L'article ci-dessous présente un panorama des technologies visant à réduire les impacts sur le climat des émissions excessives de gaz à effet de serre, technologies qui ont leurs limites et qui posent leurs propres problèmes. Les avis concernant les motivations des recherches qui sont passées en revue dans l'article n'engagent que les auteurs.

Géo-ingénierie climatique : comment et avec quelles conséquences ?

François-Marie Bréon (breon@lsce.ipsl.fr) et **Sophie Szopa** (sophie.szopa@lsce.ipsl.fr)
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-CNRS-UVSQ), Orme des Merisiers, Bâtiment 714, 91190 Saint-Aubin

Devant la difficulté des politiques publiques à faire diminuer les émissions de gaz à effet de serre et l'amplification du réchauffement climatique et ses impacts associés, certains poussent à la mise en place de mesures de géo-ingénierie, qui visent à réduire les impacts du changement climatique par des modifications du système climatique à grande échelle. Pourtant, ces mesures ne sont pas sans effets indésirables, et des promesses inconsidérées sur leur potentiel pourraient ralentir la mise en place des réductions d'émissions.

Le changement climatique en cours a d'ores et déjà des impacts graves et généralisés sur nos sociétés et sur les écosystèmes, de plus son renforcement à venir est reconnu comme étant une menace majeure pour les prochaines décennies. Des scientifiques alertent depuis les années 1950 sur les risques associés à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en particulier celle du dioxyde de carbone (CO_2) issue de la combustion des énergies fossiles. Ces alertes ont conduit à la création du GIEC en 1988. Dès 1997, les États se sont engagés à réduire leurs émissions de CO_2 dans le cadre du protocole de Kyoto. Avec l'accord de Paris, en 2015, les États se sont engagés à limiter les émissions pour que le réchauffement climatique en moyenne mondiale ne dépasse pas 2°C par rapport à la période préindustrielle, avec l'objectif de rester à proximité de 1,5°C. Pour cela, il est nécessaire de diminuer rapidement les émissions et de tendre vers un flux net nul de CO_2 permettant de stabiliser la température au niveau de réchauffement déjà atteint. Pourtant, les émissions continuent de croitre et il n'y a pas de concrétisation des projets permettant d'extraire le CO_2 atmosphérique.

En complément de la nécessaire diminution des émissions de gaz à effet de serre qui passe en particulier par une sortie des énergies fossiles, des méthodes pour limiter le réchauffement climatique sont envisagées : la géo-ingénierie climatique regroupe l'ensemble des techniques qui visent à modifier le système climatique de la Terre à grande échelle. Deux grandes familles de techniques sont considérées.

Les premières visent à extraire le CO_2 atmosphérique pour réduire ou limiter la croissance de sa concentration. Elles sont appelées CDR (*Carbon Dioxyde Removal*) ou « émissions négatives ». Elles tentent de contrebalancer la cause du changement climatique en cours.

Les secondes visent à réduire l'apport d'énergie du Soleil à la surface de la Terre pour compenser l'augmentation de l'énergie infrarouge en lien avec la croissance des gaz à effet de serre. On parle alors de SRM (*Solar Radiation Management*) ou « modification du rayonnement solaire ». Elles visent à agir sur la conséquence de l'augmentation de l'effet de serre.

Les premières sont indispensables à la stabilisation de la température tandis que les secondes sont présentées comme une alternative ou un complément aux politiques de réduction des émissions, nécessaire pour maintenir la température au-dessous de certains seuils et limiter les impacts les plus graves. Les différentes techniques posent des problèmes de faisabilité à grande échelle et de risques qu'il est nécessaire d'avoir à l'esprit. Ceci d'autant plus qu'elles sont également mises en avant comme solutions par des acteurs dont l'intérêt est de freiner la décarbonation du système énergétique et de nos sociétés.

