



La géoingénierie pour combattre le réchauffement climatique: Un dilemme entre possibilités et risques

Les gaz à effet de serre rejetés par l'homme dans l'atmosphère sont la cause principale du réchauffement de la planète. En dépit d'efforts au niveau politique, l'évolution des émissions dans le monde marque une nette tendance à la hausse. Ceci incite à rechercher des moyens agissant rapidement contre le réchauffement et ses effets. La géoingénierie fait partie de ces approches.

L'idée de recourir à la technique moderne pour intervenir dans le processus des changements climatiques est très controversée. Une partie des scientifiques est fondamentalement opposée à cette idée, et son scepticisme n'est pas infondé: les méthodes de la géoingénierie comportent le danger de se détourner du véritable problème des gaz à effet de serre; elles impliquent en outre le risque de conséquences inattendues.

Mais il y a aussi des scientifiques qui reconnaissent pleinement les risques de la géoingénierie et qui s'engagent néanmoins pour la recherche dans ce domaine. Ils sont convaincus qu'il faut prendre en considération toutes les possibilités qui accroissent notre marge de manœuvre en matière de réduction des émissions et qu'il serait irresponsable de ne pas le faire. Au stade actuel, il n'est pas possible de porter un jugement définitif sur ces méthodes et leurs risques.

En 2006, Paul Crutzen, spécialiste de l'atmosphère et lauréat du Prix Nobel, a publié dans une revue de climatologie un article sur la possibilité de ralentir le réchauffement climatique en injectant des

aérosols de sulfate dans l'atmosphère. Crutzen est conscient des risques liés à des mesures de ce genre. Mais étant donné les progrès décevants de la politique climatique mondiale, il s'investit pour que les efforts destinés à étudier ces mesures ne soient pas tabouisés. Il souligne qu'elles ne devraient être mises en œuvre que si la volonté politique de la communauté internationale de réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre continuait de faire défaut. Le débat sur les méthodes de géoingénierie s'est fortement intensifié à la suite des propos de Crutzen.

La fertilisation des mers par des ajouts de fer pour promouvoir l'absorption de CO₂ par les organismes marins fait partie des méthodes de géoingénierie les plus connues et les plus discutées aujourd'hui, à côté de l'apport de grandes quantités d'aérosols de sulfate dans les couches supérieures de l'atmosphère, de l'intensification de la nébulosité au-dessus des océans, ou de l'installation dans l'espace de boucliers de protection solaire pour diminuer le rayonnement incident. Ces méthodes destinées à ralentir le réchauffement climatique sont expliquées ci-dessous et leurs avantages et inconvénients discutés.

Méthodes de géoingénierie

Sulfate de fer pour fertiliser les mers

L'idée de fertiliser la couche d'eau superficielle des mers avec du fer s'appuie sur la découverte que pour croître, les algues ont besoin de fer et de CO₂, qu'elles trouvent dans la couche d'eau de surface. En cas d'offre en fer insuffisante, un

apport de cet élément accélère la croissance des algues, et donc aussi leur consommation de CO₂. Le CO₂ soutiré de l'eau par les algues est en partie compensé par l'absorption de CO₂ atmosphérique (Jin et al., 2008). Ce qui peut conduire à une légère baisse de la teneur de l'atmosphère en CO₂ lorsque les algues meurent et sombrent au fond des mers. Une découverte ultérieure était l'idée de la fertilisation par le sulfate de fer comme moyen de réduire la teneur en CO₂ de l'atmosphère: l'apport de fer dans l'eau proche de la surface était sensiblement plus important pendant les périodes glaciaires et a conduit probablement à une croissance plus forte des algues. Il semble que ce processus a contribué à l'époque au recul du CO₂ dans l'atmosphère. Mais selon des études plus récentes, cette contribution est estimée être plutôt faible (p.ex. Parekh et al., 2007). L'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure à une absorption de carbone vraiment plus élevée; en revanche, il rend plausible des effets secondaires négatifs sur l'oxygène dissout, une modification des concentrations en gaz traces dans l'océan et une diminution de la biodiversité océanique. Aussi le comité scientifique de SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study) a-t-il exprimé clairement, en 2006 déjà, un avis défavorable sur la fertilisation des

océans à grande échelle (<http://solas-int.org/aboutsolas/organisationaandstructure/sciences-tercomm/sscmis/positionstatement.pdf>).

