

# Géo-ingénierie – Perspectives, limites et risques

Par Ilarion PAVEL

Ingénieur en chef des Mines – Conseil général de l'Économie,  
de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies

On désigne par géo-ingénierie un ensemble de technologies qui visent à contrôler le climat terrestre dans le but de lutter contre le réchauffement climatique de la Terre, lequel est causé par les activités humaines, en particulier par les émissions de gaz à effet de serre. On distingue deux grandes familles : la gestion du rayonnement solaire et l'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Dans cet article, nous passons en revue ces diverses technologies et analysons leurs limites et leurs risques.

## Historique

La naissance de la géo-ingénierie remonte à la Guerre froide : on s'intéresse à l'époque aux éventuelles modifications climatiques que causerait une guerre nucléaire, mais aussi à la possibilité de contrôler le climat régional et de l'utiliser comme arme de guerre. La modification du climat local était également envisagée pour des applications civiles : production de précipitations pour les besoins de l'agriculture, prévention des orages pour diminuer les éventuels dégâts. Cependant, la mise en œuvre de ces techniques n'a pas donné des résultats convaincants.

Actuellement, la géo-ingénierie suscite un regain d'intérêt comme moyen de lutte contre le réchauffement climatique, qui est causé par les activités humaines, en particulier par les émissions de gaz à effet de serre.

## La géo-ingénierie fait appel à deux grandes familles de technologies

La première est la gestion du rayonnement solaire dans le but d'atténuer le flux lumineux qui arrive sur la surface de la Terre, et ce afin de diminuer la quantité d'énergie absorbée et, en conséquence, la température moyenne de la planète. La deuxième est l'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique, qui vise la diminution de la concentration de ce gaz soit par le recours à diverses techniques industrielles de capture et de stockage géologique, soit par la modification des cycles biogéochimiques laquelle permettrait de transférer le CO<sub>2</sub> atmosphérique vers d'autres réservoirs que sont l'océan, le fond marin ou la biosphère.

### Gestion du rayonnement solaire

#### Injection stratosphérique d'aérosols

Cette technique consiste à injecter dans la stratosphère des particules à base de soufre, qui vont réfléchir

une partie du rayonnement solaire, augmentant ainsi l'albédo. Elle a été inspirée par des éruptions volcaniques comme celles du Pinatubo (aux Philippines) en 1991 ou d'El Chichon (au Mexique) en 1982. En effet, le volcan Pinatubo a éjecté 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre et a provoqué un refroidissement climatique global de 0,5°C pendant deux ans.

Une estimation montre qu'un kilogramme de soufre pourrait compenser l'effet du réchauffement climatique provoqué par plusieurs centaines de milliers de kilogrammes de CO<sub>2</sub>. Il suffirait d'injecter 1 million de tonnes d'aérosols dans la stratosphère pour réduire de moitié le forçage radiatif provoqué par les 240 milliards de tonnes de carbone libérées par l'activité humaine et accumulées dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle. Ces aérosols pourraient être dispersés par une flotte de vingt avions capable de transporter des charges lourdes et de voler à 20 km d'altitude<sup>1</sup>.

Afin de tester la faisabilité de cette technologie, plusieurs projets de faible envergure ont été conduits sur des régions limitées.

Ainsi, E-PEACE (Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud Experiment), le projet porté par l'Université de Californie à San Diego, a diffusé des aérosols à base de fumées ou de sel à partir d'un navire, au large de la côte californienne, dans le but de mieux comprendre les interactions aérosol-nuage-rayonnement. Des instruments embarqués dans un avion mesuraient la composition chimique des nuages ainsi formés, tandis qu'un satellite enregistrait le changement de réflectance de la lumière du soleil dû aux effets des particules émises par ces nuages.

Au Royaume-Uni, le projet SPICE (Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering), né de la collaboration entre plusieurs universités britanniques et la

<sup>1</sup> KEITH A. D. P. (2013), "The Fate of an Engineered Planet", *Scientific American*, pp. 34-36.

société Marshall Aerospace (Cambridge), avait pour but de pulvériser 150 litres d'eau dans l'atmosphère à partir d'un aérostat situé à une altitude d'un kilomètre. Ce projet a malheureusement été abandonné pour des raisons de gouvernance (absence de réglementation internationale pour encadrer ce type d'expérience, jugée prématurée) et à cause d'un problème de propriété intellectuelle (la technologie était déjà brevetée, ce qui imposait des contraintes dans la diffusion des résultats scientifiques, lesquelles étaient inacceptables pour des universitaires).

En Russie, des aérosols ont été pulvérisés dans l'atmosphère par un hélicoptère à 200 m d'altitude et au niveau du sol par un camion<sup>2</sup>, ce qui a provoqué une atténuation du rayonnement solaire évaluée entre 1 et 10 %.

