



Sciences et technologies

GÉO-INGÉNIERIE CLIMATIQUE : DE SCIENCE-FICTION À « TECHNO-FIX »?

Frédéric Bouchard

Professeur

Département de géomatique appliquée

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL)

Université de Sherbrooke

« *Not if, but when* »

« *Non pas si, mais bien quand* »

– *Geoengineering – The Gamble* (2021).

Le 13 novembre 1946, à 4 000 mètres d'altitude au-dessus de la frontière entre l'État de New York et le Massachusetts, une drôle d'expérience scientifique a lieu : un pilote du laboratoire de recherche de la General Electric, accompagné d'un météorologue-chimiste, libère quelques livres de glace sèche — du CO₂ solide — dans les nuages. L'opération semble suivie d'une chute de neige dans les minutes qui suivent. Il s'agirait ici de la toute première tentative sérieuse, documentée, de modification intentionnelle de la météo par l'être humain (Fleming, 2010).

La plus récente version de cette ambition « prométhéenne » de contrôler la nature, y compris le ciel et les phénomènes qui s'y déroulent, porte aujourd'hui le nom de « géo-ingénierie » ou « ingénierie climatique » [voir l'encadré et Figure 1]. Il s'agit de modifier délibérément le fonctionnement du climat à l'échelle planétaire afin de lutter contre les effets les plus néfastes des changements climatiques — canicules, sécheresses, ouragans, etc. Une sorte de « plan B » face à l'échec de nos ambitions de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre (GES). Aboutissement d'un demi-siècle de recherche, la géo-ingénierie mobilise aujourd'hui non seulement la communauté scientifique, mais également les instances décideuses, la société civile et l'entreprise privée. Ce qui apparaissait comme de la science-fiction il y a quelques décennies prend maintenant la forme de nombreux projets-pilotes proposés par des entreprises émergentes d'ici et d'ailleurs... non sans questionnements de nature éthique, juridique ou géopolitique (Hamilton, 2013 ; Pamplany et al., 2020). Selon certaines personnes, il ne s'agirait plus de savoir si, mais bien quand on se lancera dans la modification délibérée du climat (Wagner, 2021). Cet article propose de présenter la géo-ingénierie dans son contexte historique, pour ensuite mettre en lumière quelques exemples de projets récents, afin de conclure sur certains des enjeux majeurs soulevés.

Une brève histoire de la modification du climat

Ce n'est pas d'hier : les activités humaines modifient la chimie atmosphérique, particulièrement la concentration en GES, comme le CO₂ et le CH₄. Selon les sources, cette influence pourrait dater de plusieurs millénaires, à partir de l'avènement de l'agriculture et de la domestication animale, à quelques décennies seulement, avec la « Grande accélération » du milieu du 20^e siècle, en passant par la Révolution industrielle du 18^e siècle (Zalasiewicz et al., 2021). Cette question est à la base même de la définition de l'époque géologique de l'Anthropocène, où l'activité humaine est désormais considérée comme un agent planétaire de changements environnementaux. On ne peut pas dire toutefois que cette incidence climatique soit intentionnelle, planifiée ou concertée. Pour en arriver à une telle conclusion, il faudrait remonter dans le passé...

ENCADRÉ 1 : LES TYPES D'INTERVENTION

On regroupe les mesures associées à la géo-ingénierie en deux catégories qui diffèrent nettement par leurs objectifs, leur maturité technologique et les enjeux soulevés : la modification du rayonnement solaire (Solar Radiation Modification, SRM), qui vise à réfléchir partiellement ce rayonnement pour freiner l'augmentation des températures ; et le retrait du dioxyde de carbone (Carbon Dioxide Removal, CDR) et son stockage à long terme. Les méthodes de SRM comprennent plusieurs techniques de modification de l'albédo planétaire, comme l'injection d'aérosols (généralement du SO₂). En ce qui concerne les approches de CDR, elles comprennent, par exemple, les méthodes de reforestation/ d'afforestation, la capture directe du CO₂ dans l'air, sa séquestration dans les fonds marins ou les roches, ou encore la fertilisation des océans par l'ajout de fer.

