

Géo-ingénierie et gestion du rayonnement solaire

Par Anni MÄÄTTÄNEN

LATMOS/IPSL, Sorbonne Université, UVSQ Université Paris-Saclay, CNRS

La géo-ingénierie solaire vise à refroidir le climat par la diminution du rayonnement solaire entrant dans le système climatique *via* la modification de la réflectivité (albédo) de la Terre. Pour ce faire, il a été proposé d'augmenter l'albédo des nuages, de peindre des surfaces en blanc ou d'injecter des particules réfléchissantes dans la stratosphère. La recherche sur ces sujets est active et s'appuie principalement sur des travaux de modélisation numérique. L'application potentielle de ces méthodes soulève des questions sur leur faisabilité technologique, leurs effets secondaires, les incertitudes qui pèsent sur elles, la gouvernance et l'éthique d'interventions de ce type. Dans cet article, nous passons en revue les méthodes de gestion du rayonnement solaire.

Introduction

La gestion du rayonnement solaire (GRS) n'est pas une technique d'atténuation mais d'adaptation au changement climatique. Elle ne vise pas à réduire directement la concentration du CO₂ dans l'atmosphère pour réduire l'effet de serre. Elle vise à moduler la quantité de rayonnement solaire absorbé par le système Terre (voir la Figure 1 ci-dessous).

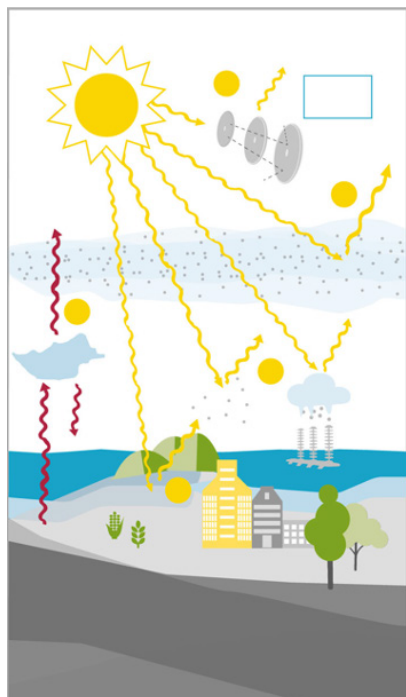


Figure 1 : Illustration schématique des techniques de gestion du rayonnement solaire. Illustration adaptée de la figure 1 de Lawrence *et al.* (2018), utilisée sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

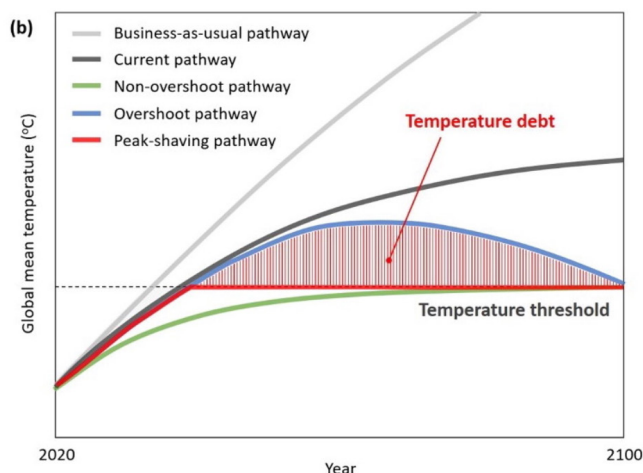


Figure 2 : Illustration des changements potentiels de température d'ici à 2100 suivant différents scénarii d'émissions. La courbe rouge correspond à un scénario prévoyant l'implémentation temporaire de GRS pour empêcher le dépassement d'un certain seuil de température. Illustration créée à partir de la figure 1b d'Asayama & Hulme (2019), utilisée sous licence CC BY NC ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Les derniers rapports du GIEC indiquent qu'à elle seule, la réduction des émissions est insuffisante pour limiter le réchauffement climatique à une hausse de température tolérable (estimée à 1,5°C ou 2°C), et qu'il sera donc nécessaire d'extraire du CO₂ directement de l'atmosphère (Negative Emission Technologies, NETs). Il a été proposé (Budyko, 1977) l'option qu'il serait possible d'induire un refroidissement rapide du climat en augmentant provisoirement la réflectivité (albédo) de la Terre d'une façon artificielle. Une telle intervention permettrait d'avoir plus de temps pour obtenir une réduction de la concentration en gaz à effet de serre et empêcher un dépassement temporaire d'une température seuil, considérée néfaste pour le système Terre (voir la Figure 2 ci-dessus). Une analogie