Actuellement, le projet SCoPEX (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment), porté par l'Université Harvard, vise à envoyer un ballon stratosphérique à une altitude de 20 km pour y disperser 1 kg de carbonate de calcium. Ce ballon dispose d'une nacelle équipée d'une paire d'hélices qui lui permettront de mélanger ces aérosols avec l'air stratosphérique et de se déplacer afin de mesurer à différents endroits les changements en densité des aérosols, leur interaction avec l'air stratosphérique et les modifications de la chimie de l'atmosphère et de la diffusion de la lumière.

L'expérience se déroulera sur une zone d'un kilomètre de longueur et de 100 mètres de diamètre. Elle vise à mieux connaître la façon dont les aérosols interagissent les uns avec les autres, mais aussi avec l'air stratosphérique et le rayonnement solaire et infrarouge. Ces résultats permettront d'améliorer la modélisation et les simulations numériques, ce qui serait un premier pas dans l'estimation de l'efficacité et des risques de la géo-ingénierie solaire.

Ces expériences sont encourageantes, mais les limites et les risques sont multiples.

On choisit de diffuser les aérosols en stratosphère car celle-ci est une couche stable de l'atmosphère parcourue de faibles courants verticaux, ce qui garantit une longue persistance des aérosols en suspension. Cependant, au fil du temps, sous l'influence de la gravitation, les particules finissent par tomber, il faudrait donc les remplacer continuellement.

En cas d'arrêt brutal de l'injection stratosphérique d'aérosols, un effet rebond est à craindre, avec comme conséquence une augmentation de la température. Cependant, grâce à l'inertie du système, cette augmentation ne serait pas immédiate, ce qui laisserait le temps de remplacer cette technologie par une autre, d'action plus durable. Mais si ce remplacement est impossible, le risque est alors un choc de terminaison, qui pourrait s'avérer plus nuisible pour le climat terrestre que la non-application de cette technique de géo-ingénierie.

L'effet de ces aérosols sur la chimie de la stratosphère, en particulier sur l'ozone, est actuellement

mal connu, en particulier le risque d'un appauvrissement de la couche d'ozone, qui protège la surface de la Terre contre les rayons ultraviolets.

Autre risque : certains aérosols, comme ceux à base de soufre, peuvent former des pluies acides lorsqu'ils tombent dans la troposphère.

L'injection stratosphérique d'aérosols, comme d'ailleurs l'ensemble des technologies de gestion du rayonnement solaire, pourrait affecter les systèmes météorologiques et les phénomènes climatiques locaux. Une compensation globale du réchauffement climatique pourrait notamment entraîner l'assèchement de l'Amazonie, ainsi que de certaines parties de l'Afrique et de l'Inde, avec des implications pour les écosystèmes et l'agriculture.

### **Injection de sel marins dans les nuages**

Dans son principe, cette technique<sup>3</sup> consiste à pulvériser de l'eau de mer dans la partie basse de l'atmosphère. Les aérosols ainsi formés constituent alors des centres de condensation pour la vapeur d'eau et, en conséquence, favorisent la formation de nuages qui augmentent l'albédo. Elle est particulièrement efficace dans les régions océaniques subtropicales et de moyenne latitude, où les nuages stratocumulus se forment facilement sous l'influence d'aérosols. Elle l'est d'autant plus que ces régions marines affichent de faibles niveaux de poussière et de pollution en mer.

Un des défis technologiques est de pulvériser des gouttelettes très fines, de l'ordre de 100 nm, car leur effet réfléchissant augmente avec la diminution de leur dimension.

C'était le but poursuivi par le projet Silver Lining à San Francisco, annoncé en 2010, avec le soutien de la fondation Bill Gates et qui devait impliquer dix navires pour produire des nuages sur une surface de 10 000 km<sup>2</sup>. S'il a été abandonné, les travaux correspondants ont été poursuivis par le projet Marine Cloud Brightening, porté par l'Université de Washington, dont des expérimentations sont en cours sur la côte californienne.

Le gouvernement australien finance également un projet porté par l'Ocean Technology Group de l'Université de Sydney, dans le but de réduire le réchauffement climatique au-dessus de la Grande barrière de corail, qui souffrirait bien plus de l'augmentation des températures que de l'acidification des océans.

Cette technologie a pour avantages de n'utiliser que des substances naturelles (l'eau de mer et le vent), d'agir rapidement et de manière réversible. En outre, ses effets peuvent être localisés sur une région précise.

Cependant, ces effets disparaissent dès que l'on arrête la pulvérisation, une telle technologie nécessite donc une action permanente. En cas d'arrêt, l'effet rebond peut être rapide, ne laissant pas le temps de trouver une autre technologie de substitution.

