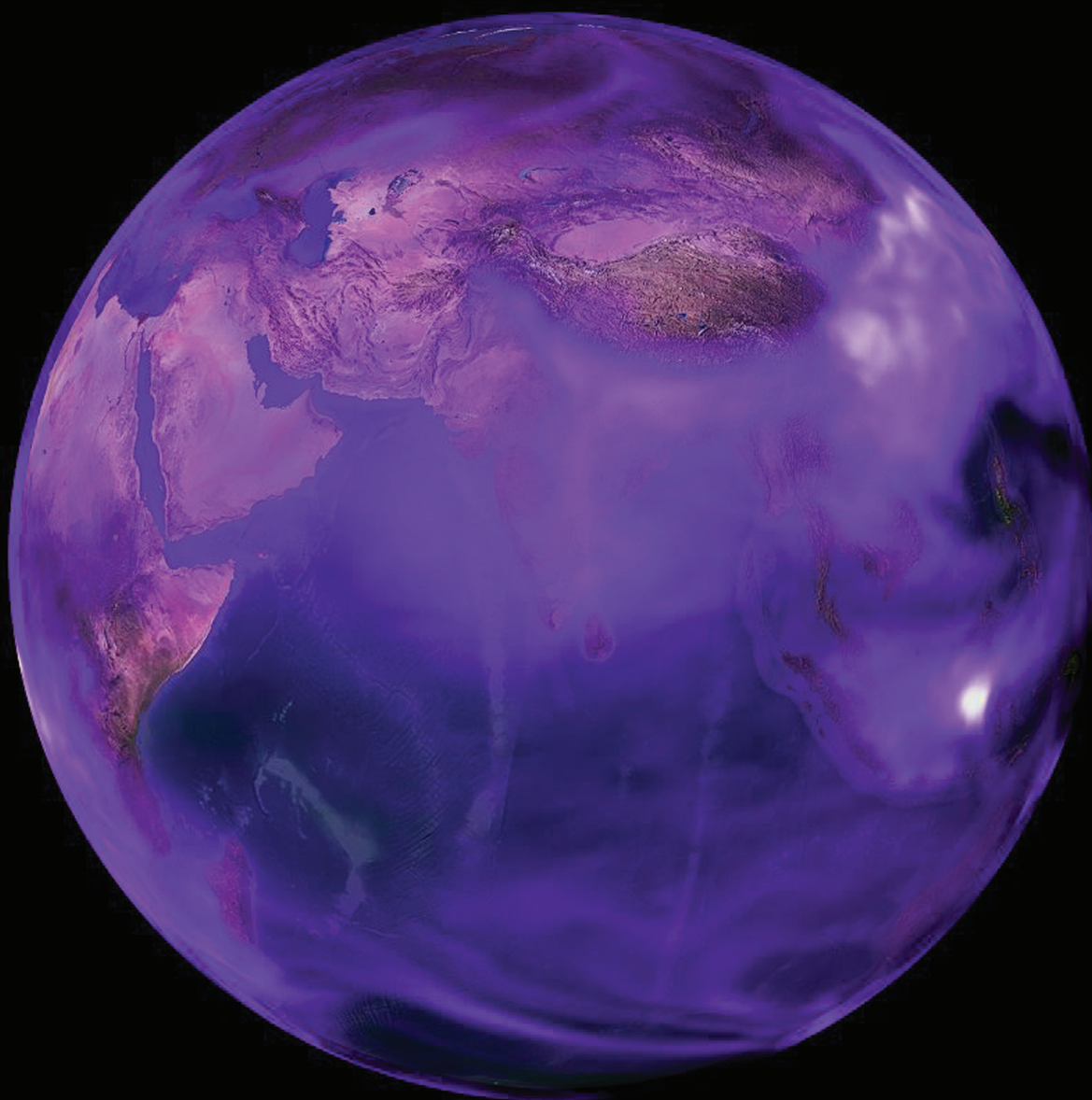




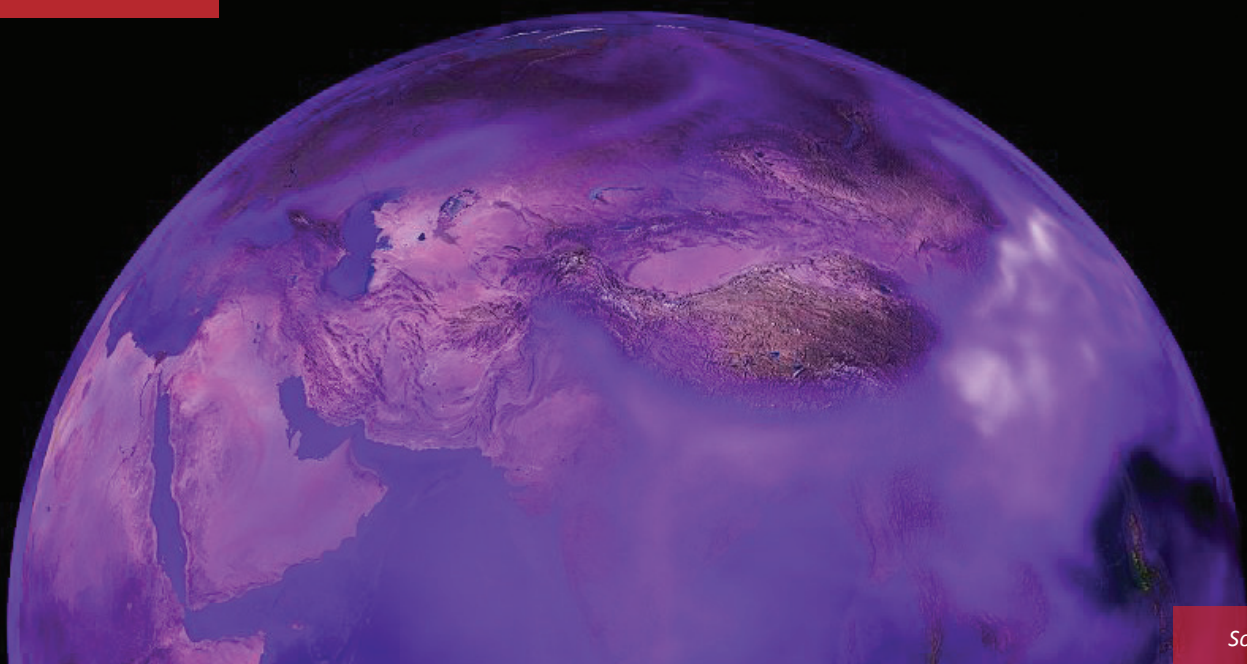
Ambassade de France au Royaume-Uni
Service Science et Technologie

Science & Technologie au Royaume-Uni

Janvier - Février 2012



Géo-ingénierie du climat perspectives britanniques



Source : NASA

Géo-ingénierie du climat, perspectives britanniques

Pouvoir contrôler le climat semble au premier abord relever de la science fiction. Et pourtant, depuis une dizaine d'années, les scientifiques explorent des méthodes pour le modifier délibérément et à grande échelle : c'est la géo-ingénierie du climat. Confrontés à des scénarios climatiques plutôt pessimistes, alors que la communauté internationale peine à s'entendre sur une stratégie coordonnée de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ces technologies peuvent apparaître comme une solution de recours, un « plan B ». Le Royaume-Uni dispose d'un réel potentiel dans ce domaine émergent des sciences du climat, avec des programmes de recherche financés à hauteur de plusieurs millions de livres. Un rapport publié en 2009 par la *Royal Society* est largement reconnu comme l'un des plus exhaustifs réalisés à cette date par une institution publique.

Technologies controversées, il existe d'ores et déjà une amorce de débat au sein de la communauté scientifique britannique qui s'étend petit à petit au public via la presse, en particulier à l'occasion de l'annonce du financement d'expérimentations. Ces recherches ne concernent pas seulement les sciences climatiques, mais s'intéressent également à la perception qu'en a le public, encore très ignorant ou mal informé. Enfin, la géo-ingénierie fait l'objet de nombreuses interrogations (éthiques, sociales, juridiques, réglementaires) qui ne sont pas absentes des thèmes de recherche des universités britanniques, mais aussi des sociétés savantes et du parlement, qui appellent unanimement à l'établissement de règles internationales de gouvernance de la recherche.

