

Les limites d'une approche technique de la confrontation : analyse de la géo-ingénierie

Par Ilarion PAVEL

Ingénieur en chef des Mines – Conseil général de l'Économie

Les conséquences d'un dérèglement climatique suscitent des propositions de lutte qui impliquent des techniques de plus en plus globales et sophistiquées, notamment la géo-ingénierie. Il s'agit d'un ensemble de technologies qui visent à contrôler le climat terrestre ; elles se déclinent en deux grandes familles : la gestion du rayonnement solaire et l'extraction du CO₂ atmosphérique. Ces diverses technologies et l'analyse de leurs limites ont été décrites dans un numéro antérieur de cette revue¹. Nous rappelons ici quelques limites et risques de ces technologies et nous présentons quelques réflexions sur les acteurs qui portent ces techniques et sur les exigences de leur gouvernance.

La géo-ingénierie trouve ses origines dans la Guerre froide. On s'intéressait alors aux éventuels changements climatiques comme résultat d'une guerre nucléaire, ainsi qu'au contrôle du climat régional et à son utilisation comme arme de guerre. Mais l'on envisageait également des applications civiles : produire de la pluie artificielle pour l'agriculture ou prévenir les orages.

Aujourd'hui, la géo-ingénierie est plutôt considérée comme un outil d'atténuation du réchauffement climatique causé par les activités humaines, notamment par les émissions de gaz à effet de serre. Certains discours la portent très sérieusement, d'autres la considèrent comme une illusion dystopique.

Deux familles de technologies

La première est relative à la gestion du rayonnement solaire. Elle consiste à atténuer le flux solaire qui arrive sur la surface de la Terre par l'injection stratosphérique d'aérosols, par la dispersion de sels marins dans les nuages, par la modification de l'albédo ou par la mise en orbite de réflecteurs solaires. On réduit ainsi la quantité d'énergie absorbée et, par conséquent, la température moyenne de la planète.

La deuxième famille concerne l'extraction du CO₂ atmosphérique. Elle a pour but de diminuer la concentration de ce gaz grâce à des techniques industrielles de capture et de stockage géologique par la modification de certains cycles biogéochimiques afin de transférer le CO₂ du réservoir atmosphérique vers d'autres réservoirs

comme l'océan, le fond marin ou la biosphère, en recourant à l'alcalinisation ou à la « fertilisation » des océans, à l'amendement des sols par la dissémination du biochar ou la plantation d'arbres.

Des limites et des risques importants

La gestion du rayonnement solaire présente le risque d'un effet rebond : en cas d'arrêt brutal des opérations, on craint une forte augmentation de la température qui pourrait s'avérer plus nuisible pour le climat terrestre que la non-application de cette technique.

Il existe également le risque d'une modification des systèmes météorologiques et des phénomènes climatiques locaux, notamment la perturbation du régime des précipitations, qui pourrait entraîner l'assèchement de l'Amazonie, de certaines parties de l'Afrique et de l'Inde, avec de fortes implications localement pour les écosystèmes et l'agriculture.

Plus particulièrement, l'injection stratosphérique d'aérosols pourrait entraîner une dégradation de la couche d'ozone ou l'apparition de pluies acides.

La dispersion de sels marins dans les nuages ne peut s'appliquer que dans des zones dont l'atmosphère est humide, comme certaines régions marines. Cette technologie est en outre difficile à contrôler : elle risque en effet de modifier le transport de l'humidité dans l'air dans une région donnée, ce qui peut avoir comme conséquence des changements météorologiques et hydrologiques inattendus dans d'autres régions.

La modification de l'albédo s'avère insuffisante pour compenser le réchauffement climatique. De plus, cette technologie met en œuvre des techniques discutables

¹ Voir PAVEL I. (2022), « Géo-ingénierie – Perspectives, limites et risques », *Responsabilité & Environnement – Annales des Mines*, n°105, janvier, www.anales.org/re/2022/resumes/janvier/16-resum-FR-AN-janvier-2022.html

(mousses océaniques, microsphères réfléchissantes) qui peuvent fortement perturber les échanges gazeux dans le système atmosphère-océan, et donc l'équilibre écologique, notamment par des effets négatifs sur le plancton.