Cette technologie ne peut s'appliquer que dans des zones dont l'atmosphère est humide, comme certaines

<sup>2</sup> IZRAIL Y. A. *et al.* (2009), "Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers", *Russian Meteorology and Hydrology*, May.

<sup>3</sup> LATHAM J. (1990), "Control of global warming?", *Nature* 347, pp. 339-340.

régions marines, et est en outre difficile à contrôler. Modifier le transport de l'humidité dans l'air dans une région donnée peut produire dans d'autres régions des changements météorologiques et hydrologiques inattendus, avec des effets mal connus sur le fonctionnement des écosystèmes. Selon certains modèles, l'Amérique du Sud risquerait de devenir plus chaude et plus sèche : les précipitations sur la région amazonienne diminueraient alors que celles des tropiques augmenteraient.

### Modification de l'albédo

Si l'on augmente la réflectivité des surfaces terrestres (par diverses méthodes : toits peints en blanc, couverture végétale), on renvoie dans l'atmosphère une partie du rayonnement solaire qui arrive sur la Terre, ce qui réduit le flux d'énergie absorbé, et diminue donc la température de la surface.

Plusieurs techniques, dont l'applicabilité est plus ou moins réaliste, ont été proposées.

Certaines régions, comme la Californie, encouragent à peindre les toits en blanc pour réfléchir le rayonnement solaire (technologie dite du « toit frais »). Mais la surface disponible est faible et l'efficacité est limitée : même si l'on repeignait en blanc tous les toits des bâtiments, on ne pourrait compenser que 5 % de l'effet du réchauffement global causé par le doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère<sup>4</sup>. De plus, cette technique est l'une des plus coûteuses<sup>5</sup>. Elle reste quand même utile pour réduire le besoin en climatisation et peut ainsi contribuer de manière indirecte à la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

De grandes surfaces réfléchissantes en polyéthylène-aluminium pourraient aussi être déployées sur le sol<sup>6</sup>. Cependant, la fabrication, le transport, l'installation et le nettoyage des matériaux qui couvriraient les immenses surfaces nécessaires créeraient de nouvelles émissions de CO<sub>2</sub>, sans parler du coût important de déploiement de cette technique.

L'albédo pourrait être amélioré en favorisant des cultures particulières, dont la brillance des feuilles et la morphologie de la canopée maximisent la réflectivité<sup>7</sup>. On a même proposé d'effectuer des modifications génétiques de la cire des feuilles des plantes ou de la structure de la canopée. Cette solution semble irréaliste, les cultures devant avant tout être choisies pour assurer l'alimentation de la population. En outre, des estimations montrent que cette technique, même appliquée à grande échelle, ne pourrait compenser que 10 % de l'effet du réchauffement global.

Dans le même but, il a été proposé de reboiser les zones tropicales et de modifier les prairies : là aussi, les effets de compensation ne seront que de 15 %, avec le risque de perturber la circulation atmosphérique et les écosystèmes.

On a par ailleurs proposé de former à la surface de l'océan des mousses avec des substances non toxiques (gélatines, cellulose et agents gélifiants)<sup>8</sup> pour renforcer et maintenir plus longtemps les sillages des navires. De même, pourrait être disséminées des sphères flottantes à la surface de l'océan ou des bulles microscopiques en suspension dans les couches supérieures de la zone photique afin de mieux réfléchir le rayonnement solaire. Ces techniques sont très critiquées, car leur impact sur la circulation océanique et les courants marins verticaux est inconnu, comme le sont leurs implications éventuelles sur les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'océan, ce qui risque de perturber fortement l'équilibre des écosystèmes.

La fonte de la banquise ou de la glace de mer pourrait être retardée, voire arrêtée, au moyen de particules réfléchissantes. C'est ce que le projet Arctic Ice, financé par du *crowdfunding*, souhaite réaliser en disséminant des microsphères creuses de silice d'un diamètre de 35 microns<sup>9</sup>. La faisabilité de cette technologie a été testée en Alaska ; des expérimentations sont actuellement en cours près des îles Svalbard, elles portent sur des petites surfaces (0,25 km<sup>2</sup>). Bien évidemment, cette technologie n'est applicable qu'aux régions polaires, son impact sera donc limité et le climat régional risquera d'être modifié. En outre, même si l'on protège la glace de mer contre le rayonnement solaire, elle restera vulnérable à l'augmentation de la température des océans.

