particulier les plans d'entreprises comme Planktos à l'époque. Il a conduit le gouvernement allemand à reporter mais non à annuler la mission LOHAFEX (voir section ci-dessus).

En juin 2010 à Nagoya, la Conférence des Parties à la CDB a étendu cette demande de moratoire à l'ensemble des activités de géo-ingénierie (Convention sur la Diversité Biologique 2010 alinéa 8.w et note 3)

*S'assurer, conformément à la décision IX/16 C sur la fertilisation des océans, la diversité biologique et les changements climatiques, et en*

*l'absence de mécanisme réglementaire, de contrôle efficace, transparent, global et à base scientifique pour la géo-ingénierie, et conformément à l'approche de précaution et à l'article 14 de la Convention, qu'aucune activité de géo-ingénierie liée aux changements climatiques n'est entreprise, qui pourrait avoir un impact sur la diversité biologique, tant qu'il n'existe pas de base scientifique adéquate permettant de justifier de telles activités et d'examen approprié des risques associés pour l'environnement et la diversité biologique ainsi que des impacts sociaux, économiques et culturels associés, à l'exception des études de recherches scientifiques à petite échelle qui pourraient être menées dans un environnement contrôlé, conformément à l'article 3 de la Convention, et seulement si elles sont justifiées par le besoin de rassembler des données scientifiques et sont sujettes à une évaluation préalable approfondie des impacts potentiels sur l'environnement ;*

*[note de bas de page :*

*Sans porter préjudice aux futures délibérations sur la définition des activités de géo-ingénierie, étant donné que toute technologie qui réduit délibérément le rayonnement solaire ou augmente la séquestration du carbone de l'atmosphère à grande échelle et qui pourrait affecter la diversité biologique (à l'exclusion de la capture et du stockage du carbone par les carburants fossiles quand le dioxyde de carbone est capturé avant d'être émis dans l'atmosphère) doit être prise en compte comme formes de géo-ingénierie pertinentes pour la Convention sur la diversité biologique jusqu'à ce qu'une définition plus précise soit élaborée. A noter que le rayonnement solaire est défini comme une mesure de l'énergie de la radiation solaire reçue sur une surface donnée, à une heure donnée, et que la séquestration du carbone est définie comme le processus d'augmentation du contenu en carbone d'un réservoir/réserve autre que l'atmosphère. ]*

Cette décision demande donc aux Parties de limiter la géo-ingénierie aux recherches scientifiques à petite échelle, menées dans un environnement contrôlé, scientifiquement justifiées et avec une évaluation préalable des impacts sur l'environnement.

## **5.2. Les principes d'Oxford**

Le programme de recherche de l'Université d'Oxford sur la géo-ingénierie a proposé un jeu de cinq principes (voir tableau) pour guider le développement de ces technologies :

- 
1. Geoengineering to be regulated as a public good
  2. Public participation in geoengineering decision-making
  3. Disclosure of geoengineering research and open publication of results
  4. Independent assessment of impacts
  5. Governance before deployment

*Tableau : Les « principes d'Oxford » sur la géo-ingénierie.*

*Source : Oxford Geoengineering Programme <http://www.geoengineering.ox.ac.uk>*

---

Principe 1 : La géo-ingénierie doit être régulée comme un bien public.

*Il ne s'agit pas d'interdire l'implication du secteur privé dans la provision des techniques de géo-ingénierie. Elle pourrait même être encouragée pour s'assurer qu'une technologie appropriée soit développée et déployée de façon efficace et à temps. Mais la régulation de telles techniques devrait être entreprise dans l'intérêt du public par les institutions appropriées au niveau national et/ou international.*

Ce principe s'oppose par exemple aux expériences privées comme Planktos. Il questionne l'appropriation des technologies de manipulation du climat, qui a déjà commencée avec les prises de brevets (Bronson et al., 2010).