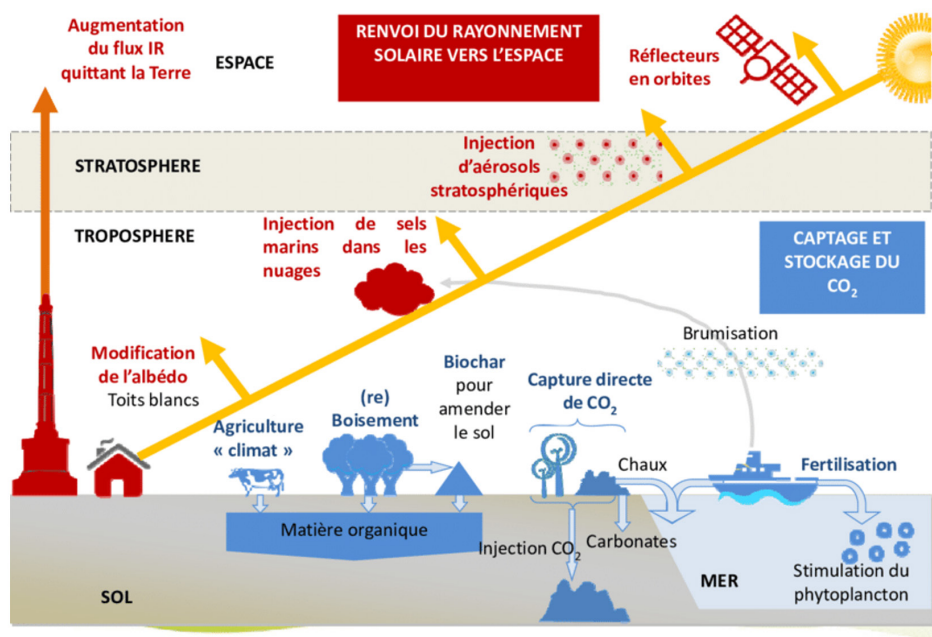


Figure 1. Les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. Cette figure illustre des exemples d'initiatives de géo-ingénierie, qui comprennent la modification du rayonnement solaire (SRM, en rouge) et le retrait du dioxyde de carbone (CDR, en bleu). Source (modifié de) : Boucher et al., 2014

PREMIÈRES SALVES

Les premières tentatives délibérées de modification du temps qu'il fait, du moins en contexte nord-américain, dateraient du début du 19^e siècle (Fleming, 2010). Dans les années 1830, James Espy, premier météorologue officiel du gouvernement américain, propose de brûler des centaines d'hectares de forêts sur plus de 1 000 km le long des Appalaches. Selon lui, la fumée et les poussières libérées, en s'élevant dans l'atmosphère, favoriseraient la formation de nuages et, par conséquent, des précipitations associées. Comme aujourd'hui, la météo intéressait le grand public : grand orateur-vulgarisateur, Espy était surnommé le « Roi de la tempête » (*Storm King*). L'idée allait perdurer pendant la guerre de Sécession américaine (1861-1865) : n'y avait-il pas systématiquement une averse après les nombreux coups de canon d'une bataille prolongée? Les décennies suivantes ont été marquées par les « faiseurs de pluie » (*Rainmakers*) sur le monde agricole américain, surtout durant l'épisode du *Dust Bowl* (sécheresse sévère et tempêtes de poussière) des années 1930 dans les États du Midwest.