### Réflecteurs en orbite

C'est la technologie la plus futuriste. Elle vise à diminuer le flux de rayonnement solaire incident sur Terre grâce à des panneaux réfléchissants satellisés au voisinage du point Lagrange et situés à une altitude de 1 500 000 km. Sa mise en œuvre nécessiterait une surface de réflecteurs de 1 700 x 1 700 km, dont la mise en place est actuellement très difficile d'un point de vue technologique et dont le coût dépasserait 5 millions de milliards de dollars<sup>10</sup>.

Des expériences de taille bien plus modeste ont déjà été menées, notamment le projet russe Znamia. À l'origine, il avait pour but de tester un nouveau système de propulsion spatial – une voile solaire –, puis il a été converti en réflecteur spatial pour renvoyer le rayonnement du Soleil dans l'Arctique, pendant la période de nuit polaire. La première phase a été un succès : un réflecteur de 20 mètres ayant été déployé. Mais le pro-

<sup>4</sup> Le doublement de la concentration du CO<sub>2</sub> par rapport à son niveau de l'ère préindustrielle (280 ppm) produit un forçage radiatif de 3,7 W/m<sup>2</sup>.

<sup>5</sup> *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, Royal Society, 2009.

<sup>6</sup> GOVINDASAMY B. & NAG B. (2011), "Albedo enhancement over land to counteract global warming: Impacts on hydrological cycle", *Climate Dynamics* 39.

<sup>7</sup> RIDGWELL A. *et al.* (2009), "Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering", *Current biology* 19(2).

<sup>8</sup> AZIZ A. *et al.* (2014), "Long-term stabilization reflective foams in seawater", *Roy. Soc. Ch.* 95.

<sup>9</sup> Les dimensions ont été choisies pour ne pas provoquer d'effets indésirables dans le système respiratoire des mammifères. Les microsphères sont inertes chimiquement et, étant creuses, elles flottent sur l'eau.

<sup>10</sup> ROGER Angel (2006), "Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1)", *PNAS* 103 (46).

jet a été abandonné à la suite de l'échec du déploiement d'un deuxième réflecteur.

Des simulations numériques ont montré que l'atténuation du rayonnement solaire incident à la surface de la Terre conduirait à de forts déséquilibres : la température de surface diminuerait au niveau des tropiques, ce qui appauvrirait le flux remontant d'humidité et, en conséquence, causerait une diminution importante des précipitations. Dans le même temps, le réchauffement des hautes latitudes ne serait pas complètement compensé, ce qui n'empêcherait pas la fonte des glaces dans les régions polaires<sup>11</sup>.

## Extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique

### Fertilisation de l'océan

L'océan est fertilisé naturellement par les courants ascendants qui apportent de l'eau riche en nutriments (nitrates, phosphates, fer) à la surface. Cela se produit lorsque les courants océaniques rencontrent un obstacle situé en profondeur. De plus, les vents peuvent emporter de la poussière riche en oligoéléments sur de longues distances, et les rivières et les glaciers peuvent, quant à eux, transporter des nutriments dans leurs alluvions. Cependant, certaines régions océaniques, comme le Pacifique équatorial et le Pacifique subarctique ainsi que l'océan Austral, qui si elles sont relativement riches en nitrates et en phosphates<sup>12</sup>, sont pauvres en phytoplancton. Des études ont montré que ces régions sont également pauvres en fer<sup>13</sup>. L'éruption du Pinatubo a apporté du fer dans ces régions *via* les cendres disséminées dans l'atmosphère, lesquelles ont été entraînées dans la circulation atmosphérique, ce qui a conduit par la suite à une prolifération du phytoplancton.

De cette observation est née l'idée d'ajouter intentionnellement des nutriments à base de fer dans ces zones océaniques pour stimuler le développement du phytoplancton. Lors de sa croissance, non seulement le phytoplancton absorbe le CO<sub>2</sub> présent dans l'océan<sup>14</sup>, mais, en sa qualité de premier maillon de la chaîne alimentaire, il permet également le développement du zooplancton et, en conséquence, l'amélioration de la production biologique. À la fin de sa vie, le plancton sédimente au fond de l'océan, piégeant ainsi le carbone.

Une quinzaine de projets de fertilisation ont vu le jour au cours des vingt dernières années, parmi lesquels Eifex (2004, Atlantique Sud), Lohafex (2009, Atlantique Sud) et HRC (2012, Pacifique Nord).

Le projet Eifex (European Iron Fertilisation Experiment) a permis de fertiliser une zone de plus de 150 km<sup>2</sup> au

moyen de 13 tonnes de sulfate de fer dissous dans l'eau de mer. On a alors observé une prolifération du phytoplancton et de la production biologique, qui a été accompagnée par des dépôts de sédiments au fond de l'océan. Cette expérience a été un succès.