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683040

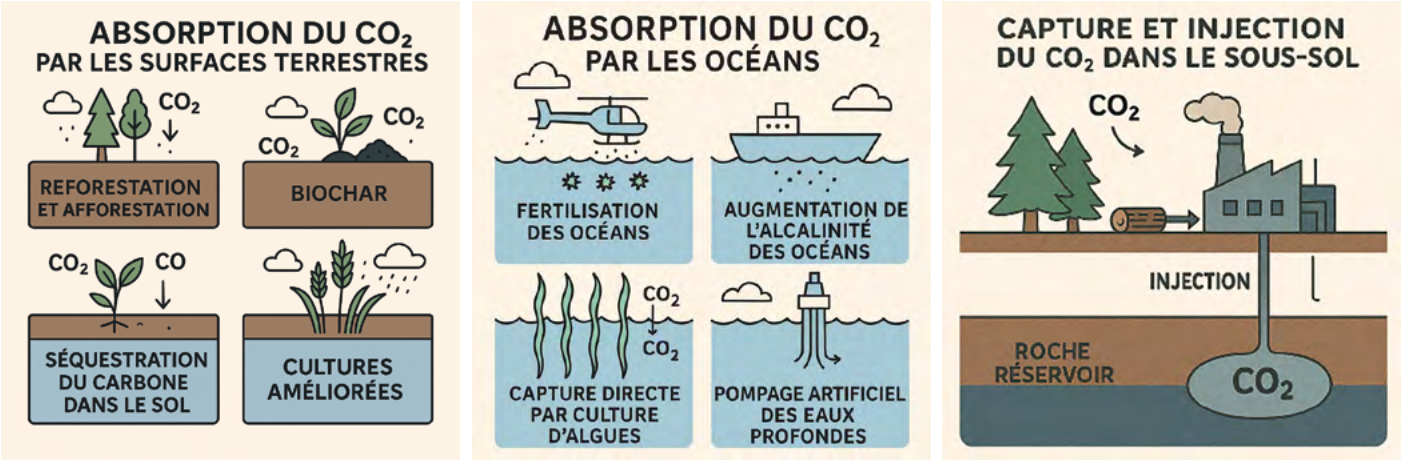

Illustration des méthodes envisagées pour extraire du CO_2 de l'atmosphère. À gauche, les méthodes basées sur les écosystèmes terrestres ; au centre celles qui visent à augmenter la pompe océanique de carbone ; à droite l'injection du CO_2 dans le sous-sol.

Les émissions négatives

Actuellement, les écosystèmes terrestres et les océans absorbent environ 20 milliards de tonnes de CO_2 ($GtCO_2$) chaque année, soit la moitié des 40 $GtCO_2$ émises par les activités humaines. Ces puits de carbone sont naturels, dans le sens où ils ne découlent pas d'une intervention délibérée des humains, mais, néanmoins, ils existent en raison de la hausse des concentrations atmosphériques et sont donc bien une conséquence des activités humaines. Une première famille de méthodes permettant de générer des émissions négatives s'appuie sur cette capacité de la biosphère à capter du carbone. Ainsi, il est suggéré de planter des forêts soit dans des zones qui ont été déforestées dans le passé (reforestation), soit dans des zones où la forêt n'existe pas naturellement (afforestation). La reforestation est limitée par l'espace disponible et la concurrence de l'agriculture. Par ailleurs, elle est vulnérable aux conséquences du changement climatique telles que les sècheresses et les conditions propices aux feux. L'afforestation peut engendrer la destruction de certains écosystèmes (notamment les écosystèmes de savane) et impacter les peuples autochtones qui en dépendent. La seconde méthode envisagée est la culture de biocarburants avec une récupération du CO_2 lors de leur combustion et un stockage définitif de celui-ci (décrit plus loin). Cette méthode est là encore limitée par les surfaces disponibles et la compétition avec la production alimentaire, la ressource en eau et la préservation de la biodiversité. Elle fait également peser un risque pour les populations dans les régions où le droit foncier est déficient.