Principe 2 : Participation du public à la prise de décision sur la géo-ingénierie

*Autant que possible, les personnes chargées de la recherche en géo-ingénierie devraient être tenues d'informer, consulter et, idéalement, obtenir le consentement éclairé préalable de ceux qui sont touchés par les activités de recherche. L'identité des parties concernées dépendra de la technique étudiée.*

*Par exemple, une technique qui capte le dioxyde de carbone de l'air et le stocke sous le territoire d'un seul État exigera probablement consultation et accord au niveau national et local, alors que une technique altérant l'albédo de la planète par l'injection d'aérosols dans la stratosphère nécessitera accord global.*

Ce principe pose un style de gouvernement particulier. On peut se demander s'il est universel, mais la question de savoir si la démocratie est la forme d'organisation sociale la plus efficace pour atteindre les objectifs écologiques dépasse largement le cadre de ce rapport.

Principe 3 : Révélation des résultats de la recherche en géo-ingénierie et libre accès aux résultats publiés

*Il devrait y avoir une divulgation complète des plans de recherche et de publication ouverte des résultats afin de faciliter une meilleure compréhension des risques et de rassurer le public quant à l'intégrité du processus. Il est essentiel que les résultats de toutes les recherches, y compris les résultats négatifs, soient rendus publics.*

Ce principe s'oppose à des pratiques qui minent l'intégrité, la crédibilité et l'efficacité de la recherche, mais qui restent malheureusement trop répandues. La recherche privée n'a pas pour habitude de publier tous ses résultats, mais même la recherche publique tend à filtrer les résultats négatifs. La publication dans des supports non-immédiatement accessibles, par exemple des revues d'accès payant, reste encore une barrière dans beaucoup de domaines.

Principe 4 : Évaluation indépendante des impacts

*Une évaluation des impacts de la recherche en géo-ingénierie devrait être menée par un organisme indépendant de ceux qui entreprennent la recherche. Lorsque les techniques sont susceptibles d'avoir un impact transfrontalier, l'évaluation doit être effectuée par le biais des instances régionales et / ou internationales appropriées. Les évaluations doivent traiter à la fois les impacts environnementaux et socio-économiques de la recherche, et aussi de l'atténuation des risques de verrouillage technologiques prématurés et des intérêts acquis.*

La question de l'indépendance se pose particulièrement pour ce style de recherche à grande échelle. On peut penser aux exemples du nucléaire ou du stockage du CO<sub>2</sub>. Les organisations compétentes sont peu nombreuses à l'échelle d'un pays. Il y a de plus une contradiction certaine entre être compétent et ne pas être impliqué dans la recherche sur le domaine.

Principe 5 : La gouvernance avant le déploiement

*Toute décision en matière de déploiement ne doit être prise qu'avec des structures de gouvernance solides déjà en place, en utilisant les règles et les institutions existantes chaque fois que possible.*

### **5.3. Le rapport de la U.K. Royal Society**

Le rapport de la U.K. Royal Society sur l'ingénierie climatique (Shepherd 2009) est un document important dans la reconnaissance institutionnelle de ces technologies. Les résultats principaux sont :

- *La méthode la plus sûre et la plus prévisible pour modérer le changement climatique est de prendre rapidement des mesures efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Aucune méthode de géo-ingénierie ne peut offrir une solution alternative facile ou facilement acceptable au problème du changement climatique. Les méthodes de géo-ingénierie pourraient toutefois être potentiellement utiles à l'avenir pour augmenter des efforts suivis visant à atténuer le changement climatique en réduisant les émissions, et devraient donc faire l'objet de recherches et d'analyses plus détaillées.*
- *La géo-ingénierie du climat de la Terre est très probablement techniquement possible. Toutefois, la technologie pour le faire est à peine formée, et il y a des incertitudes majeures quant à son efficacité, ses coûts et ses impacts environnementaux.*
- *Les méthodes qui agissent rapidement en réfléchissant la lumière du soleil peuvent s'avérer inefficaces pour compenser les changements dans les régimes des précipitations et des tempêtes, et les modèles climatiques actuels ne sont pas suffisamment précis pour fournir une évaluation fiable de ces méthodes au niveau régional. Les méthodes qui agissent en enlevant des gaz à effet de serre de l'atmosphère présentent moins de risques, mais auraient un effet beaucoup plus lent sur la température mondiale. Ces méthodes pourraient éventuellement*