De son côté, le projet Lahafex, porté par l'Inde et l'Allemagne, a connu un aboutissement moins heureux. Après la dissémination de 10 tonnes de sulfate de fer sur 300 km<sup>2</sup>, il a été constaté une importante prolifération du phytoplancton. Malheureusement, la région océanique choisie était pauvre en acide silicique, un élément qui est essentiel au développement des diatomées, un phytoplancton capable par excellence de séquestrer le CO<sub>2</sub>. D'autres espèces de phytoplancton se sont développées, ce qui a augmenté fortement la production biologique. En revanche, après sa mort, le phytoplancton n'est pas tombé au fond de l'océan, mais s'est décomposé en surface et le CO<sub>2</sub> est alors retourné dans l'atmosphère, ce qui montre que le succès d'une telle technique dépend de la région choisie.

Le projet HRC, porté par la société Haida Salmon Restoration Corporation, a déversé 120 tonnes de sulfate de fer dans le Pacifique au large du Canada, dans les voies de migration du saumon. Cela a entraîné une prolifération du plancton sur 35 000 km<sup>2</sup>, pendant plusieurs mois. On a bien obtenu une augmentation de la production biologique, ayant comme conséquence une saison de pêche très fructueuse. Cependant, les résultats sont contestés, car d'autres facteurs que la dissémination du fer ont pu contribuer au succès de la pêche. De plus, la société est accusée d'avoir violé les règlements internationaux concernant la dissémination des substances chimiques dans l'eau océanique.

Cette technique est souvent critiquée en raison de la difficulté d'évaluer l'efficacité du stockage. Les interactions dans l'écosystème marin sont complexes et encore mal comprises, tout comme le cycle du carbone dans l'océan, ce qui rend incertaine l'applicabilité de cette technique. Il n'est pas impossible que tôt ou tard, le dioxyde de carbone revienne à la surface et passe de nouveau dans l'atmosphère.

Par ailleurs, la dissémination de fer dans l'océan pourrait produire des déséquilibres dans l'écosystème marin en épuisant l'oxygène et en acidifiant l'eau profonde, ce qui pourrait modifier la chaîne alimentaire et favoriser le développement des espèces toxiques<sup>15</sup>. Le fer n'est pas le seul oligoélément nécessaire au développement du phytoplancton, ce qui rend probable, dans certaines régions, la nécessité d'ajouter d'autres éléments chimiques, comme du zinc ou du cobalt.

Enfin, une estimation montre qu'une application de cette technique à l'échelle planétaire ne pourra compenser qu'un sixième des émissions anthropiques actuelles de CO<sub>2</sub>.

<sup>11</sup> GOVINDASAMY B. *et al.* (2003), "Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate climate change from a quadrupling of CO<sub>2</sub>", *Global and Planetary Change* 37, 1-2.

<sup>12</sup> Ces régions sont appelées "High-nutrient, Low-chlorophyll".

<sup>13</sup> MARTIN J. H. & FITZWATER S. E. (1988), "Iron-deficiency limits phytoplankton growth in the Northeast Pacific Subarctic", *Nature* 331, pp. 341-343.

<sup>14</sup> On estime que le phytoplancton absorbe annuellement, par photosynthèse, 150 milliards de tonnes de carbone, soit environ 30 % du flux absorbé dans le cycle du carbone.

<sup>15</sup> TRICK C. G. *et al.* (2010), "Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas", *PNAS* 107(13), pp. 5887-5892.

### Altération forcée, alcalinisation de l'océan

Cette technique consiste à imiter des processus naturels d'altération des silicates, qui jouent un rôle important dans le cycle géologique du carbone. La pluie dissout le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, puis dégrade les minéraux carbonatés et silicatés du sol pour former des ions bicarbonate et libérer des ions Ca ou Mg. Ces ions sont ensuite entraînés par le ruissellement des eaux de surface et souterraines, puis sont emportés par les rivières pour arriver jusqu'à l'océan, où ils précipitent pour former du carbonate de calcium, qui tombe au fond de l'océan. Le  $\text{CO}_2$  se trouve ainsi enfoui dans des couches sédimentaires, qui, entraînées par des mouvements de subduction des plaques tectoniques, migrent jusqu'à l'intérieur de la Terre. Ultérieurement, le  $\text{CO}_2$  refait surface lors des éruptions volcaniques<sup>16</sup>.

Pour capturer le  $\text{CO}_2$ , il suffirait donc de disséminer des minéraux carbonatés ou silicatés sur la terre (altération forcée), puis de les laisser se transformer naturellement en ions bicarbonate. Entraînés par les rivières vers l'océan, ils seront alors déposés sur les fonds océaniques sous forme de sédiments. Une autre possibilité est de déposer ces minéraux sur le littoral océanique et les plateaux continentaux (alcalinisation), où ils seront battus par les vagues, ce qui accélérera le processus de dissolution des minéraux.