GUERRE FROIDE... ET HUMIDE

Une nouvelle phase de cette météorologie expérimentale s'amorce juste avant, pendant et après la Seconde Guerre mondiale, avec l'ensemencement direct des nuages et la dispersion du brouillard, grâce à l'aviation militaire en plein développement. Si l'Union soviétique avait déjà son Institut de « *Rainmaking* » (pluie artificielle) de Leningrad depuis les années 1930, les forces alliées avaient de leur côté le système antibrouillard FIDO (*Fog Investigation and Dispersal Operation*). Comme mentionné en introduction, la compagnie *General Electric* allait par ailleurs jouer un rôle central dans l'ensemencement des nuages au début de la Guerre froide (Fleming, 2010). Au milieu du 20^e siècle, Dwight Eisenhower met sur pied le Comité consultatif scientifique du président (CCSP) en réponse au lancement des satellites soviétiques Sputnik. À la même époque, l'établissement par le Congrès américain du Comité consultatif sur le contrôle de la météorologie témoigne de l'importance accordée à ce domaine émergent dans les sphères politiques. Le CCSP présentera en 1965 un rapport au président Johnson, qui mentionnera pour la première fois la possibilité de modifier intentionnellement l'albédo terrestre en injectant des particules atmosphériques réfléchissantes afin de refroidir le climat (Keith, 2000). Notons que malgré les premiers travaux montrant déjà à cette époque, chiffres à l'appui, les liens entre l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ et un potentiel réchauffement, le rapport de 1965 ne propose nulle part l'idée de réduire les émissions mondiales de CO₂.

La décennie qui suit est marquée par l'intervention militaire américaine au Vietnam, ce qui se traduit entre autres par l'utilisation de techniques d'ensemencement des nuages afin de prolonger la mousson, rendant les routes de ravitaillement locales impraticables. Cette « opération Popeye » soulève l'indignation internationale et mène à la signature d'une convention pour interdire l'usage de la modification du climat à des fins militaires (*Environmental Modification Convention* ou ENMOD), entrée en vigueur en 1978 (Fleming, 2010).

LA SCIENCE S'EN MÊLE

La première mention du terme géo-ingénierie (*geoengineering*) dans la littérature scientifique semble provenir d'un article de 1977 paru dans la revue *Climatic Change* : on y propose de disposer d'une partie du CO₂ atmosphérique en le captant à la source et en l'injectant dans le fond des océans, particulièrement grâce aux branches descendantes de la circulation thermohaline mondiale (Marchetti, 1977). Parallèlement, on publie les premières estimations concernant la quantité d'aérosols théoriquement nécessaire pour modifier volontairement le rayonnement solaire planétaire. La fin du 20^e siècle est marquée par les premières modélisations informatiques des différentes approches de la géo-ingénierie. Le domaine reste toutefois encore marginal, avec la plupart des publications provenant de quelques groupes de recherche ou laboratoires américains. Un certain scepticisme semble toucher le reste de la communauté scientifique, en particulier les chercheurs et chercheuses en sciences humaines et sociales, qui n'hésitent pas à dénoncer ces « apprentis sorciers du climat » (Hamilton, 2013). Les marques laissées par l'intervention américaine au Vietnam (ex. ENMOD) seront perceptibles pendant quelques décennies encore.

Le tabou est levé, en quelque sorte, par la publication, en 2006, d'un essai du renommé Paul Crutzen, codétenteur du prix Nobel de chimie pour son rôle dans l'étude du « trou » de la couche d'ozone et l'un des premiers à avoir popularisé le concept d'« Anthropocène ». Dans son article, Crutzen avance l'idée de recréer artificiellement l'effet refroidissant des grandes éruptions volcaniques en injectant dans la stratosphère du soufre sous forme de SO₂ (Crutzen, 2006). Citant précisément l'exemple de l'éruption du Pinatubo aux Philippines en 1991, qui avait provoqué un refroidissement planétaire de presque un demi-degré Celsius l'année suivante, Crutzen propose ainsi d'ajouter annuellement quelques millions de tonnes de SO₂ afin de réfléchir davantage le rayonnement solaire et ainsi de disposer d'un « thermostat planétaire ».

Au cours des dernières années, plusieurs organisations et académies scientifiques ont senti le besoin d'examiner de façon rigoureuse et systématique les fondements scientifiques, les bénéfices potentiels et les risques associés à l'ingénierie climatique. L'Union géophysique américaine (AGU), plutôt favorable, a publié en 2024 un cadre éthique inspiré des principes ayant guidé la recherche sur des sujets controversés, comme les armes atomiques ou le clonage humain. De son côté, l'Académie des sciences de l'Institut de France semble plus réservée à l'égard de ces approches :

« Il apparaît que, à quelques exceptions près, aucune [de ces mesures] ne peut aujourd'hui être déployée à grande échelle sans faire peser des risques importants en raison d'incertitudes majeures sur le plan scientifique, environnemental et géopolitique. »

[Académie des sciences, 2025].