D'autres possibilités, aux niveaux de maturité variables, sont mises en avant. Certaines pratiques agricoles peuvent favoriser le stockage du carbone dans le sol (enherbement des vergers, agroforesterie des prairies et cultures). Un autre procédé, plus interventionniste fait appel au biochar, un charbon végétal obtenu par pyrolyse de la biomasse (résidus agricoles, déchets verts, bois, etc.) en l'absence d'oxygène. Ce biochar est une solution peu technologique qui permet de stocker du carbone de manière stable mais sa production émet des particules polluantes. Il peut être dispersé dans les forêts ou les terrains agricoles avec comme cobénéfice une amélioration de la fertilité des sols. Ces différentes solutions permettraient, selon les estimations, de stocker quelques $GtCO_2$ par an mais leur pérennité est sujette à des perturbations humaines ou naturelles.

De même, plusieurs méthodes ont été proposées pour accroitre le flux de carbone en direction des océans. La plus connue est la fertilisation océanique qui consiste à ajouter des nutriments, comme le fer, dans certaines zones océaniques pour stimuler la croissance du phytoplancton, des micro-organismes photosynthétiques qui absorbent le CO_2. Lorsque ces micro-organismes meurent, une partie de leur carbone organique peut couler vers les profondeurs. Cette technologie, déployée à grande échelle, pourrait avoir un impact fort sur la disponibilité des nutriments et de l'oxygène nécessaires au fonctionnement des écosystèmes naturels ainsi que sur l'acidification des eaux profondes. Les effets à long terme sur les écosystèmes marins restent mal connus, et les bénéfices climatiques sont difficiles à quantifier avec certitude. Une autre voie est l'alcalinisation des océans, qui vise à augmenter leur capacité d'absorption du CO_2 en y ajoutant des minéraux basiques broyés, comme de l'olivine ou de la chaux. Ces substances réagissent chimiquement avec le CO_2 dissous, le transformant en bicarbonates stables. Cette méthode pourrait théoriquement stocker jusqu'à 100 $GtCO_2$ /an, mais elle nécessite l'extraction, le broyage et le transport de grandes quantités de roche, avec des impacts sur le vivant dans l'océan et sur la production alimentaire qui pourraient être très graves. D'autres méthodes, telles que la culture (et l'extraction) d'algues en milieu côtier ou un pompage des eaux profondes vers la surface favorisant la productivité marine, ont été proposées mais sont beaucoup moins étudiées et ont donc un niveau de maturité encore plus faible.

Certaines des méthodes visant à augmenter le stockage du carbone par les systèmes naturels sont qualifiées de « méthodes fondées sur la nature » lorsqu'elles apportent un bénéfice pour la biodiversité et le bien-être humain. La restauration de certains espaces naturels comme les mangroves ou tourbières, la gestion raisonnée des forêts ou les infrastructures vertes dans les villes en font partie, mais ce terme est à utiliser avec précaution tant les bénéfices dépendent du contexte de déploiement.