*apporter une contribution importante à l'atténuation du changement climatique.*

- *L'acceptabilité de la géo-ingénierie sera déterminée autant par les questions sociales, juridiques et politiques que par des facteurs scientifiques et techniques. Il y a des problèmes de gouvernance sérieux et complexes qui doivent être résolus pour que la géo-ingénierie puisse devenir un jour une méthode acceptable pour modérer le changement climatique.*
- *Il serait très peu souhaitable que les méthodes de géo-ingénierie qui impliquent des activités ou des effets qui s'étendent au-delà des frontières nationales (autres que la simple capture de gaz à effet de serre dans l'atmosphère) soient déployées avant que les mécanismes de gouvernance appropriés soient en place.*

De plus, ce rapport formule des recommandations clés dont en particulier :

- *Les Parties à la Convention Climat doivent redoubler d'efforts pour atténuer le changement climatique et s'adapter à celui-ci, et en particulier accepter de réduire les émissions mondiales d'au moins 50% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2050 et plus par la suite. Aucune connaissance actuelle sur la géo-ingénierie ne justifie de diminuer ces efforts ;*
- *Les recherches et le développement d'options de géo-ingénierie doivent être entreprises afin de déterminer si des méthodes à faible risque pourraient être mobilisées si nécessaire pour réduire la vitesse de réchauffement global en ce siècle. Cela devrait comprendre un programme d'observations, le développement et l'utilisation de modèles climatiques et des expériences soigneusement planifiées et exécutées.*

Alors que les principes d'Oxford visaient à établir les conditions d'exercice de la recherche, les conclusions du rapport de la Royal Society sont plus politiques, elles visent à atténuer le risque moral « la géo-ingénierie est une excuse pour ne rien faire ». Le rapport a débouché sur une initiative internationale de gouvernance sur la gestion du rayonnement solaire (*SRM Governance Initiative*).

#### **5.4. L'évaluation technologique aux Etats-Unis**

Socolow et al. (2011) ont conduit pour le compte de l'American Physical Society une évaluation des technologies de capture directe de gaz à effet de serre à partir de l'air.

Les conclusions sont les suivantes :

- *La capture directe n'est pas actuellement une approche économiquement viable pour atténuer le changement climatique.*
- *Les sources d'énergie à haute teneur en carbone ne sont pas des options viables pour alimenter les systèmes de capture directe.*
- *Dans une stratégie d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> cohérente, la capture directe n'est pas à déployer avant que presque toutes les grandes sources centralisées de CO<sub>2</sub> n'aient été éliminées à l'échelle mondiale.*
- *La capture directe peut avoir un rôle à jouer dans la lutte contre certaines émissions diffuses, telles que celles des bâtiments et des véhicules.*

- *Les modèles économiques des émissions mondiales de CO2 à l'échelle du siècle qui présentent des trajectoires de concentration en cloche « overshoot » et comptent sur la capture directe devraient être considérés avec une extrême prudence.*
- *Pour que la capture directe soit économiquement viable, le stockage géologique du CO2 doit être peu coûteux et disponible à grande échelle.*
- *Ceci n'apporte aucun crédit aux arguments en faveur d'un délai dans la réponse au changement climatique basés sur la disponibilité de la capture directe comme une stratégie de compensation.*

La négativité du ton tempère l'allant du secteur privé. Comme le rapport de la Royal Society, les orientations sont plus politiques que programmatiques. Les controverses sur le délai dans la réponse au changement climatique sont un débat dépassé dans beaucoup de lieux.

Le rapport de la U.S. Bipartisan Policy Center's Task Force (Long et al., 2011) avait pour but d'apporter un éclairage stratégique consensuel à l'orientation de la recherche sur la géo-ingénierie aux Etats-Unis, en tenant compte des études précédentes (Persons 2011; Socolow et al., 2011; Gordon 2010). Ces travaux étaient justifiés par deux propositions : *Les risques physiques du changement climatique sont réels et croissants ; et les risques de sécurité géopolitiques et nationaux de déploiement de technologies de remédiation climatique par d'autres pays ou des acteurs sont réels.*