Des parasols dans l'espace

Une autre idée est d'installer des «parasols» dans l'espace, pour réduire l'énergie radiative parvenant à la Terre. L'Américain James T. Early avait proposé, en 1989 déjà, de déployer entre le Soleil et la Terre une voile solaire d'un diamètre de 2000 km (Early, 1989). Des variantes ultérieures de cette proposition suggéraient le recours à un grand nombre de plus petites voiles. En 1992, l'Académie nationale des sciences des Etats-Unis a présenté une variante comportant 55'000 voiles de 100 km² chacune, gravitant sur l'orbite de la Terre. L'utilisation de parasols «miniatures» (Angel, 2006), de 60 cm de diamètre, ferait monter le nombre nécessaire à 16 billions (16'000'000'000'000). Le transport de ces derniers à leur emplacement dans l'espace nécessiterait 20 millions de lancements de fusée. Les coûts de cette action sont estimés à quelques billions de dollars, sur une durée de vingt-cinq ans.

«Volcan permanent» artificiel

Comme indiqué plus haut, Paul Crutzen a fait, il y a à peine deux ans, des grands titres dans l'actualité scientifique en proposant d'imiter des

Définition et délimitation

La notion de géoingénierie désigne des tentatives à l'échelle planétaire visant à modifier sciemment la nature (Keith, 2001). Les mesures proposées n'ont pas nécessairement pour but de modifier visiblement l'environnement naturel. Elles peuvent aspirer aussi à conserver l'état actuel vis-à-vis d'influences humaines ou naturelles. Aujourd'hui, cette notion est utilisée fréquemment en relation avec les changements climatiques: la géoingénierie comme approche possible visant à influencer sur l'environnement naturel de manière à prévenir, atténuer ou au moins retarder le réchauffement global anthropique non désiré.

La géoingénierie n'est pas strictement délimitée par rapport à d'autres mesures contre les changements climatiques. Il est souvent fait la distinction entre les mesures d'atténuation des changements climatiques (mitigation) et les mesures d'adaptation à ces changements (adaptation). La notion de mitigation inclut notamment les efforts pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. La notion d'adaptation comprend les mesures visant à faire face aux conséquences des changements climatiques. Des exemples sont les mesures d'adaptation à la montée du niveau de la mer, aux changements du cycle de l'eau (p.ex. irrigation, protection contre les crues), ou encore la réorientation économique des régions de tourisme d'hiver.

Le domaine de la géoingénierie se situe entre les possibilités d'atténuation des changements climatiques et les mesures d'adaptation. Le captage et stockage du carbone (CSC), appelé aussi management industriel du carbone (MIC), se trouve également dans cette zone limite. Le CSC consiste à séparer de la fumée le CO₂ produit par des processus de combustions (p.ex. dans des centrales à charbon) et de le stocker dans le sol ou dans les grands fonds marins. Le dépôt du CO₂ dans des couches de sédiments, appelé séquestration du CO₂, doit empêcher que ce gaz ne parvienne dans l'atmosphère. Dans le présent document, cette méthode n'est pas attribuée au domaine de la géoingénierie, mais devrait être discutée dans une prochaine édition. Les techniques de CSC bénéficient d'un soutien beaucoup plus large que les procédés décrits dans ce texte.

éruptions volcaniques au moyen d'injections de soufre à grande échelle (Crutzen, 2006). Le fait que Crutzen, lauréat du Prix Nobel, soit connu pour ses recherches sur l'ozone et son engagement écologique n'est pas la moindre raison du très large écho que son idée a suscité dans le public. Les aérosols de soufre, qui parviennent jusqu'à de hautes couches de l'atmosphère (stratosphère au-dessus d'env. 10 km d'altitude) lors de fortes éruptions volcaniques, réfléchissent une partie de la lumière du Soleil et entraînent ainsi un refroidissement de la basse atmosphère et du sol. Les grandes éruptions volcaniques peuvent influencer la température globale pendant une longue période. L'éruption du Pinatubo par exemple, en 1991, a conduit dans le monde entier à une baisse de la température de quelque 0.25°C pendant deux ans. Se basant sur ce fait, Crutzen propose de ralentir le processus de réchauffement climatique à l'aide d'une «émission contrôlée d'aérosols de soufre». La quantité de soufre nécessaire se chiffrerait à plusieurs millions de tonnes par année, qu'il faudrait injecter dans la stratosphère inférieure au moyen de projectiles ou de ballon (Crutzen, 2006).