naturelle correspond aux effets des grandes éruptions volcaniques qui peuvent engendrer un refroidissement global temporaire (-1°C pendant un an). L'éruption de Pinatubo en 1991 en est un exemple récent.

Par conséquent, et face à l'urgence climatique, ces techniques sont aujourd'hui de plus en plus discutées, non pas comme une alternative aux NETs mais en complément de ceux-ci si l'augmentation de la température semblait ne plus être sous contrôle. Dans le même temps, les études sur les techniques de gestion du rayonnement solaire restent assez théoriques. Celles-ci sont principalement basées sur des modèles climatiques, dont les projections sont incertaines et difficilement vérifiables.

La faisabilité de ces méthodes et nos capacités technologiques sont un sujet à la mode, mais la discussion en reste au niveau théorique en l'absence d'essais de déploiement. De tels essais sont pour le moment impossibles, même à petite échelle, à cause des grandes incertitudes que ces techniques de GRS soulèvent, de l'absence de gouvernance, de questions éthiques et de la perception de la nature controversée de ces techniques par le grand public. Le lancement d'un ballon stratosphérique de recherche à Kiruna, en Suède, a été annulé en 2021 en raison de l'opposition locale. Les lancements de ce type sont fréquents. La particularité de ce vol était qu'il avait pour objectif de

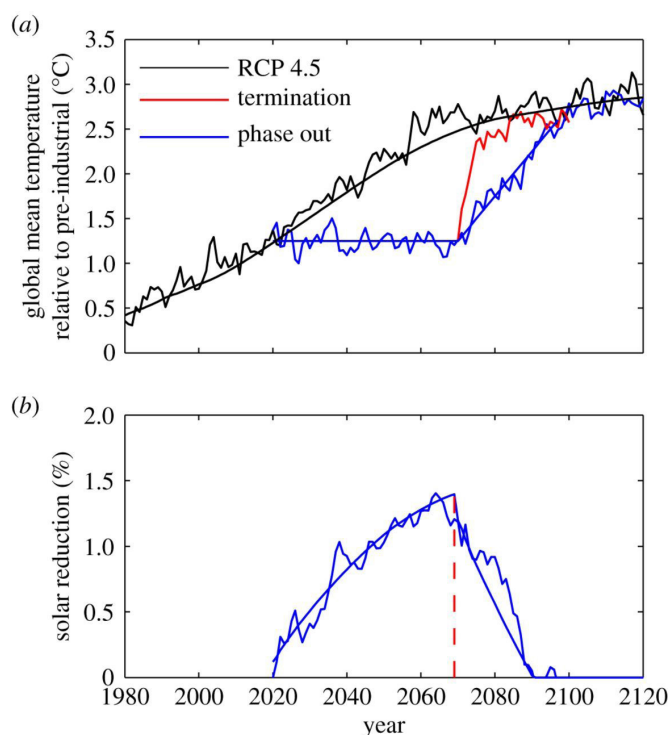


Figure 3 : Illustration de l'utilisation de la GRS et de son arrêt graduel et contrôlé (courbe bleue) par un modèle climatique. La courbe rouge représente un arrêt brutal de GRS, lequel serait suivi par une montée abrupte de la température. La courbe noire correspond à la projection de l'évolution de la température selon un scénario d'émissions futures (RCP4.5) sans GRS. Panel a : température moyenne globale modélisée. Panel b : réduction du rayonnement solaire par l'effet de la GRS (en pourcentage). Illustration réalisée à partir de la Figure 7 de MacMartin *et al.* (2014), utilisée sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