Pourtant, des acteurs de la sphère privée se sont déjà lancés dans la modification intentionnelle du climat, malgré l'absence d'approbation claire et unanime de la communauté scientifique.

Quelques exemples d'ici

Parmi les projets au cœur de la géo-ingénierie de type CDR, on peut mentionner l'initiative de capture directe et de stockage du carbone par minéralisation *in situ* dans les environs de Thetford Mines et Bécancour réalisée par

Deep Sky (Figure 2). L'idée est de capter le CO_2 de l'air ambiant à l'aide d'aspirateurs/ventilateurs et de filtres spécialement conçus pour l'isoler; puis de le dissoudre dans l'eau – obtenant ainsi de l'acide carbonique (H_2CO_3), un peu comme dans les boissons gazeuses; et enfin de l'injecter en profondeur (> 500 m sous la surface) dans le socle rocheux. Dans la région, la roche – longtemps exploitée pour l'amiante chrysotile – est relativement riche en calcium et en magnésium; sa réaction avec l'acide carbonique forme des roches carbonatées, ou carbonates de calcium (CaCO_3) et de magnésium (MgCO_3). Résultat : pour chaque molécule de carbonate produite, un atome de carbone — autrefois présent dans une molécule de CO_2 — a été extrait de l'atmosphère. À terme, *Deep Sky* compte extraire environ 500 000 tonnes de CO_2 par an. Dans son avis de 2025, le Comité consultatif sur les changements climatiques a d'ailleurs recommandé au gouvernement québécois d'intégrer la séquestration géologique du carbone à sa stratégie climatique.

Un autre projet-pilote est en cours de développement dans l'Arctique canadien : *Real Ice*. Ce projet vise à épaissir et à éclaircir la banquise arctique en pompant de l'eau de mer à sa surface durant l'hiver (Figure 3). L'idée est donc d'intervenir afin de ralentir la perte graduelle et soutenue (rétrécissement et amincissement) de la glace de mer dans l'océan Arctique au cours des dernières décennies, qui pourrait bientôt mener à sa disparition durant l'été. Une démonstration a eu lieu durant l'hiver 2024-2025 près de Cambridge Bay (Iqaluktuuttiaq), au Nunavut, dans le passage du Nord-Ouest. Une dizaine de sites ont été inondés à différents moments durant