Introduction

Du point de vue de la recherche scientifique, le Royaume-Uni se caractérise par une assez grande liberté offerte aux équipes de chercheurs pour travailler sur des sujets émergents qui peuvent être aussi controversés. Il existe également des sociétés savantes dont les travaux font autorité et dont les recommandations sont écoutées bien au-delà de la seule communauté scientifique. Ajoutez à cela une réelle expertise en matière de sciences du climat, et vous comprendrez mieux pourquoi le Royaume-Uni finance pour plusieurs millions de livres des projets de recherche qui visent à mieux comprendre la géo-ingénierie du climat.

La géo-ingénierie désigne des technologies destinées à contrer le réchauffement climatique, en agissant sur le cli-

mat à l'échelle mondiale. Après avoir remis le concept de géo-ingénierie dans son contexte, et passé en revue les différentes technologies possibles, ce dossier s'attache à dresser un panorama le plus complet possible de la recherche britannique dans ce domaine. Puis, le rôle et positionnement du parlement et des sociétés savantes sera étudié (dont le rapport fondateur de la *Royal Society*, publié en 2009), avant de s'intéresser à la perception qu'en ont le public et les médias. Finalement, un dernier chapitre revient sur les questions éthiques et géopolitiques qui se posent, ainsi que sur l'état de la réglementation internationale existante.

Ce dossier reprend les arguments des scientifiques et des différents acteurs du débat. Il ne prend pas position, ne promeut ni ne rejette l'option de la géo-ingénierie du climat ou de la recherche scientifique dans ce domaine.

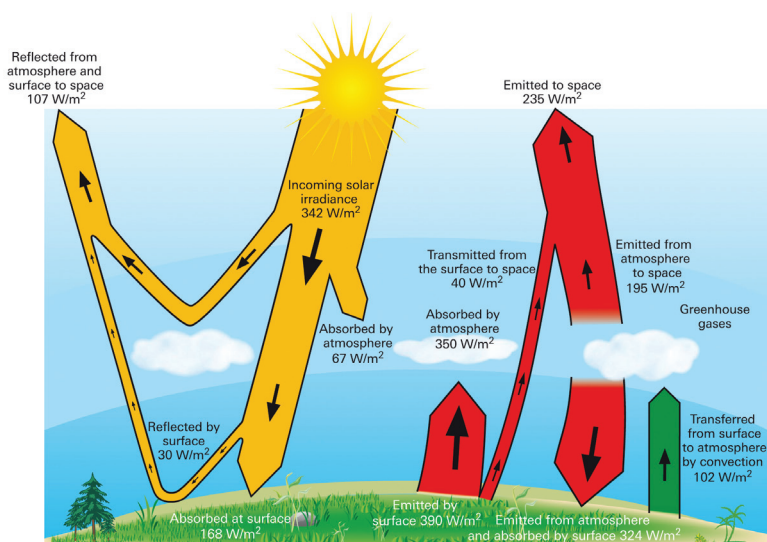


Figure 1. Les échanges énergétiques dans l'atmosphère : la « machine climat »

Source : Royal Society, 2009

en matière de changement climatique, ses conséquences potentielles, les stratégies d'atténuation et d'adaptation.

La mission du GIEC est « d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue »¹. Ainsi le quatrième rapport a été établi par plusieurs milliers d'auteurs, éditeurs et relecteurs originaires d'une douzaine de pays, citant plus de 6 000 études scientifiques revues par les pairs.

1. Le système climatique et la géo-ingénierie

1.1 Changement climatique et système climatique

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque ». Ces mots ouvrent le quatrième rapport d'évaluation (AR4) établi en 2007 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), récipiendaire, la même année, du Prix Nobel de la Paix conjointement avec Al Gore. Considérée comme la plus grande et plus complète synthèse des travaux en sciences du climat réalisée jusqu'à maintenant, ce document de plusieurs milliers de pages fait référence en matière de changement climatique. Il est le quatrième d'une série de rapports qui rassemblent et évaluent les informations scientifiques, techniques et socio-économiques

Afin de mieux comprendre les implications du réchauffement du climat, il est nécessaire de revenir brièvement sur les mécanismes à l'œuvre dans la « machine climat ». Le climat planétaire repose fondamentalement sur un équilibre énergétique entre les radiations du Soleil (principalement ultraviolet et lumière visible) qui réchauffent la Terre, et celles qui quittent notre planète (infrarouge) et la refroidissent (voir Figure 1). Ces flux de radiations interagissent avec la surface du globe et l'atmosphère. Ainsi, environ un tiers des radiations solaires sont directement réfléchies vers l'espace par les nuages, les calottes glaciaires et plus généralement par les surfaces de couleurs claires (on mesure le pouvoir réfléchissant de la Terre par son albédo). Une partie de l'énergie en provenance du Soleil est absorbée puis réémise par la surface terrestre avant d'être capturée par certains gaz présents