En conclusion ce groupe de travail a recommandé que le gouvernement fédéral se lance dans un programme ciblé et systématique de recherche sur la remédiation climatique, afin que le pays dispose des connaissances nécessaires pour :

*Jauger si certaines techniques de remédiation climatique pourraient offrir une réponse significative aux risques du changement climatique,*

*Évaluer les mesures que d'autres pays pourraient être en mesure de prendre, et mener les discussions internationales qui vont probablement émerger autour de ces questions dans les années à venir.*

Le groupe a souligné que la recherche sur la remédiation climatique n'est pas un substitut aux efforts d'atténuation et d'adaptation, et qu'il est beaucoup trop tôt pour envisager le déploiement de n'importe laquelle de ces technologies. La raison principale de la recherche, soutient le rapport, est de veiller à ce que les États-Unis aient la connaissance nécessaire – en sciences physiques et sociales, en sciences humaines, et dans la société civile – pour agir à bon escient si le système climatique passe un seuil critique et des mesures correctives rapides s'avèrent nécessaires. Les membres du groupe de travail ont souligné que la recherche ne suppose pas le déploiement, au contraire un programme de recherche pourrait révéler qu'aucune des techniques proposées ne saurait être déployée sans conséquences collatérales ou risques écrasants. Par ailleurs, le rapport fait valoir que la menace d'action unilatérale par un autre pays est réelle, et que les États-Unis doivent comprendre ces questions afin de participer et mener les discussions internationales, et afin d'évaluer comment les autres nations ou entités privées pourraient agir.

## **5.5. Le programme SPP1689 en Allemagne**

A l'issu d'un processus comparable à l'ARP Réagir, le Sénat de la Fondation allemande pour la recherche (DFG) a mis en place en 2012 le programme de recherche prioritaire (Schwerpunktprogramm 1689) intitulé «Climate Engineering : Risks, Challenges, Opportunities? » (Deutsche Forschungsgemeinschaft / DFG, 2012).

Le programme constate que l'évaluation des technologies doit être multidimensionnelle et couvrir les aspects scientifiques, techniques et sociaux ; les aspects politiques, juridiques et éthiques ; les effets directs et indirects; à court et à long terme ; régionaux et globaux. Il constate que cette multi-dimensionnalité a reçu trop peu d'attention dans la recherche internationale, et exige des projets interdisciplinaires.

Deux axes sont prévus au programme : examen et évaluation des effets potentiels, des incertitudes et évaluation juridique, éthique et acceptabilité publique. Le programme met l'accent sur trois méthodes : (1) la dissémination d'aérosols dans la troposphère ou la stratosphère, (2) l'épandage de corps alcalins dans l'océan, et (3) le reboisement.

## 6. Conclusion

A l'étranger comme pour le projet ARP REAGIR, le terme de géo-ingénierie de l'environnement est problématique car il recouvre une variété de technologies excessivement diverses et à des stades de maturité très différents. Il constitue encore un domaine de recherche unitaire, mais qui tend à se fragmenter. L'intérêt des promoteurs de la capture directe du carbone à partir de l'air et des promoteurs du biochar se détache de plus en plus nettement de l'intérêt des porteurs de recherche sur les aérosols et les océans.

La question de l'accès au terrain comporte un volet social important. Différentes sociétés ont apporté différentes réponses : annulation pour l'expérience anglaise d'injection d'aérosols atmosphériques du projet SPICE en Angleterre, report temporaire pour le projet indien-allemand de fertilisation de l'océan LOHAFEX, autorisation pour les expériences d'injection d'aérosols atmosphériques russes. La Convention sur la Biodiversité pose des conditions dans lesquelles des expériences peuvent être envisagées.

Des projets de recherche spécifiques sur la géo-ingénierie sont déjà en cours dans les pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, les USA. Il y a aussi des projets en Norvège et Finlande dans le cadre de programmes plus généraux sur le climat, des projets européens FP7 comme IMPLICC et EuTRACE, et des actions mondiales comme GEOMIP.

Le secteur privé occupe une place importante dans la structuration de la recherche sur la capture à partir de l'air. Dans les programmes publics, l'accent est mis sur des questions sociales, légales et politiques, ce qui peut conduire à des appels explicitement interdisciplinaires.