MINÉRALISATION DE CO_2 *IN-SITU*

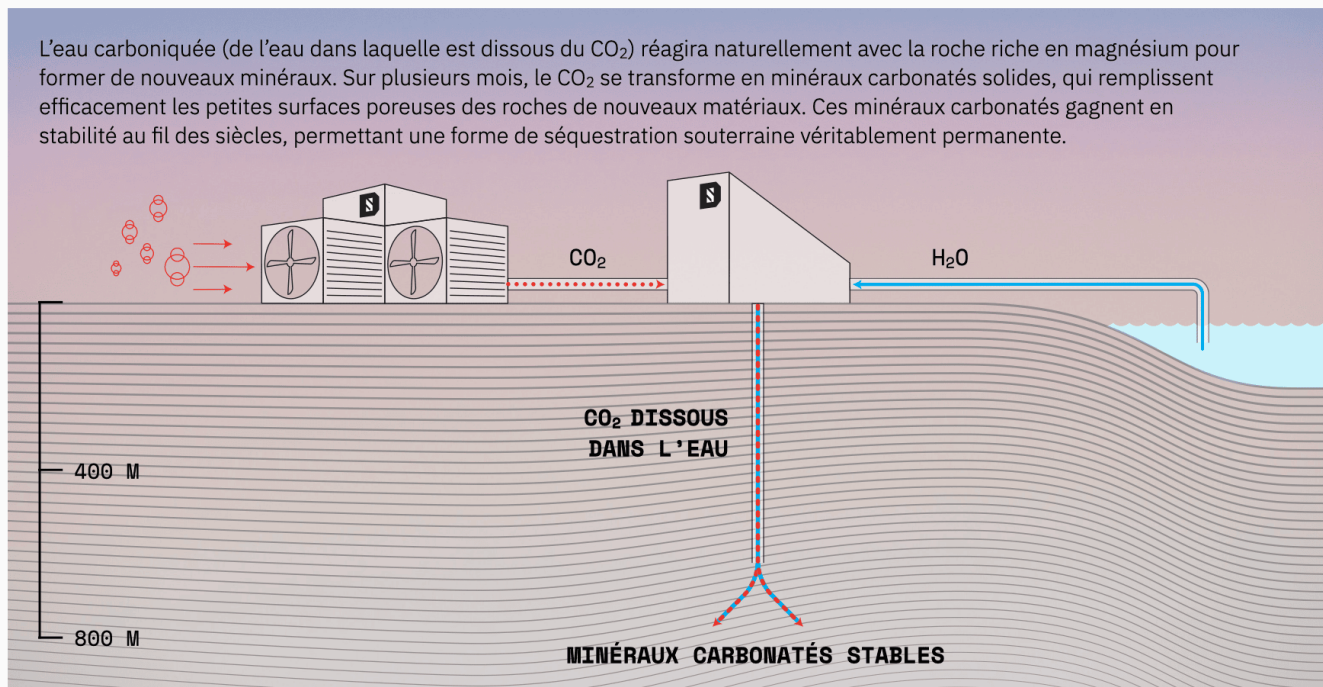


Figure 2. Fonctionnement de la capture directe et du stockage géologique du carbone par minéralisation *in situ*. Figure fournie gracieusement par Deep Sky, tous droits réservés.

l'hiver. Au total, environ 30 000 m³ d'eau de mer ont été pompés sur une surface totale de 0,25 km². Les résultats semblent démontrer un épaississement de la glace allant jusqu'à plus de 30 cm, en plus d'une augmentation de l'albédo (réflectivité) de 20 à 30 %. On avance qu'à ce rythme, l'intervention pourrait permettre de ralentir la fonte printanière et ainsi prolonger la période de glace de quelques jours. Il s'agit toutefois d'une intervention à refaire chaque année. L'initiative *Real Ice* fait d'ailleurs partie d'un ensemble de mesures de géo-ingénierie proposées afin de limiter la fonte de la cryosphère arctique, allant de l'ajout de neige artificielle au contrôle du déplacement des icebergs.

Des projets novateurs... mais encore controversés

Modifier intentionnellement le climat terrestre, autrement dit jouer avec le « thermostat planétaire » ; voilà qui divise profondément la communauté scientifique. Un clan — appelons-les les « pragmatiques » — plaide en faveur de la nécessité d'au moins avancer notre connaissance fondamentale sur le sujet, dans un contexte où nos émissions de GES n'ont cessé d'augmenter depuis qu'on sait qu'il faut au contraire les diminuer. Un autre clan — appelons-les les « critiques » — nous rappelle que les « faiseurs de pluie » (*Rainmakers*) vendent des solutions technologiques faciles depuis plus de deux siècles, avec des résultats

pour le moins discutables. Ce serait la vieille obsession humaine de contrôler la nature, dont la version atomique du 20^e siècle nous a fait entrer dans l'Anthropocène. Le 21^e siècle sera-t-il celui de la gestion du climat planétaire ? On rappelle à juste titre que le système climatique terrestre, si on le modélise de mieux en mieux, nous cache encore des incertitudes : quelles seraient les conséquences, pour les écosystèmes et les populations, d'un déploiement non réfléchi de la géo-ingénierie avec des conséquences imprévues ?