Système pour produire des stratocumulus marins

De vastes surfaces des océans sont couvertes par des stratocumulus. En réfléchissant la lumière du Soleil, ces nuages constituent un facteur significatif de refroidissement. D'où l'idée d'accroître cet effet au moyen de bateaux construits spécialement pour pulvériser de l'eau de mer en fines gouttelettes, les aérosols salins ainsi produits servant de noyaux de condensation pour des nuages supplémentaires (Salter and Latham, 2005).

Système de pompes pour brasser l'eau de mer

La proposition la plus récente (Lovelock and Rapley, 2007) vise à accroître l'absorption de CO₂ par les océans en brassant l'eau de mer. L'eau profonde, riche en substances nutritives, serait transportée vers la surface à l'aide d'un système de pompes basé sur une technique simple (de longs tubes flottant verticalement dans la mer). Cette fertilisation a pour but de promouvoir la croissance des algues, et donc l'absorption de CO₂ atmosphérique. Comme dans le cas de la fertilisation par le fer, les algues qui sombrent au fond des mers soutirent du cycle atmosphérique le CO₂ qu'elles ont fixé. Un effet supplémentaire est attendu de la floraison des algues: elle produit une substance, le sulfure de diméthyle, qui est un précurseur de particules d'aérosols. Celles-ci

peuvent servir de noyaux de condensation pour la formation de nuages dans l'atmosphère. Une conséquence serait, dans ce cas aussi, la réflexion d'une partie de la lumière du Soleil et, partant, la diminution du rayonnement incident à la surface de la Terre.

L'évaluation par le rapport du GIEC

Les propositions en matière de géoingénierie suscitent parmi les scientifiques un débat qui reflète le dilemme entre l'inquiétude au sujet du réchauffement climatique et le scepticisme à l'égard des possibilités techniques et de leurs risques.

Le jugement que le GIEC porte sur les techniques proposées est dans l'ensemble empreint de scepticisme (Barker T. et al., 2007). Cela tient au caractère spéculatif de ces dernières et aux nombreux effets secondaires qui n'ont pas encore été étudiés. En outre, il n'existe pas d'estimations détaillées des coûts ni de cadre institutionnel pour la mise en œuvre de ces techniques. En ce qui concerne les méthodes qui ne conduisent pas à une réduction de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (p.ex. parasols ou introduction d'aérosols dans l'atmosphère), le GIEC précise qu'elles n'atténuent pas les risques d'effets négatifs de la concentration accrue de CO₂, tels que surtout l'acidification croissante des océans.

Frein de secours pour le climat...

Le principal argument en faveur des méthodes de géoingénierie est fourni par la politique climatique elle-même: les efforts de réduction se déploient trop lentement, les progrès dans la maîtrise du problème sont trop minces, l'appétit d'énergie de pays émergents comme la Chine et l'Inde est trop grand. La déception à l'égard de la politique internationale, qui ne réagit pas de manière appropriée au problème du réchauffement planétaire, est aussi la raison majeure de l'engagement de Crutzen. Celui-ci considère les options techniques non pas comme alternative aux réductions d'émission, mais comme complément aux mesures de diminution des émissions.