C'est l'objectif poursuivi par le projet Vesta, qui est porté par une collaboration d'universités réunies au sein d'une organisation à but non lucratif fondée en 2009, à San Francisco. Selon certaines estimations, disséminer de l'olivine, une roche d'origine volcanique à base de silicates de fer et de magnésium, sur 2 % de la surface des plateaux continentaux permettrait de capter 100 % des émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$ . Ce minéral étant disponible à proximité du littoral, son exploitation serait donc aisée et favoriserait la mise en œuvre de cette technologie. Des expériences sont actuellement en cours sur deux plages situées dans les Caraïbes.

L'Université de Sheffield (au Royaume-Uni), à travers le Leverhulme Centre for Climate Change, porte plusieurs projets d'altération forcée, visant à amender des sols cultivés avec des roches silicatées broyées. Outre la capture du  $\text{CO}_2$ , ces traitements libèrent des nutriments qui fertilisent les cultures et les protègent contre certains agents pathogènes. Des expérimentations ont eu lieu aux États-Unis sur des champs de maïs, en Australie sur des cultures de canne à sucre et en Malaisie dans des forêts de palmiers.

<sup>16</sup> Ce cycle géologique du carbone est d'une longue durée (une centaine de milliers d'années), mais les quantités de  $\text{CO}_2$  recyclées sont cent fois moins importantes que les émissions anthropiques. Il a cependant joué un rôle crucial dans la stabilisation de la température sur Terre lors des diverses phases géologiques. Au début de la formation de la Terre, le Soleil était 30 % moins actif qu'aujourd'hui, tandis que la concentration du  $\text{CO}_2$  atmosphérique était quelques centaines de fois plus importante qu'aujourd'hui, ce qui a permis, grâce à l'effet de serre, de maintenir l'eau à l'état liquide, qui est la condition essentielle pour l'apparition de la vie. Au fur et à mesure que l'activité solaire a augmenté, l'altération des silicates a permis l'absorption d'une grande partie du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère et son enfouissement dans les roches. Ainsi, la diminution de l'effet de serre a compensé l'augmentation de l'activité du Soleil.

D'autres projets d'altération forcée sont portés par le Greenhouse Gas Removal by Enhanced Weathering (qui fait intervenir plusieurs universités britanniques : Oxford, Cambridge, Southampton et Cardiff) et la fondation Olivine qui s'est associée à l'Université d'Utrecht (Pays-Bas).

Cette technologie a l'avantage de faire intervenir des phénomènes naturels, mais elle est difficile à mettre en pratique à cause du coût énergétique nécessaire pour extraire, broyer, transporter et disséminer les minéraux. Selon certaines estimations, le volume d'olivine à exploiter serait comparable à celui actuel de l'exploitation minière mondiale.

En outre, l'impact de cette technologie sur les sols et la biologie marine est incertain. Les ions de magnésium et de fer libérés par l'altération de l'olivine pourraient engendrer une prolifération non contrôlée du phytoplancton et déséquilibrer ainsi les délicats équilibres chimiques et biologiques de l'océan. De plus, ce minéral contient également des impuretés, notamment du nickel, qui est toxique en grande quantité. Se pose également la question des impacts écologiques négatifs sur les zones de largage de ces minéraux (« hotspots ») liés aux fortes concentrations d'ions et à la déplétion de  $\text{CO}_2$  locale ; des impacts qui peuvent durer le temps que les effets se répartissent de manière homogène dans le volume océanique.

### Capture du $\text{CO}_2$ atmosphérique

On peut capturer le  $\text{CO}_2$  atmosphérique directement au niveau d'une installation industrielle à l'aide d'une solution alcaline d'hydroxyde de sodium ou de potassium, qui se transforme ainsi en carbonate. On filtre ensuite la solution pour séparer le carbonate, puis on décompose thermiquement ce dernier pour récupérer l'hydroxyde et libérer le  $\text{CO}_2$ . On peut ensuite compresser le gaz, ou éventuellement le liquéfier pour le séquestrer dans un réservoir géologique (une ancienne mine ou un puits de pétrole, une cavité saline, aquifère) ou le déposer sur un fond sous-marin.

Des technologies plus récentes utilisent la capture de  $\text{CO}_2$  par des amines, avec transformation de celui-ci en sel carbamate. Le carbamate, soumis par la suite à des températures plus élevées, se décompose avec pour effet de régénérer l'amine en libérant le  $\text{CO}_2$ .