Une des principales limites aux techniques d'extraction du CO₂ atmosphérique est le passage à l'échelle, qui demande de grandes quantités d'énergie et d'importants moyens financiers.

Ainsi, alcaliniser les océans à grande échelle reste difficile à mettre en pratique du fait du coût énergétique élevé nécessaire pour extraire, broyer, transporter et disséminer les minerais. Selon certaines estimations, le volume de minerais à exploiter serait comparable à celui de l'exploitation minière mondiale !

Alcaliniser (ou « fertiliser ») l'océan pourrait produire des déséquilibres chimiques et biologiques dans l'écosystème marin pouvant entraîner une modification de la chaîne alimentaire de diverses espèces. De plus, ces effets pourraient être amplifiés par le fait que ces produits seraient disséminés dans des zones géographiquement délimitées, et qui devront donc enregistrer de fortes concentrations le temps que les produits se répartissent de manière homogène sur l'ensemble du volume océanique.

La plantation d'arbres pour compenser les émissions anthropiques de CO₂ sur les cinquante années à venir nécessiterait de recouvrir une surface d'une taille équivalente à celle des États-Unis. De plus, après ce laps de temps, la forêt, arrivée à sa maturité, atteint un point d'équilibre entre la capture et l'émission du CO₂ ; elle ne pourrait donc plus en stocker davantage.

Parfois, on peut douter de l'efficacité de certaines techniques. La complexité des interactions du milieu marin rend les mesures de l'efficacité du stockage très difficiles à réaliser. Par ailleurs, il y a la crainte que le CO₂ stocké au fond de l'océan puisse remonter à la surface. De même, la technologie du biochar soulève des questions quant à son potentiel de stockage et à sa longévité.

En outre, les effets des technologies d'extraction du CO₂ atmosphérique ne seront perceptibles qu'à long terme.

Une évaluation intrinsèquement complexe

Les effets de la géo-ingénierie sont très difficiles à évaluer du fait de la multitude des couplages des facteurs entre eux. Les facteurs qui influencent le climat s'étendent sur des échelles d'espace et de temps plus ou moins grandes : un nuage peut s'étendre sur une centaine de mètres, une averse peut se former en quelques dizaines de minutes... À l'opposé, la circulation du Gulf Stream ou une forte éruption volcanique influencent l'ensemble de la planète, et les mouvements tectoniques s'étalent sur des millions d'années.

L'interaction entre les aérosols et les nuages reste encore mal comprise. Elle dépend de la taille, de la

forme et de la nature des aérosols. La description de l'interaction de ces aérosols avec la biosphère reste, quant à elle, très approximative : on a donc introduit des paramètres ajustables pour pallier notre ignorance. Enfin, les phénomènes météorologiques sont des systèmes chaotiques, où une faible variation des conditions initiales peut conduire à une forte modification de leur trajectoire.

La relation entre le réchauffement global et ses impacts régionaux reste peu comprise. Nous avons une idée des régions qui vont souffrir, et de celles qui en bénéficieront. Mais nous sommes incapables de quantifier cette répartition.

Une autre question reste ouverte. Dans le cas de l'urgence climatique, nous appliquons simultanément plusieurs de ces techniques de géo-ingénierie. Il sera alors pratiquement impossible de distinguer leurs effets respectifs.

Enfin, comme les facteurs climatiques sont étroitement imbriqués, l'application d'une technique de géo-ingénierie peut conduire simultanément à des effets négatifs sur une région géographique et à des effets positifs sur une autre. Comment en décider ?

Quelle gouvernance pour le choix et la gestion des techniques de géo-ingénierie les plus réalistes ?

Au regard de leurs limites et risques, nous déconseillons l'utilisation des technologies de gestion du rayonnement solaire dont les conséquences sont encore inconnues. On pourrait la mettre en œuvre seulement en cas d'extrême urgence, à condition de pouvoir disposer à court terme d'une technologie de substitution moins risquée. Cela n'empêchera pas de continuer de faire des recherches dans ce domaine, à très long terme, dans une perspective très lointaine de colonisation d'autres planètes.