Il existe de sérieuses réserves sur le plan de l'éthique – qui prendra la décision de recourir à de telles mesures? qui assumera la responsabilité d'effets secondaires qui peuvent être différents d'une région à l'autre et toucher plus ou moins fortement différents pays? Un argument essentiel pour explorer les méthodes techniques est qu'il n'est pas certain que la réduction du

CO₂ puisse être atteinte, ceci même s'il existe une volonté politique en ce sens. Des manipulations techniques pourraient être considérées comme mesures de transition, qui ne pourraient conduire à une solution du problème climatique que combinées avec des efforts de réduction. Une partie de ceux qui souscrivent à la recherche sur la géoingénierie ne voit dans ces méthodes qu'une planche de salut à laquelle il ne faudrait recourir que pour accroître la marge de manœuvre en matière de scénarios d'émission et pour empêcher les conséquences les plus graves du changement climatique.

Mais il y a aussi des partisans qui considèrent la géoingénierie comme substitut aux mesures de politique climatique. Ils argumentent que des moyens techniques permettraient de stopper le réchauffement sans qu'il faille prendre des mesures radicales de réduction du CO₂. Il serait possible ainsi d'éviter un changement de notre style de vie et les éventuelles restrictions corrélatives. Cette vue des choses ne tient toutefois pas compte du fait que la dépendance à l'égard du pétrole est discutable en raison des risques géopolitiques ainsi que, à moyen et long terme, des limites des ressources fossiles.

Si la géoingénierie n'est pas considérée seulement, par ses partisans, comme alternative à un changement fondamental, c'est que la société ne veut pas d'une telle mutation. Ils soulignent aussi que des solutions techniques pourraient être réalisées à bien moindre coût que la réduction massive de CO₂ requise. Il est toutefois incertain que cet argument tienne la route si on l'examine de près. La variante «parasols», par exemple, nécessiterait des moyens financiers gigantesques. L'investissement de départ serait certes plus modeste pour d'autres mesures de géoingénierie, mais il faut prendre en compte les coûts que requerrait par la suite le maintien des mesures. Les coûts nets de solutions techniques ne doivent donc pas être sous-estimés. A quoi s'ajoutent éventuellement des effets secondaires onéreux.

...ou dangereuse expérience?

Ne serait-il pas rassurant d'avoir une planche de salut? Qu'est-ce qui parle contre une telle option? Les adversaires de la géoingénierie, qui désapprouvent souvent même les efforts de recherche dans ce domaine, craignent que la perspective d'une planche de salut puisse être un frein à la politique climatique. Ils relèvent que la perspective du recours possible à une

solution de facilité affaiblirait à elle seule déjà fortement la pression pour abaisser les émissions de gaz à effet de serre. Les efforts en vue de changements fondamentaux, par exemple en matière de consommation d'énergie et de durabilité de notre approvisionnement énergétique, risqueraient de s'enliser.

Des méthodes de géoingénierie qui n'entraînent pas une réduction de la concentration de CO₂ dans le système atmosphère-océan présentent l'inconvénient que les effets négatifs de concentrations de CO₂ accrues persistent, notamment l'acidification des océans, jugée très problématique (The Royal Society, 2005). Même sans augmentation de la température, une teneur accrue en CO₂ a des effets lourds de conséquence sur l'écosystème marin. Le caractère de durabilité des méthodes visant à fixer du CO₂ par des organismes marins pour le déposer au fond de la mer (fertilisation au moyen de sulfate de fer, systèmes de pompes pour faire circuler l'eau de mer) est aussi incertain. Car en fin de compte, ces techniques ne diminuent pas la quantité totale de dioxyde de carbone dans le système océan-atmosphère-terres émergées, et il est difficile aujourd'hui, ou même tout à fait impossible, de savoir si la sûreté du dépôt sera garantie dans les conditions qui régneront à l'avenir.

Des arguments éthiques jouent également un rôle en ce qui concerne la recherche de mesures techniques et leur application potentielle. Le recours à la géoingénierie obligera des générations futures à poursuivre ces mesures et à les payer. Car toutes les méthodes décrites nécessitent de répéter ou maintenir les mesures en permanence. Un arrêt subit pourrait entraîner une hausse de la température encore plus rapide que celle observée aujourd'hui (Matthews and Caldeira, 2007).