réaliser un test technique d'un équipement visant à servir dans le futur à une expérience de GRS (le projet SCoPEX : <https://www.keutschgroup.com/scopex>). C'est pour cette raison que les Sames (le peuple autochtone du Sápmi, en Laponie) et les organisations environnementales se sont opposés au vol. La GRS est souvent présentée comme peu coûteuse et facile à mettre en place : en réalité, très peu d'acteurs ont les capacités technologiques nécessaires pour réussir un déploiement à grande échelle. Enfin, un déploiement de la GRS nécessite aussi la planification de la gestion de la cessation de sa mise en œuvre. Un arrêt soudain de la GRS dans un monde où la concentration atmosphérique du CO_2 resterait élevée, pourrait conduire à une augmentation extrêmement rapide et néfaste de la température (voir la Figure 3 ci-contre).

Dans cet article, nous présentons un résumé des différentes techniques de GRS, nous discutons de leur impact possible et mentionnons l'intérêt croissant que suscitent actuellement la GRS et sa gouvernance.

Techniques proposées en matière de gestion du rayonnement

Gestion du rayonnement solaire

Dans cet article, nous traiterons des techniques de GRS basées sur la modification de l'albédo de l'atmosphère ou de la surface de la Terre : injection dans la stratosphère (au-dessus de 15 km d'altitude) de particules réfléchissantes, augmentation de l'albédo des nuages bas (marins). Nous ne traiterons pas en détail la transformation des surfaces sombres (bâtiments, routes, etc.) en surfaces réfléchissantes, car l'effet climatique de cette technique a été estimé insuffisant ($\ll 1 \text{ W/m}^2$) pour un coût très élevé (plusieurs centaines de milliers de dollars par an, selon la Royal Society (2009)). De la même façon, nous n'évoquerons pas la technique de la déflexion du rayonnement solaire dans l'espace, ce qui nécessiterait le déploiement de miroirs ou d'autres objets réfléchissants placés en orbite entre la Terre et le Soleil et aurait donc un coût prohibitif.

Une autre technique, qui vise plutôt à augmenter l'émission de chaleur vers l'espace depuis l'atmosphère au lieu de modifier l'albédo, est aujourd'hui étudiée surtout dans le cadre de la réduction de l'impact climatique du secteur de l'aviation. Cette technique vise à supprimer les nuages à haute altitude, lesquels sont composés des cristaux de glace, qui sont générés naturellement mais aussi par les avions (les « traînées de condensation ») et dont l'effet climatique net est plutôt un réchauffement. Réduire ou supprimer ces nuages permettrait à l'émission thermique de la Terre de s'échapper plus efficacement vers l'espace, et de s'accompagner d'un refroidissement climatique. Cette méthode ne relève pas strictement de la gestion du rayonnement solaire, parce qu'elle agit principalement sur le rayonnement thermique de la Terre, même si elle est très souvent classée dans la catégorie GRS. On pourrait donc parler plus généralement de la gestion du rayonnement (comme l'illustrent les titres des sections suivantes).

Modification du rayonnement arrivant dans l'atmosphère

Injections stratosphériques de soufre ou de particules réfléchissantes

Les grandes éruptions volcaniques ont un effet refroidissant sur le climat. Elles injectent des gaz et des particules dans la moyenne atmosphère (stratosphère, entre 10 et 50 km d'altitude), qui créent une couche fine qui reflète le rayonnement solaire vers l'espace. L'idée d'injecter du SO_2 dans la stratosphère pour refroidir le climat a déjà été proposée dans les années 1970 (Budyko, 1977). Le SO_2 réagit chimiquement pour former de l'acide sulfurique qui, ensuite, se condense rapidement et forme en solution avec l'eau des petites gouttelettes réfléchissantes. Dernièrement, d'autres types de particules (CaCO_3 , TiO_2) ont aussi été discutées, le but étant de trouver un composé très réfléchissant mais chimiquement peu réactif, les aérosols soufrés pouvant contribuer à la destruction de la couche d'ozone.