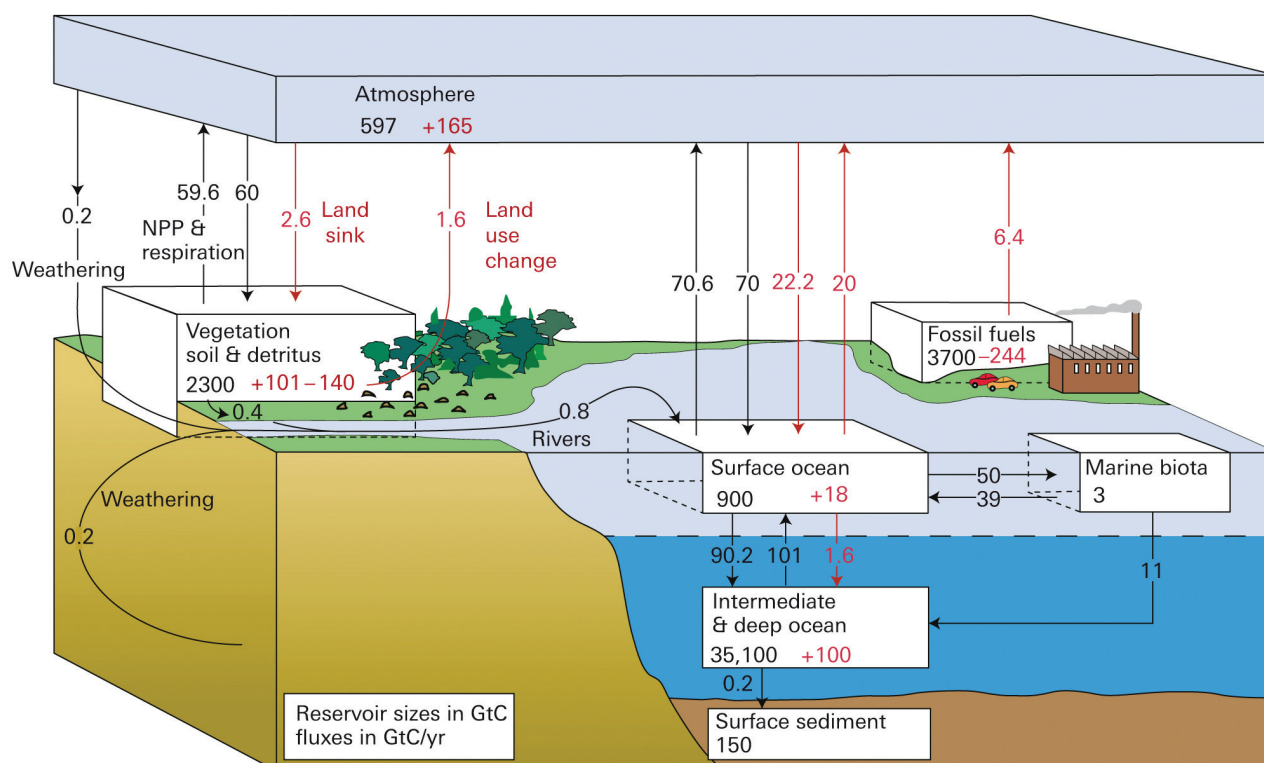


Figure 2. Les cycles du carbone : en rouge, les ajouts dus aux activités humaines (en Gt de carbone par an)

Source : Royal Society, 2009

dans l'atmosphère (principalement le CO₂ et l'eau). Environ 60 % de cette énergie est réémise par ces gaz et quitte finalement l'atmosphère. L'énergie restante contribue à réchauffer l'atmosphère et la surface, selon des boucles d'action qui se renforcent : c'est l'effet de serre. Il existe un équilibre très délicat entre les différents flux d'énergie qui permet (en l'absence d'intervention) de stabiliser la température de notre planète.