>>>

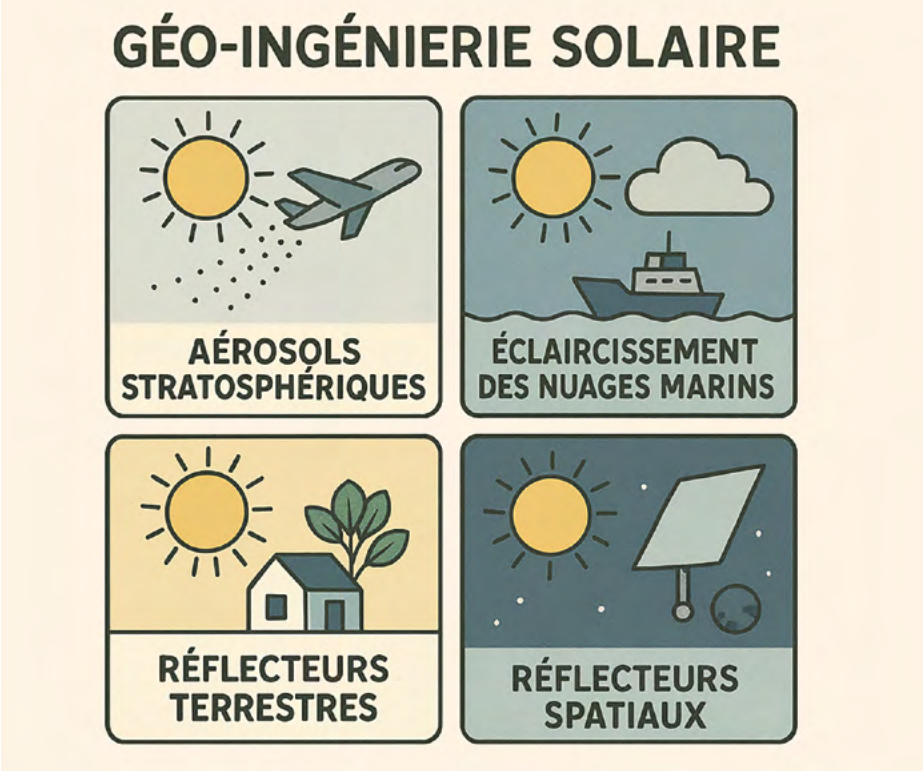

Illustration des méthodes envisagées pour limiter le rayonnement solaire absorbé par la Terre. La solution envisagée en bas à droite, dont la maturité technologique est très faible, vise à interposer des écrans entre le soleil et la Terre. Pour les autres, l'objectif est d'augmenter l'albédo des surfaces, de l'atmosphère claire ou des nuages.

>>>

Enfin, il est envisagé d'extraire le CO_2 de l'air directement (on parle alors de *Direct Air Capture*) pour l'utiliser ou l'injecter dans le sous-sol sur des sites géologiques spécifiques. La faible concentration de CO_2 dans l'atmosphère conduit à des besoins en énergie et en eau importants. De plus, le modèle économique est difficile à concevoir. Le CO_2 récupéré directement dans l'air ou par filtration en sortie de chambre de combustion doit être stocké durablement. Pour que le bilan net soit bien une extraction du CO_2 de l'atmosphère, il faut que le combustible soit de la biomasse dont la croissance a extrait du carbone de l'atmosphère, et non du gaz ou du charbon.

Cependant, la filtration et le stockage sont également mises en avant pour des procédés industriels fortement émetteurs de CO_2 (p.e. les cimenteries) et par les centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles, non pas dans le but d'émissions négatives mais d'atténuation de leurs émissions. Il ne s'agit alors pas, à proprement parler, de géo-ingénierie. Cette technologie n'est pas encore développée à une échelle significative dans le secteur de l'électricité ni dans la production de ciment et de produits chimiques, où elle est pourtant une option d'atténuation essentielle. La capacité mondiale géologique de stockage du CO_2 (anciens réservoirs fossiles mais surtout aquifères salins profonds) est de l'ordre de 1000 $GtCO_2$, ce qui est supérieur aux besoins de stockage du CO_2 jusqu'en 2100 pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C, mais la disponibilité régionale du stockage géologique est très hétérogène ce qui pose des questions d'acheminement du CO_2 qui augmenteront fortement le cout de cette technologie. Si les technologies nécessaires pour transporter, comprimer, et enfouir le CO_2 de manière stable sont bien maitrisées, le cout de ces technologies est très élevé. Même lorsque le CO_2 est en forte concentration, ce qui favorise son extraction, la séparation, chimique ou thermodynamique, est complexe, requiert des procédés chimiques et induit donc de la pollution mais surtout nécessite de grandes quantités d'eau et d'énergie. La maturité de ces technologies est bonne ; la difficulté est dans la mise à l'échelle pour passer des quelques dizaines de millions de tonnes par an à des milliards de tonnes, avec les besoins énergétiques, financiers et logistiques associés. Actuellement, l'injection de CO_2 dans le sous-sol génère un puits de 50 Mt CO_2 par an et les projets en cours de mise en œuvre pourraient atteindre 0,425 $GtCO_2$/an d'ici 2030, ce qui est à mettre en regard des 40 $GtCO_2$ émises par an. Ces technologies ayant un cout très élevé, elles demandent des investissements initiaux et ne pourront être déployées que plus lentement que les réductions d'émissions.