Augmentation de l'albédo des nuages bas (marins)

Les nuages bas, qui sont fréquents et persistent surtout au-dessus des zones marines froides, sont des réflecteurs relativement efficaces. Augmenter leur albédo permettrait d'augmenter leur effet refroidissant sur le climat. En pratique, cela serait possible en changeant les propriétés des gouttelettes composant le nuage.

Un nuage est plus réfléchissant si, au lieu d'être composé d'une petite quantité de grandes gouttelettes, il en contient une grande quantité (« l'effet de Twomey »). Cet effet peut être généré en ensemençant le nuage avec des petites particules (dites « noyaux de condensation ») sur lesquelles l'eau se condense. Par exemple, le sel de mer est un noyau de condensation assez efficace, d'où l'intérêt d'ensemencer des nuages marins en injectant de l'eau de mer dans l'atmosphère. L'eau de mer s'évapore dans l'atmosphère, laissant en suspension une grande quantité de sel marin. Quand un nuage se forme dans une région ensemencée, le sel marin génère un grand nombre de petites gouttelettes, donnant lieu à la formation d'un nuage à plus haute réflectivité. Les grandes zones de nuages marins se trouvent dans l'océan Pacifique, sur les côtes ouest de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, et dans l'océan Atlantique, sur la côte ouest de l'Afrique. Mais cette technique peut, en théorie, être déployée partout sur la planète.

Gestion du rayonnement infrarouge, à travers l'amincissement des nuages de glace présents dans la haute troposphère

Le rayonnement infrarouge ou thermique émis par la Terre permet de la refroidir. Une méthode de gestion du rayonnement propose donc d'amincir ou de faire disparaître les nuages de glace dans la haute troposphère, ce qui permettrait à l'émission thermique émise principalement par la surface de la Terre et des basses couches de l'atmosphère de quitter plus efficacement le système terrestre.

Les nuages de glace – les cirrus (de formation naturelle) et les traînées de condensation (formées par les avions) – se forment dans les conditions froides de la haute troposphère, entre 10 et 15 km d'altitude environ. Les actions proposées sur ces deux types de nuages sont différentes, parce que les uns (les cirrus) sont naturels et les autres (les traînées) artificiels. La formation naturelle des cirrus ne peut pas être empêchée. Mais par l'injection de noyaux de condensation, on peut augmenter la taille des cristaux de glace qui, par conséquent, sédimentent rapidement et disparaissent. Les traînées de condensation résultent de la perturbation générée par un avion traversant une zone dont les conditions de température et d'humidité sont propices à leur formation. Une solution simple consiste à optimiser les trajectoires des avions pour éviter ces zones. L'effet climatique de l'aviation pourrait être fortement diminué (Lee *et al.*, 2021), si la formation des traînées pouvait être évitée.

Comment estimer l'impact potentiel de la gestion du rayonnement ?

Les méthodes décrites *supra* ne sont pas uniquement des idées théoriques, mais elles ont surtout été étudiées en recourant à des outils de modélisation climatique et atmosphérique. Depuis quinze ans, le corpus de littérature scientifique relatif à la GRS s'est considérablement étoffé. De grands projets et collaborations de modélisation ont été mis en place et ont fourni une quantité importante de données sur les effets des méthodes de GRS (par exemple, GeoMIP : KRAVITZ *et al.*, 2011 ; ou GLENS : TILMES *et al.*, 2018).

Comme dans la modélisation climatique qui vise à nous renseigner sur le futur probable du climat de notre planète, les modèles climatiques peuvent être utilisés dans l'objectif de fournir des estimations sur l'effet potentiel des méthodes de GRS. Les modèles sont des représentations imparfaites de la réalité et, par conséquent, leurs résultats sont indicatifs et incluent des incertitudes. De surcroît, le bon fonctionnement des modèles dans des conditions climatiques bien connues (car mesurées) du passé ne garantit pas leur véracité dans un futur inconnu. Pour améliorer la fiabilité des modèles, il faut les comparer aux observations ; or, nous n'avons pas de données expérimentales sur les techniques de GRS. Les expériences grandeur nature sont difficiles à conduire, du fait qu'elles constitueraient quasiment un déploiement de la GRS. En outre, elles soulèvent plein de questions sur le plan des risques et de l'éthique. Par conséquent, la communauté scientifique base pour le moment ses études sur des modèles climatiques dont les résultats ne seront vérifiables que dans le futur.