L'extraction du CO₂ atmosphérique reste moins risquée, mais elle est plus difficile à passer à l'échelle et ses effets sont moins immédiats. En outre, vu le grand nombre d'incertitudes concernant le cycle du CO₂ dans la nature, il ne faudrait pas sous-estimer l'impact négatif de cette extraction sur l'environnement.

Le succès d'une technologie de géo-ingénierie ne dépend pas seulement de son applicabilité technique, mais aussi de la capacité d'établir une gouvernance à l'échelle mondiale. Or, le paysage juridique et institutionnel international reste très compliqué : il existe un véritable *patchwork* de normes et de mandats institutionnels qui se chevauchent, et, en même temps, de nombreuses lacunes dans la législation qui ne permettent donc pas une approche globale, efficace, légitime et équitable.

La mise en place d'une gouvernance est un processus long, il pourrait prendre plusieurs décennies. Il faudrait instituer un système d'évaluation scientifique international faisant autorité et couvrant tous les aspects de la géo-ingénierie. En particulier, il faudrait être en mesure

d'évaluer les impacts des techniques de géo-ingénierie à l'échelle de la planète, y compris dans les pays qui manquent de moyens pour mettre en œuvre ces techniques. Mais nous avons vu que cette évaluation était extrêmement malaisée à réaliser.

Le caractère massif de ces techniques soulève aussi la question de leur déploiement, dont l'étendue est liée aux capacités et au pouvoir de certains acteurs. En effet, les techniques de géo-ingénierie sont plus ou moins décentralisables et plus ou moins capitalistes ; elles sont donc maniables, selon leur nature, par des acteurs économiques et politiques de plus ou moins grande taille. Actuellement, il semble clair que les acteurs de grande taille privilégieront la promotion de techniques qu'ils seraient les seuls à pouvoir mettre en œuvre, indépendamment des menaces que ces techniques représenteraient pour les autres acteurs ou pour leurs territoires.

Malgré tous ces problèmes, nous pouvons prendre des mesures pour minimiser les risques liés à l'application de certaines techniques de géo-ingénierie, comme des arbres adaptés au milieu où ils seront plantés ou, dans le cas du biochar, la réservation du charbon à la remédiation des sols et non à la production d'énergie. Il nous faut aussi améliorer les capacités d'anticipation, de coopération et de prise de décision conjointe. En même temps, nous devons empêcher l'application non coordonnée ou prématurée de ces technologies.

Enfin, il faudrait continuer d'encourager une recherche à la fois diversifiée et transdisciplinaire dans le domaine du climat, augmenter les échanges internationaux en matière d'expertise et mettre au point un dialogue permanent entre les scientifiques et les décideurs politiques.

Conclusion

La gestion du rayonnement solaire est une technologie moins coûteuse, plus facile à appliquer et dont les effets peuvent être immédiats. Cependant, les conséquences diverses en sont encore inconnues, ce qui ne la rendrait applicable que dans des cas d'extrême urgence et seulement si une technologie de remplacement était en cours de développement pour en prendre rapidement le relais.

L'extraction du CO₂ atmosphérique est plus coûteuse, plus difficile à mettre en place et ses effets ne seront visibles qu'à long terme. Son passage à grande échelle reste délicat et elle ne suffira probablement pas à absorber toutes les émissions anthropiques. Du point de vue de ses effets potentiels non désirés, elle reste cependant préférable, sous certaines de ses formes, à la gestion du rayonnement solaire, même si elle présente elle aussi des dangers ou des effets en retour qui n'ont pas été pleinement identifiés compte tenu des couplages entre les nombreux facteurs biologiques, chimiques et physiques impliqués.

Enfin, il existe en parallèle d'autres pistes, non fondées sur la géo-ingénierie, pour pallier le réchauffement climatique : développer les sources d'énergies non fossiles (solaire, éolien, nucléaire), en particulier en poursuivant la mise au point de la fusion nucléaire ; limiter la croissance démographique ; fonder notre système économique non plus sur l'optimisation financière mais sur la préservation de l'environnement et des ressources naturelles. Il n'y a pas d'utilité à planter des arbres, si les forêts actuelles et, plus largement, les écosystèmes dont nous dépendons sont détruits.