La capture du  $\text{CO}_2$  directement dans l'atmosphère demande trois à quatre fois plus d'énergie que la capture du  $\text{CO}_2$  à la sortie des centrales thermiques<sup>17</sup>, ce qui rend cette technologie coûteuse. Si plusieurs entreprises ont certes été créées, leur modèle économique repose néanmoins sur des utilisations spécifiques du  $\text{CO}_2$  capté. Elles sont *a fortiori* largement subventionnées par des fonds d'investissements à orientation environnementale.

Ainsi, la société Carbon Engineering (Canada), qui recourt à la capture par hydroxyde de sodium, utilise le  $\text{CO}_2$  capturé pour la récupération assistée de gise-

<sup>17</sup> L'énergie libre nécessaire à la séparation d'un gaz à partir d'un mélange gazeux est proportionnelle à la variation de l'entropie. La non-linéarité de cette variation rend la séparation d'autant plus difficile que les concentrations sont faibles.

ments de pétrole quasi épuisés<sup>18</sup> et pour la synthèse des carburants.

Climeworks (Suisse), qui fait appel à la technologie des amines, utilise le CO<sub>2</sub> pour aciduler les boissons gazeuses ou l'injecter dans des serres de culture de fruits et légumes afin d'améliorer la photosynthèse et, en conséquence, accroître la productivité.

La technologie amine est également utilisée par Global Thermostat (États-Unis), qui capture le CO<sub>2</sub> non seulement pour l'injecter, elle aussi, dans les boissons gazeuses et les serres agricoles, mais aussi pour fabriquer des engrais, des plastiques et des carburants de synthèse. La société dispose d'un partenariat avec Exxon.

Skytree (Pays-Bas) est une *spin-off* de l'Agence spatiale européenne : sa technologie de capture du CO<sub>2</sub> fait intervenir des films polymères et a été développée pour la station spatiale internationale. Récemment, cette société a appliqué la même technologie pour absorber le CO<sub>2</sub> de l'habitable des automobiles, ce qui permet de recycler l'air et de diminuer ainsi l'énergie consommée par l'installation d'une climatisation.

Prometheus Fuels (États-Unis) produit de l'éthanol à partir du CO<sub>2</sub> atmosphérique par électrocatalyse : sur un catalyseur à base de cuivre soumis à une différence de potentiel, le CO<sub>2</sub> réagit avec l'eau pour former l'acide carbonique, qui est ensuite réduit en monoxyde de carbone. Ce dernier réagit avec l'eau pour former de l'éthanol, qui est ensuite séparé au moyen d'un filtre à nanotubes. Cette société est largement financée par BMW.

En conclusion, la capture directe du CO<sub>2</sub> pourrait être utilisée pour des applications ponctuelles, mais il est difficile d'en imaginer une application à large échelle dans le but de diminuer la concentration de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Il vaut mieux concentrer nos efforts sur la capture du CO<sub>2</sub> produit par des sources industrielles.

### L'apport du Biochar

Les végétaux stockent naturellement du carbone *via* le processus de la photosynthèse. La technique Biochar consiste à récolter cette biomasse, puis à la soumettre au processus de pyrolyse : à une température de plusieurs centaines de degrés en absence d'oxygène, la biomasse se décompose en composants volatils (gaz de synthèse), liquides (bio-huile) et solides (biochar)<sup>19</sup>. Les gaz de synthèse et la bio-huile sont utilisables comme biocarburants ; ils pourraient pour partie être récupérés comme combustible pour entretenir la pyrolyse. Le biochar, quant à lui, peut être

<sup>18</sup> Il s'agit d'endroits qui sont éloignés des sources industrielles de CO<sub>2</sub> (centrales thermiques, cimenteries, raffineries), ce qui rend le transport du CO<sub>2</sub> plus coûteux que sa capture directe.

<sup>19</sup> La quantité et la composition du biochar obtenu dépend de la nature de la biomasse et du processus utilisés pour le produire. Une pyrolyse à moyenne température (500°C) de la biomasse à base de bois produit 20 % de biochar, alors qu'une pyrolyse à basse température en produit 35 %. Appliqué à un même type de biomasse, un processus de dépolymérisation thermo-catalytique, à base de micro-ondes, peut permettre d'en produire 50 %, mais il consomme bien plus d'énergie (WINSLEY P. (2007), *Biochar and bioenergy production for climate change mitigation*, Ministry of Agriculture and Forestry, Wellington).

répandu sur les sols et le carbone qu'il contient sera ainsi stocké pendant des centaines d'années.

La porosité du biochar permet une meilleure rétention de l'eau et des minéraux dans le sol, en particulier des nitrates, ce qui empêcherait leur migration vers les nappes phréatiques. Le biochar pourrait également stimuler la croissance et le développement des micro-organismes, ce qui augmenterait la fertilité du sol<sup>20</sup>. Enfin, ses propriétés en matière de rétention des polluants le rendent intéressant pour la remédiation des sols.