L'effet climatique potentiel des différentes techniques de GRS est, selon les études de modélisation, de l'ordre de 1 à 10 Wm^{-2} (IPCC, 2021). Ces chiffres montrent qu'en théorie, les techniques de GRS pourraient contrer le forçage radiatif anthropogénique tel que constaté aujourd'hui (il est actuellement d'environ 2,7 Wm^{-2}). Par ailleurs, les résultats de modélisation montrent aussi que l'effet sur la température dépend de la méthode employée ; des changements saisonniers et régionaux

non négligeables sont à prévoir (par exemple, une modification des précipitations régionales, comme des épisodes de mousson) à la suite d'un déploiement de la GRS. En outre, des changements plus subtils, par exemple, au niveau des puits de CO₂ (la biosphère) ou du cycle de l'eau, sont possibles. Il est important de noter que la GRS n'aura pas d'effet sur l'acidification des océans.

Capacité technologique et coût

Plusieurs techniques d'injection stratosphérique ont été proposées : recours à des avions, des fusées, des canons, par le canal de cheminées... La technique la plus réaliste reste l'injection au moyen d'avions ; il en existe d'ailleurs qui sont conçus pour voler dans la stratosphère. Par contre, il n'est pas évident de pouvoir se doter d'une flotte conséquente dans ce but et de la maintenir pendant des années, voire des décennies. Tout aussi difficile est de mettre en place le trafic aérien nécessaire pour injecter une grande quantité de substances réfléchissantes dans la stratosphère. Le coût a été estimé entre 1 et 15 milliards de dollars par an, selon le niveau de refroidissement souhaité (NASEM, 2021).

Pour augmenter l'albédo des nuages bas marins, ont été proposés des concepts de bateaux automatisés qui injecteraient de l'eau de mer dans l'atmosphère. Il n'y a pas d'estimation publiée du coût de cette méthode, mais le coût pourrait atteindre le niveau de celui de l'injection stratosphérique si l'objectif est un refroidissement global (soit quelques milliards de dollars par an). Pour des actions plus locales, le coût serait bien évidemment moins élevé (NASEM, 2021).

Des institutions s'emparent du sujet et de nouvelles questions se font jour

Les dernières années ont vu la multiplication des rapports sur ce sujet et l'implication d'institutions déjà fortement mobilisées face au changement climatique. La Royal Society et le National Research Council ont publié des rapports importants sur la géo-ingénierie (Royal Society, 2009 ; NRC, 2015a et 2015b). En France, l'ANR a financé un atelier et un rapport prospectif sur la géo-ingénierie (Boucher *et al.*, 2014). Le cinquième (IPCC, 2013) et le sixième rapport du GIEC (IPCC, 2021) mentionnent les différentes techniques de gestion du rayonnement solaire. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine a publié en 2021 un rapport faisant des recommandations sur la recherche sur la GRS et sa gouvernance. Ce rapport propose une feuille de route possible pour un financement à moyen terme de la recherche sur la GRS et formule des recommandations à suivre pour la conduite de cette recherche et de son évaluation. Le recours à la géo-ingénierie est un sujet qui monte en puissance dans la communauté scientifique (au sens large, allant des sciences de la nature aux sciences humaines et sociales), et également dans les discussions politiques.

La question de sa gouvernance se pose, avec tous les enjeux éthiques associés. Une communication transpa-

rente et efficace des scientifiques à destination des décideurs est nécessaire mais non suffisante. Il convient d'appréhender les risques, de souligner les incertitudes et d'embrasser toute la complexité du système climatique, qui va bien au-delà de ses seuls déterminants physiques. Le terme de « géo-ingénierie », qui relève d'une approche techniciste visant à contrôler le climat terrestre, est de ce point de vue critiquable. L'expression d'« intervention climatique », qui souligne les limites de notre action et relève plus du registre médical, sur le mode d'une médecine d'urgence, lui est certainement préférable.