L'utilisation du CO_2 comme matière première est également envisagée avec un potentiel qui pourrait atteindre 20 $GtCO_2$/an. Le temps de séquestration de ce CO_2 dépend directement des usages qui en seront faits (siècle dans le cas du ciment, décennies dans celui du plastique, quelques jours dans celui d'un combustible) et nombre de ces applications sont à l'état de prototype.

La modification du rayonnement solaire

Plusieurs méthodes ont été proposées pour réduire le rayonnement solaire absorbé à la surface de la Terre. Dans cet objectif, elles augmenteraient le pouvoir réfléchissant de la Terre (son albédo) via les aérosols, les nuages ou les surfaces.

La méthode la plus étudiée est l'injection d'aérosols dans la stratosphère. Elle s'inspire des éruptions volcaniques majeures, comme celle du Pinatubo en 1991, qui ont temporairement refroidi le climat mondial. Il s'agirait de diffuser dans la haute atmosphère (à environ 20 km d'altitude) des particules réfléchissantes ou leur précurseur, comme du dioxyde de soufre, qui formeraient un voile d'aérosols capable de réduire légèrement l'ensoleillement à la surface. Cette technique pourrait abaisser la température moyenne mondiale de plusieurs dixièmes de degré. On pourrait alors limiter le *réchauffement* climatique mais, ce faisant, on pourrait engendrer d'autres *changements* climatiques. En effet, cela modifierait la distribution du rayonnement solaire et engendrerait une modification de la circulation atmosphérique et du fonctionnement du cycle hydrologique avec par exemple pour conséquence une réduction de l'intensité des moussons. Par ailleurs, la réduction du rayonnement solaire aurait un impact sur la photosynthèse et donc sur les puits de

carbone, le vivant et la production alimentaire. Il est aujourd'hui très difficile d'anticiper les effets d'une telle mise en œuvre à des échelles régionales.

Une autre approche vise à augmenter le pouvoir réfléchissant (éclaircissement) des nuages au-dessus des océans. Elle consiste à pulvériser de fines particules d'eau de mer dans l'atmosphère ce qui va conduire, dans certaines conditions atmosphériques, à des nuages formés de gouttelettes plus petites et plus nombreuses, renforçant alors l'albédo des nuages. En comparaison avec la méthode basée sur les aérosols stratosphériques, cette technique présente l'avantage d'être plus locale et plus rapidement réversible, mais son efficacité réelle et ses impacts sur les régimes de précipitations sont encore très mal compris.

Des propositions plus modestes cherchent à augmenter l'albédo des surfaces terrestres, c'est-à-dire leur capacité à réfléchir la lumière mais n'aurait d'effet qu'avec des surfaces très importantes.

Des projets plus futuristes proposent la mise en place de miroirs ou d'écrans dans l'espace, à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, au point de Lagrange entre la Terre et le Soleil. Ces structures, très complexes à réaliser, pourraient bloquer une petite fraction du rayonnement solaire. Mais les défis technologiques, logistiques et économiques pour y parvenir sont immenses, ce qui rend cette option peu crédible à ce jour.

La modification du rayonnement solaire est très controversée. D'une part, elle ne résout pas la problématique de l'acidification des océans en lien avec l'augmentation du CO_2 atmosphérique et peut mettre en péril la capacité à stocker du carbone par les écosystèmes naturels. D'autre part, en redistribuant rapidement les cartes des gagnants et des perdants, elle pourrait avoir des conséquences graves conduisant à des déplacements de population et des tensions géopolitiques. Cette redistribution des cartes en termes d'impacts climatiques ne peut aujourd'hui être anticipée. Plus problématique encore, la mise en place d'une telle solution ne peut se faire et être arrêtée que graduellement pour éviter des changements rapides du climat aux conséquences brutales. Cela signifie qu'il est nécessaire d'assurer un maintien dans le temps des capacités technologiques pour y avoir recours. Un tel déploiement ne devrait donc se faire que sous l'égide d'une gouvernance internationale. Pour stabiliser la température de surface, il est nécessaire de s'affranchir au plus vite des énergies fossiles en se donnant des caps clairs au niveau international. Pour autant les états n'ont toujours pas réussi depuis la signature de l'accord de Paris en 2015 à se fixer collectivement de tels caps. De même, les modes de réparations de pertes et dommages liés au réchauffement climatique actuel ne sont pas aujourd'hui clairement établis bien que les causalités et responsabilités puissent l'être du point de vue scientifique. Dès lors, comment imaginer qu'une gouvernance mondiale de la géo-ingénierie puisse se mettre en place et être respectée ?