## 7. Références

- Barrett, S., 2008. The Incredible Economics of Geoengineering. *Environmental & Resource Economics*, 39(1), p.45-54.
- Bekki, S. et al., 2013. Atelier REAGIR « Géo-ingénierie physique et chimique » Synthèse résumée des contributions. Available at: <http://www.arp-reagir.fr>.
- Bellamy, R. et al., 2012. A review of climate geoengineering appraisals. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(6), p.597–615.
- Belter, C.W. & Seidel, D.J., 2012. Sound and Fury or Science and Fact? A Bibliometric Analysis of Climate Engineering Research. *Submitted to Climatic Change*.
- Bensaude-Vincent, B. et al., 2013. Atelier REAGIR « Définition et attributs de la géo-ingénierie » Synthèse résumée des contributions. Available at: <http://www.arp-reagir.fr>.
- Bodansky, D., 2013. The who, what, and wherefore of geoengineering governance. *Climatic Change*, p.1-13.
- Boyd, P.W. et al., 2007. Mesoscale Iron Enrichment Experiments 1993-2005: Synthesis and Future Directions. *Science*, 315(5812), p.612-617.
- Brahic, C., 2009. Earth's Plan B. *New Scientist*, (2697), p.10.
- Bronson, D., Mooney, P. & Wetter, K.J., 2010. *Retooling the Planet ? Climate Chaos in a Geoengineering Age*, Report prepared by members of the ETC Group ([www.etcgroup.org](http://www.etcgroup.org)) for the Swedish Society for Nature Conservation. Available at: <http://www.etcgroup.org/content/retooling-planet-new-etc-group-report-geoengineering>.
- Buesseler, K.O. et al., 2008. Ocean Iron Fertilization--Moving Forward in a Sea of Uncertainty. *Science*, 319(5860), p.162-162.
- Chen, C. & Tavoni, M., 2013. Direct air capture of CO<sub>2</sub> and climate stabilization: A model based assessment. *Climatic Change*, 118(1), p.59-72.
- Convention sur la Diversité Biologique, 2010. COP 10 Décision X/33 Biodiversity and climate change. Available at: <http://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-10>.
- Convention sur la Diversité Biologique, 2008. COP 9 Décision IX/16 Biodiversity and climate change. Available at: <http://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=11659>.
- Courtland, R., 2008. Planktos dead in the water. *Nature News*. Available at: <http://www.nature.com/news/2008/080215/full/news.2008.604.html> [Consulté le juillet 30, 2013].
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 2012. DFG-Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689). *Information für die Wissenschaft*, (22). Available at: [http://www.dfg.de/foerderung/info\\_wissenschaft/archiv/2012/info\\_wissenschaft\\_12\\_22/index.html](http://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/archiv/2012/info_wissenschaft_12_22/index.html) [Consulté le juillet 31, 2013].
- Dörries, M., 2006. In the public eye: Volcanology and climate change studies in the 20th century. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 37(1), p.87-125.
- Edenhofer, O. et al. éd., 2011. *IPCC Expert Meeting on Geoengineering. Meeting report.*, lima, Peru: IPCC Working Group III Technical Support Unit.
- Fleming, J.R., 2010. *Fixing the sky: the checkered history of weather and climate control*, New York: Columbia University Press.
- Goes, M., Tuana, N. & Keller, K., 2011. The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering. *Climatic Change*, 109(3-4), p.719-744.
- Gordon, B., 2010. *Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination*, U.S. house of representatives, Committee on Science and Technology. Available at: <http://democrats.science.house.gov/committee-report/engineering-climate-research-needs-and-strategies-international-coordination> [Consulté le juillet 31, 2013].
- Govindasamy, B. & Caldeira, K., 2000. Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO<sub>2</sub>-induced climate change. *Geophysical Research Letters*, 27(14), p.2141–2144.
- Gunter, M., 2011. Kilimanjaro Energy - Fortune Tech: Technology blogs, news and analysis from Fortune Magazine. *Fortune*. Available at: <http://tech.fortune.cnn.com> [Consulté le juillet 30, 2013].
- Hale, B. & Dilling, L., 2011. Geoengineering, Ocean Fertilization, and the Problem of Permissible Pollution. *Science, Technology & Human Values*, 36(2), p.190-212.
- Heyward, C., 2013. Situating and Abandoning Geoengineering: A Typology of Five Responses to Dangerous Climate Change. *PS: Political Science & Politics*, 46(01), p.23-27.