A part ces arguments, dirigés contre la géoingénierie en général, toutes les méthodes décrites ont encore des effets secondaires individuels:

Par exemple, l'apport d'*engrais ferreux* entraîne une diminution de la teneur en oxygène des couches profondes de l'océan, vu que le carbone organique exporté de la surface vers ces couches se décompose. Dans certaines régions, cette diminution peut conduire à des conditions hypoxiques, c'est-à-dire à de très basses concentrations d'oxygène qui ne suffisent plus pour de nombreux poissons et autres organismes supérieurs. La décomposition accrue de matériel organique et les faibles concentrations en oxygène conduisent à une forte augmentation

de la production de gaz hilarant (N₂O) dans la mer, qui parvient ensuite dans l'atmosphère (Jin et Gruber, 2003). Le N₂O étant un gaz à effet de serre 200 fois plus puissant que le CO₂, ce processus peut entraîner finalement un réchauffement encore plus important. En outre, l'apport d'engrais ferreux modifie les écosystèmes marins dans une mesure et d'une manière encore largement inconnues.

Dans le cas de la *variante parasols*, les aspects manifestement problématiques sont l'aggravation du problème existant des déchets spatiaux ainsi que la question de savoir ce qu'on fera des voiles solaires quand elles seront en fin de vie.

L'introduction de particules de soufre dans l'atmosphère pourrait certes diminuer ou arrêter la montée de la température en moyenne globale. En revanche, des changements sont probables en matière de précipitations, comme Trenberth et Dai (2007) l'ont montré sur la base d'une étude de l'impact d'une éruption volcanique qui a conduit par endroits à des sécheresses. De plus, une augmentation constante de la concentration en aérosols dans la stratosphère pourrait entraîner des pertes d'ozone et donc affaiblir la couche d'ozone qui nous protège du dangereux rayonnement ultraviolet.

Quels impacts un *renforcement des stratocumulus marins* aurait sur la météorologie et la dynamique de l'atmosphère globale n'a encore fait l'objet d'aucune recherche. Il n'est pas possible pour l'heure d'évaluer ni d'exclure un danger de changements météorologiques ou climatiques également au-dessus des continents.

Quant au brassage de l'eau de mer par un *système de pompes*, il n'entraînerait qu'une très faible absorption nette de CO₂ atmosphérique. Car à part les substances nutritives, du CO₂ serait également transporté des profondeurs vers la surface et fixé prioritairement, ce qui réduirait fortement le besoin de capter ce gaz dans l'atmosphère. Cette mesure aurait donc une efficacité extrêmement limitée. Il est même possible qu'elle fasse effet contraire. Si la croissance des algues était moins forte qu'espéré (p.ex. en raison d'une limitation par le fer), le CO₂ pompé vers la surface s'échapperait dans l'atmosphère et activerait les changements climatiques.

En plus de ces inconvénients déjà connus, les méthodes de géoingénierie recèlent le risque de conséquences imprévisibles, du fait de la compréhension limitée que l'on a du système climatique global et de ses interactions avec les écosystèmes de la planète. Ce risque devrait

être pris en compte dans la comparaison avec d'autres mesures, à côté des effets secondaires déjà évaluables.

Conclusion

Il ressort du débat sur la géoingénierie que la confiance en la volonté et possibilité d'imposer des mesures politiques radicales de réduction des émissions est limitée. Les partisans de la recherche sur la géoingénierie argumentent sur les maigres progrès de la politique climatique. Les opposants craignent que l'étude théorique de «solutions techniques» puisse freiner encore davantage le processus politique.

Des mesures restrictives en politique climatique sont rejetées par peur de limitations – par exemple en matière de mobilité – et d'une diminution de la qualité de vie. Nombre de pays du tiers monde craignent aussi que de telles mesures ne fassent obstacle à leur développement et à l'amélioration de leurs moyens d'existence. L'acceptation par la société de mesures de politique climatique ne peut être obtenue que si les changements nécessaires sont perçus non pas comme une mise sous tutelle, mais comme une chance.