Bibliographie

- ASAYAMA S. & HULME M. (2019), "Engineering climate debt: temperature overshoot and peak-shaving as risky subprime mortgage lending", *Climate Policy* 19:8, pp. 937-946, doi: 10.1080/14693062.2019.1623165.
- BOUCHER O., DE GUILLEBON B., ABBADIE L., BARRE P., BEKKI S., BENSUAUDE-VINCENT B., BLAINS., BONNELLE D., CIAIS P., CLIN F., DAHANA., DANGEARD M.-L., DE RICHTER R., DORRIES M., DUMERGUES L., FISSET B., GASSER T., GEMENNE F., GODIN-BEEKMANN S., GUILLAUME B., HA-DUONG M., LAPERRELLE J.-M., MAUGIS P., MONTOUT D., PERRET P., QUEGUINER B., SALAS Y MELIA D., TROLARD F., VAN HEMERT M., VESINE E. & VIDALENC E. (2014), « Atelier de réflexion prospective REAGIR. Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement », rapport final, mai, <https://anr.fr/fileadmin/documents/2016/Rapport-final-ARP-REAGIR-mai-2014.pdf>
- BUDYKO M. I. (1977), *Climatic changes*, American Geophysical Union.
- CALDEIRA K. & BALA G. (2017), "Reflecting on 50 years of geoengineering research", *Earth's Future* 5, pp. 10-17, doi:10.1002/2016EF000454.
- IPCC (2013), "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", auteurs : STOCKER T. F., QIN D., PLATTNER G.-K., TIGNOR M., ALLEN S. K., BOSCHUNG J., NAUELSA., XIAY., BEX V. and MIDGLEY P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, États-Unis, 1535 pages.
- IPCC(2021), "ClimateChange2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", auteurs : MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇI O., YU R. and ZHOU B. (eds.), Cambridge University Press, In Press.
- KRAVITZ B., ROBOCK A., BOUCHER O., SCHMIDT H., TAYLOR K. E., STENCHIKOV G. & SCHULTZ M. (2011), "The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)", *Atmosph. Sci. Lett.* 12, pp. 162-167, <https://doi.org/10.1002/asl.316>
- LAWRENCE M. G., SCHAFFER S., MURI H., SCOTT V., OSCHLIES A., VAUGHAN N. E., BOUCHER O., SCHMIDT H., HAYWOOD J. & SCHEFFRAN J. (2018), "Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals", *Nat. Commun* 9, 3734, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- LEE D. S., FAHEY D. W., SKOWRON A., ALLEN M. R., BURKHARDT U., CHEN Q., DOHERTY S. J., FREEMAN S., FORSTER P. M., FUGLESTVEDT J., GETTELMANA., DELEON R. R., LIM L. L., LUND M. T., MILLAR R. J., OWEN B., PENNER

J. E., PITARI G., PRATHER M. J., SAUSEN R. & WILCOX L. J. (2021), "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018", *Atmos. Env.* 244,117834, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

MACMARTIN D. G., CALDEIRA K. & KEITH D. W. (2014), "Solar geoengineering to limit the rate of temperature change", *Phil. Trans. R. Soc. A.* 372 20140134 20140134, <http://doi.org/10.1098/rsta.2014.0134>

NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2021), "Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance", Washington DC, The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/25762>

National Research Council (2015a), "Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth", Washington DC, The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/18988>

National Research Council (2015b), "Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration", Washington DC, The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/18805>

The Royal Society (2009), "Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty", RS Policy document 10/09, September, RS1636, ISBN: 978-0-85403-773-5.

TILMES S., RICHTER J. H., KRAVITZ B., MACMARTIN D. G., MILLS M. J., SIMPSON I. R., GLANVILLE A. S., FASULLO J. T., PHILLIPS A. S., LAMARQUE J., TRIBBIA J., EDWARDS J., MICKELSON S. & GHOSH S. (2018), "CESM1(WACCM) Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble Project", *Bulletin of the American Meteorological Society* 99(11), pp. 2361-2371, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0267.1>