- House, K.Z. et al., 2011. Economic and energetic analysis of capturing CO<sub>2</sub> from ambient air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), p.20428-20433.
- Hulme, M., 2012. Climate change Climate engineering through stratospheric aerosol injection. *Progress in Physical Geography*, 36(5), p.694-705.
- Izrael, Y.A. et al., 2011. A field experiment on modeling the impact of aerosol layers on the variability of solar insolation and meteorological characteristics of the surface layer. *Russian Meteorology and Hydrology*, 36(11), p.705-711.
- Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Y.V., Puzov, Y.A., et al., 2009. Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(5), p.265-273.
- Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Y.V., Eran'kov, V.G., et al., 2009. Field studies of a geo-engineering method of maintaining a modern climate with aerosol particles. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(10), p.635-638.
- Izrael, Y.A., Ryaboshapko, A.G. & Petrov, N.N., 2009. Comparative analysis of geo-engineering approaches to climate stabilization. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(6), p.335-347.
- Keith, D., Ha-Duong, M. & Stolaroff, J., 2006. Climate Strategy with CO<sub>2</sub> Capture from the Air. *Climatic Change*, 74(1), p.17-45.
- Keith, D.W., 2000. Geoengineering the climate. History and prospect. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 25, p.245-284.
- Kellog, W.W. & Schneider, S.H., 1974. Climate stabilization: for better or for worse? *Science*, 186(4170), p.1163-1172.
- Kiss, A., 1975. Les modifications artificielles du temps. *Annuaire français de droit international*, (21), p.792-800.
- Kleidon, A., 2010. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. *Physics of Life Reviews*, 7(4), p.424-460.
- Kravitz, B. et al., 2011. The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters*, 12(2), p.162-167.
- Kwa, C., 2001. The Rise and Fall of Weather Modification: Changes in American Attitudes towards Technology, Nature and Society. In *Changing the atmosphere: expert knowledge and environmental governance*. Cambridge, Mass.: MIT Press, p. 135-165.
- Latham, J. et al., 2012. Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1974), p.4217-4262.
- Lempert, R.J. & Prosnitz, D., 2011. Governing Geoengineering Research. Available at: [http://www.rand.org/pubs/technical\\_reports/TR846.html](http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR846.html) [Consulté le juillet 29, 2013].
- Long, J., Rademaker, S. & The bipartisan policy center's Task Force on Climate Remediation Research, 2011. *Geoengineering: A national strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility, and consequences of climate remediation technologies*, Bipartisan Policy Center (BPC). Available at: <http://bipartisanpolicy.org/news/press-releases/2011/10/blue-ribbon-task-force-climate-remediation-releases-report-calling-feder> [Consulté le avril 10, 2013].
- Lovelock, J., 2008. A geophysicist's thoughts on geoengineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), p.3883-3890.
- Lovelock, J.E. & Margulis, L., 1974. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus*, 26(1-2), p.2-10.
- Lukacs, M., 2012. World's biggest geoengineering experiment « violates » UN rules. *the Guardian*. Available at: <http://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering> [Consulté le juillet 30, 2013].
- MacCracken, M.C., 1991. Geoengineering the climate. In UCRL-JC-108014. Workshop on the Engineering Response to Global Climate Change for Chapter 8: Control of Greenhouse Gas Sinks and of Climate. Palm Coast, Florida: LLNL. Available at: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDEQFjAB&url=https%3A%2F%2Freports-ext.llnl.gov%2Fpdf%2F218065.pdf&ei=\\_6\\_vUYXoPNKwhAeg4IH0AQ&usq=AFQjCNG38H8aJGUjxm6tR7teHG\\_oprgD1g&sig2=gRnalhgUF\\_4\\_-YE9VU9FDw&bvm=bv.49641647,d.ZG4](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDEQFjAB&url=https%3A%2F%2Freports-ext.llnl.gov%2Fpdf%2F218065.pdf&ei=_6_vUYXoPNKwhAeg4IH0AQ&usq=AFQjCNG38H8aJGUjxm6tR7teHG_oprgD1g&sig2=gRnalhgUF_4_-YE9VU9FDw&bvm=bv.49641647,d.ZG4).
- MacCracken, M.C., 2006. Geoengineering: Worthy of Cautious Evaluation? *Climatic Change*, 77(3-4), p.235-243.
- Mercer, A.M., Keith, D.W. & Sharp, J.D., 2011. Public understanding of solar radiation management.