À part l'acceptation sociale, la question du coût des mesures de politique climatique joue aussi un rôle décisif. Il ne faut pas oublier que les méthodes de géoingénierie sont chères, non seulement en ce qui concerne leur réalisation technique, mais aussi en rapport avec leurs effets secondaires pas encore étudiés. Vu qu'aucune de

Personnes de contact pour renseignements:

Prof. Nicolas Gruber
EPF Zurich, Institut de biogéochimie et dynamique des polluants, CHN E 21.1, Universitätstrasse 16, 8092 Zurich
Tél.: 044 632 03 52, fax: 044 632 16 91
e-mail: nicolas.gruber@env.ethz.ch

Prof. Fortunat Joos
Institut de physique, Département de climatologie et physique de l'environnement, Université de Berne, Sidlerstr. 5, 3012 Berne
Tél. 031/631 44 61, fax: 01/631 87 42,
e-mail: joos@climate.unibe.ch

Prof. Thomas Peter
EPF Zurich, Institut de recherche sur l'atmosphère et le climat, CHN O 12.1, Universitätstrasse 16, 8092 Zurich
Tél. 044 633 27 56, fax: 044 633 10 58
e-mail: thomas.peter@env.ethz.ch

ces méthodes ne résout le véritable problème du réchauffement climatique, elles ne vont pas dans le sens du développement durable. La question se pose donc de savoir quels effets l'on obtiendrait en investissant un montant du même ordre dans des mesures de politique climatique.

A l'heure actuelle, il n'est pas possible de porter un jugement définitif sur les concepts de solutions techniques. Des efforts de recherche et les données scientifiques qui en résulteraient permettraient de mieux évaluer les coûts et les risques, notamment si l'accent ne portait pas

seulement sur la faisabilité et l'efficacité, mais aussi sur de possibles effets secondaires et conséquences à long terme. Les expériences faites jusqu'ici en matière d'intervention de l'homme dans des systèmes complexes justifient une forte dose de scepticisme à l'égard de la géoingénierie. Actuellement, il n'est possible d'évaluer l'ampleur des conséquences d'aucune de ses méthodes. Aussi l'espoir en une telle solution de fortune ne doit d'aucune manière influencer la mise en œuvre d'une politique climatique efficace.

Bibliographie

Fertilisation des mers au moyen de sulfate de fer

Parekh P., Joos F., and Müller S.A. (2007): The role of aeolian iron flux in controlling carbon dioxide fluctuations during Antarctic warm events. *Paleoceanography*, submitted.

Jin X., Gruber N., Frenzel H., Doney S.C. and McWilliams J.C. (2008). The impact on atmospheric CO₂ of iron fertilization induced changes of the biological pump, *Biogeosciences*, in press.

Jin X. and Gruber N. (2003): Offsetting the radiative benefit of ocean iron fertilization by enhancing N₂O emissions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 24, 2249, doi:10.1029/2003GL018458.

Parasols dans l'espace

Angel R. (2006): Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 103, No. 46, p. 17184–17189.

Early James T. (1989): Space-Based Solar Shield to Offset Greenhouse Effect, *J. Brit. Interplanetary Soc.*, 42, p. 567–69.

Injections de soufre dans l'atmosphère

Crutzen P. (2006): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-006-9101-y.

Trenberth K.E. and Dai A. (2007): Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L15702, doi:10.1029/2007GL030524.

Renforcement des stratocumulus marins

Salter S.H., und Latham J., (2007): The reversal of global warming by the increase of the albedo of marine stratocumulus cloud. In: *Engineering and Technology*, August 2007, 28–31, siehe <http://www.see.ed.ac.uk/%7Eshs/Global%20warming/Albedo%20control/ET%20geo-eng.pdf>.

Brassage de l'eau de mer

Lovelock J.E. and Rapley C.G. (2007): Ocean pipes could help the Earth to cure itself, *Nature*, Vol. 49, No 27, p. 403.

Information de base / prises de position

Keith D.W. (2001): Geoengineering and carbon management: Is there a meaningful distinction? *Greenhouse Gas Control Technologies: Proceedings of the 5th International Conference*. Williams D., Durie B., McMullan P., Paulson C. and Smith A. eds., CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, p. 1192–1197.

Barker T. et al. (2007): Mitigation from a cross-sectoral perspective. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 624–625.

The Royal Society (2005): Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. *Royal Society Policy Document 12/05*.

Matthews H.D. and Caldeira K. (2007): Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 104, No. 24, p. 9949–9954.