De nombreux projets universitaires ont déjà été mis en œuvre, notamment par Cornell University et le Biochar Research Centre d'Edinburgh, mais ils s'inscrivent bien dans le domaine de la remédiation des sols que dans celui du stockage du carbone.

La ville de Stockholm développe un projet biochar pour traiter les déchets ménagers de ses habitants. De son côté, l'organisation non gouvernementale International Biochar Initiative, composée d'académiques, d'industriels et d'agriculteurs, promeut une industrie durable du biochar.

Du point de vue de la géo-ingénierie, le stockage du carbone par le biochar aura cependant un faible impact positif sur le climat et sera difficilement applicable à grande échelle. Le biochar obtenu par pyrolyse serait ainsi loin d'avoir la fertilité de la « terra preta », qui est le résultat d'un processus bien plus élaboré. Son application à grande échelle diminuerait l'albédo, pourrait conduire à des déséquilibres écologiques et engendrer des conflits d'usage de la biomasse. Enfin, son potentiel et la longévité du stockage du CO<sub>2</sub> qu'il permet sont incertains.

### Plantation d'arbres

Pendant sa croissance, un arbre stocke du carbone par photosynthèse, d'où l'idée d'en planter à grande échelle pour capter le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le stocker dans les forêts sous forme de biomasse. Il est ainsi préconisé de reboiser des sols dégradés ou déboisés par des exploitations excessives. Certains projets visent même à reboiser la savane africaine.

Par exemple, Bonn Challenge, un projet lancé en 2018 par l'Allemagne, vise à restaurer d'ici à 2030, par des plantations, 3,5 millions km<sup>2</sup> de terres dans plus de soixante pays d'Amérique du Sud et d'Afrique. The Trillion Tree Campaign est une autre grande initiative lancée par l'ONU, dont le but est de planter mille milliards d'arbres sur la surface de la Terre.

La plantation d'arbres permet la capture de CO<sub>2</sub> d'une manière naturelle et ne peut être que bénéfique pour la

<sup>20</sup> La « terra preta » (terre noire en portugais) est un sol artificiel très fertile ; sa couleur foncée est due à sa teneur en charbon de bois, qui se trouve dans le bassin de l'Amazonie. Son existence est le résultat d'une pratique des habitants de cette région, qui ont mélangé le sol avec du charbon de bois, du compost, des déchets ménagers et du fumier. Le charbon de bois ainsi produit est resté stable dans le temps et a retenu en son sein les minéraux et les nutriments, ce qui lui confère une fertilité exceptionnelle (LEHMANN J. *et al.* (2006), "Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems", *A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, pp. 403-427.

restauration des sols. Cependant, son impact restera limité : selon certaines estimations, cela ne permettra de stocker que quelques pourcents des émissions anthropiques actuelles<sup>21</sup>. De plus, ce sont surtout les jeunes arbres, qui pendant leur période de croissance stockent du CO<sub>2</sub>. Une fois arrivé à maturité, une forêt présente un équilibre entre les quantités absorbées de CO<sub>2</sub> et celles émises.

Enfin, recouvrir de grandes surfaces avec des forêts pose deux problèmes : d'une part, cela diminue l'albédo, et augmente donc la quantité de rayonnement solaire absorbé par la Terre ; et d'autre part, cela crée une compétition avec l'agriculture concernant l'utilisation des sols disponibles.

## Conclusion

La gestion du rayonnement solaire est une technologie moins coûteuse, plus facile à appliquer et dont les effets peuvent être immédiats. Cependant, les effets secondaires sont encore inconnus, ce qui ne la rend applicable que dans des cas d'extrême urgence et seulement si une technologie de remplacement est en cours de développement pour en prendre rapidement le relais. Il faudrait cependant continuer les recherches

dans ce domaine, cette technologie pouvant se révéler essentielle pour une éventuelle colonisation, dans le futur, d'autres planètes.

L'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique est plus coûteuse 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. Elle reste préférable à la gestion du rayonnement solaire, mais elle présente, elle aussi, des effets secondaires qui n'ont pas été pleinement identifiés.

Il existe en parallèle d'autres pistes, non fondées sur la géo-ingénierie, pour pallier le réchauffement climatique : développer les sources d'énergie non fossile (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.

C'est à nous habitants de la planète Terre de trouver des solutions, sinon la Nature règlera le problème toute seule, sans nous !

<sup>21</sup> BALDOCCHI D. & PENUÉLAS J. (2019), "The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems", *Glob. Chang. Biol.* 25, pp. 1191-1197.