- Environmental Research Letters*, 6(4), p.044006.
- Michaelson, J., 1998. Geoengineering: a climate change Manhattan project. *Stanford Environmental Law Journal*. Available at: <http://www.metatronics.net/lit/geo2.html>.
- Mooney, C., 2009. Copenhagen: Geoengineering's Big Break? *Mother Jones*. Available at: <http://www.motherjones.com/environment/2009/12/copenhagen-geoengineerings-big-break> [Consulté le juillet 30, 2013].
- Moore, J.C., Jevrejeva, S. & Grinsted, A., 2010. Efficacy of geoengineering to limit 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(36), p.15699-15703.
- Moreno-Cruz, J.B. & Keith, D.W., 2012. Climate policy under uncertainty: a case for solar geoengineering. *Climatic Change*, p.1-14.
- Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 1992. 28. Geoengineering. In *Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base*. Washington, DC, États-Unis: National Academy Press, p. 433-464. Available at: [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=1605](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=1605) [Consulté le juillet 24, 2013].
- Persons, T.M., 2011. *Technology Assessment: Climate Engineering: Technical Status, Future Directions, and Potential Responses*, Washington, DC: General Accounting Office (GAO). Available at: <http://www.gao.gov/products/GAO-11-71> [Consulté le juillet 31, 2013].
- Pidgeon, N. et al., 2013. Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project. *Nature Climate Change*, 3(5), p.451-457.
- Pielke Jr., R.A., 2009. An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. *Environmental Science & Policy*, 12(3), p.216-225.
- Pongratz, J. et al., 2012. Crop yields in a geoengineered climate. *Nature Climate Change*, 2(2), p.101-105.
- Ricke, K.L., Morgan, M.G. & Allen, M.R., 2010. Regional climate response to solar-radiation management. *Nature Geoscience*, 3(8), p.537-541.
- Robock, A., Oman, L. & Stenchikov, G.L., 2008. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO<sub>2</sub> injections. *Journal of Geophysical Research*, 113(D16). Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JD010050> [Consulté le juillet 25, 2013].
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009. *Scientific Synthesis of the Impacts of Ocean Fertilization on Marine Biodiversity*, Montreal. Available at: <http://www.cbd.int>.
- Shepherd, J.G., 2009. *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, London, UK: The Royal Society.
- Socolow, R. et al., 2011. *Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals. A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs*, American Physical Society.
- SRMGI, *Solar radiation management: the governance of research*, Available at: <http://www.srmgi.org/report/>.
- Stephens, J.C. & Keith, D.W., 2008. Assessing geochemical carbon management. *Climatic Change*, 90(3), p.217-242.
- Teller, E., Wood, L. & Hyde, R., 1997. Global warming and ice ages: I. Prospects for physics-based modulation of global change. In 22nd International Seminar on Planetary Emergencies. Erice (Sicily), Italy. Available at: [http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti\\_id=611779](http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=611779) [Consulté le juillet 24, 2013].
- Temple, J., 2013. Looking to sky to fight climate change. *SFGate*. Available at: <http://www.sfgate.com/science/article/Looking-to-sky-to-fight-climate-change-4170475.php#src=fb> [Consulté le juillet 30, 2013].
- Tilmes, S. et al., 2009. Impact of geoengineered aerosols on the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 114(D12). Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JD011420> [Consulté le juillet 25, 2013].
- Tollefson, J., 2010. Geoengineering faces ban. *Nature News*, 468(7320), p.13-14.
- Wolf, D. et al., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(5), p.1-9.