Conclusion

De nombreuses propositions de géo-ingénierie nécessitent l'exploitation intensive de vastes étendues de terres et d'océans. L'exploitation intensive des terres est déjà associée à des pollutions environnementales majeures (pesticides, eutrophisation liée à l'excès d'azote, tension sur les ressources en eau, pression sur les habitats) qui seraient exacerbées avec la mise en place massive de telles méthodes. Certaines propositions de géo-ingénierie nécessitent de grandes quantités d'énergie et des ressources importantes. Les modifications du rayonnement solaire pourraient, elles, s'accompagner de conséquences extrêmement graves et insuffisamment caractérisées.

Il est essentiel de comprendre que ces technologies sont souvent mises en avant par des acteurs qui n'ont pas intérêt à ce que des transitions environnementales, en premier lieu la transition énergétique, se fassent. C'est là un élément d'une stratégie plus large de diversion laissant penser que les énergies fossiles peuvent devenir non émettrices et donc neutres pour le climat.

Le déploiement d'énergies bas carbone associé à l'électrification des usages de l'énergie, l'arrêt de la déforestation, la restauration d'écosystèmes clés, et la maitrise de la demande sont des options dont le développement massif permettrait d'inscrire les émissions de GES sur une trajectoire décroissante dans la décennie à venir à un cout raisonnable et avec des bénéfices majeurs en santé publique. Si un déploiement d'émissions négatives est nécessaire pour contrebalancer les émissions résiduelles des secteurs ne pouvant s'affranchir à moyen terme d'émissions de GES (agriculture, aviation…), ces technologies ont un cout élevé et des impacts environnementaux (pour le vivant et pour l'usage des terres) sont à prendre en compte. Les technologies de modification du rayonnement solaire ont, pour leur part, un risque considérable et très mal caractérisé.

Ces solutions, dont le potentiel réel reste hypothétique, détournent l'attention de solutions concrètes et leur promotion menace de retarder la transition vers l'abandon des combustibles fossiles. Le risque est réel de détourner les financements des véritables solutions climatiques. ▮

Les figures ont été générées à l'aide de chatGPT et sont libres de droit.

- X. Landes, *La géoingénierie*, coll. « Que sais-je ? », PUF, 2024
- Académie des Sciences, « Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives ». Rapport de l'Académie des Sciences, 2 octobre 2025
- European Commission: Group of Chief Scientific Advisors and Directorate-General for Research and Innovation, "Solar radiation modification", Publications Office of the European Union, 2024, https://data.europa.eu/doi/10.2777/391614
- A. Parker and P.J. Irvine, "The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering", *Earth's Future*, **6**(3) (2018) 456–467 (DOI 10.1002/2017EF000735)
- National Academy of Sciences. "A research strategy for ocean-based carbon dioxide removal and sequestration". Disponible sur https://cutt.ly/nap-strategy-ocean-based-carbon-dioxide-removal-and-sequestration
- www.iea.org/energy-system/carbon-capture--utilisation-and-storage
- Climate Change 2022: *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P.R. Shukla *et al.* (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. doi: 10.1017/9781009157926.026 (tout particulièrement la Box TS.10 *Carbon Dioxide Removal* p. 114 et *Cross Working Group Box 4: Solar Radiation Modification* p. 1489)