D'autres questions tout aussi légitimes se posent, sans réponse claire pour l'instant : qu'en est-il de la gouvernance de ces interventions, surtout celles liées à la modification du rayonnement solaire (SRM) ou des précipitations régionales ? Qui déciderait des moyens à prendre ? Quand et où ? Par exemple, si un pays comme la Chine, qui a les moyens d'injecter des aérosols et autres particules « pluviogènes » dans l'atmosphère, décidait d'aller de l'avant pour améliorer la météo dans une région, que se passerait-il dans les pays ou régions limitrophes ? Si « rien ne se perd, rien ne se crée », d'éventuels surplus d'eau provoqués à un endroit entraîneront forcément une pénurie à un autre endroit. Sans compter le danger de s'appuyer sur une solution technologique facile — un « *techno-fix* » — pour répondre à un défi environnemental qui est loin d'être facile et simple. C'est là où la géo-ingénierie solaire (SRM) se distingue nettement du captage du CO₂ (CDR) : elle propose de masquer les symptômes apparents sans traiter le fond du problème. Si on en venait à déployer ce genre d'intervention de « refroidissement artificiel »



Figure 3. Inondation artificielle au-dessus de la banquise près de Cambridge Bay (Nunavut), afin d'augmenter son épaisseur et sa réflectivité. Photo tirée du site de *Real Ice* <https://www.realice.eco/>

à grande échelle sans réduire nos émissions, et que dans quelques décennies on devait cesser ces activités (ex. conflit armé), il est assez facile d'imaginer le réchauffement brutal qui en résulterait.

Quoi qu'il en soit, le GIEC a commencé à étudier les méthodes de géo-ingénierie depuis sa cinquième édition de rapports d'évaluation (2013-2014). Un rapport dédié au captage et à la séquestration de carbone est prévu pour la fin 2027 en appui aux efforts d'inventaires nationaux. Qu'on soit pour ou contre, les initiatives associées à la géo-ingénierie sont appelées à faire partie des efforts de recherche et de l'actualité climatique mondiale.

RÉFÉRENCES

Académie des sciences. (2025). Institut de France. *Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives.*

Boucher, O., de Guillebon, B., Abbadie, L., Barré, P., Bekki, S., Bensaude-Vincent, B., Blain, S., Bonnelle, D., Ciais, P., Clin, F., Dahan, A., Dangeard, M.-L., Kiesgen de Richter, R., Dörries, M., Dumergues, L., Fisset, B., Gasser, T., Gemenne, F., Godin-Beekmann, S., et Vidalenc, E. (2014). *Atelier de Réflexion Prospective REAGIR Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement* [Rapport final].

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

Fleming, J. R. (2010). *Fixing the Sky. The Checkered History of Weather and Climate Control.* Columbia University Press.

Hamilton, C. (2013). *Les Apprentis sorciers du climat : raisons et déraisons de la géo-ingénierie.* Éditions du Seuil, Collection Anthropocène.

Keith, D. (2000). Geoengineering the Climate: History and Prospect. *Annual Review of Environment and Resources*, 25: 245-284. doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.245

Marchetti, C. (1977). On geoengineering and the CO2 problem. *Climatic Change*, 1: 59-68. doi: 10.1007/BF00162777

Pamplany, A., Gordijn, B. et Brereton, P. (2020) The Ethics of Geoengineering: A Literature Review. *Science and Engineering Ethics*, 26: 3069-3119. doi: 10.1007/s11948-020-00258-6

Wagner, G. (2021). *Geoengineering – The Gamble.* Polity.

Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ellis, E. C., Head, M. J., Vidas, D., Steffen, W., Thomas, J. A., Horn, E., Summerhayes, C. P., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Gatuszka, A., Williams, M., Barnosky, A. D., Richter, D. de B., Gibbard, P. L., Syvitski, J., Jeandel, C., Cearreta, A. et Zinke, J. (2021). The Anthropocene: Comparing Its Meaning in Geology (Chronostratigraphy) with Conceptual Approaches Arising in Other Disciplines. *Earth's Future*, 9(3): e2020EF001896.



© Auteur(s), 2026. [Le Climatoscope dispose d'une licence non exclusive de publication et de diffusion. Article publié sous licence CC BY 4.0.](#)