Or, l'homme, par ses activités (combustion des réserves d'énergie fossile, déforestation, agriculture...), a artificiellement augmenté la concentration atmosphérique de ces gaz à effet de serre (GES), comme le CO₂, le méthane et le dioxyde d'azote. L'augmentation de concentration des GES a rompu ce fragile équilibre en réduisant la quantité d'énergie réémise vers l'espace, c'est un « forçage radiatif ». Le système climatique, pour rétablir cet équilibre, a réagi par un réchauffement des basses couches atmosphériques qui vont, à leur tour, émettre plus d'énergie. Ce forçage radiatif va causer un ajustement à la hausse de la température mondiale, jusqu'à ce que l'équilibre entre les flux arrivant et quittant la planète soit rétabli : c'est le principe du réchauffement climatique.

Le cycle mondial du carbone joue un rôle clef par son action de transport de ce gaz à effet de serre d'un réservoir à l'autre (océans, atmosphère, végétation et sédiments). Il influence la cinétique de rétablissement de l'équilibre énergétique du climat et donc son réchauffement, ou refroidissement. Le principal réservoir de carbone est situé au fond des océans (sous forme d'ions bicarbonates). Entre réservoirs, le carbone est échangé naturellement. Par exemple, chaque année, entre 60 et 90 Gt de carbone circulent entre l'atmosphère et la végétation. Les activités humaines ont ajouté de nouveaux flux d'échange de carbone, principalement par la combustion des

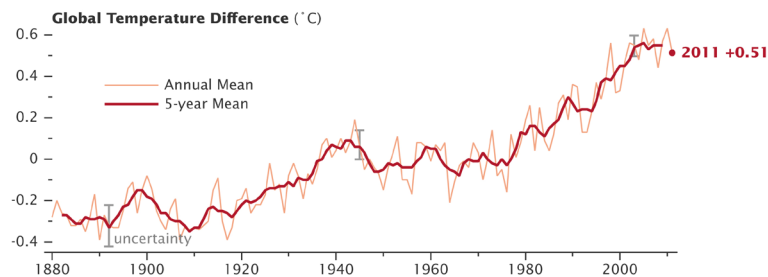


Figure 3. Hausse de la température moyenne du globe sur un siècle

Source : NASA

hydrocarbures fossiles (voir Figure 2) : la hausse des émissions de GES imputables à l'homme est de 70 % entre 1970 et 2004. Les scientifiques considèrent « avec un degré de confiance très élevé » que ces variations sont la cause du réchauffement climatique observé.

Il est donc désormais scientifiquement établi que le climat mondial se réchauffe à cause de l'homme, et de manière alarmante. De nombreux signes sont déjà visibles à l'échelle du globe : hausse de la température moyenne de l'atmosphère (voir Figure 3) et de l'océan, fonte massive de la neige et de la glace, acidification des océans et élévation du niveau moyen de la mer (voir Figure 4).

Des modèles ont été établis pour évaluer l'ampleur de la hausse des températures mondiales en fonction de différents scénarios d'émissions. Par exemple, l'un d'entre eux prévoit un pic d'émission de CO₂ en 2050, suivi d'une réduction régulière. En 2100, la concentration atmosphérique en GES serait alors de 850 ppm (parties par millions, le taux actuel est de 391 ppm pour le CO₂ seul²) et la température moyenne du globe plus élevée de 2,8°C par rapport à la période 1980-90, avec de très fortes disparités géographiques, les maxima étant atteints aux pôles (voir Figure 5). Les conséquences précises de la hausse des températures mondiales sont encore mal comprises, mais de grandes lignes se dessinent : augmentation de la fréquence des vagues de chaleur, modification des précipitations (en particulier de la mousson), augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes (cyclones, tempêtes), désertification, nombreux changements dans les écosystèmes, hausse du niveau de la mer, sécheresses, acidification des océans, déplacement des bassins où sévissent des maladies endémiques. Avec toutes les conséquences sociales et économiques associées. En effet, les pays les plus pauvres risquent d'être parmi les plus affectés et vulnérables à ces évolutions attendues du climat³.

Afin de limiter l'ampleur de ces changements et éviter des situations catastrophiques, les chercheurs ont montré qu'il est nécessaire de contenir la hausse globale des températures à 2°C d'ici la fin du siècle par rapport à 1990.

1.2 Une cible de 2°C de réchauffement global intenable ?

Malgré cet appel des scientifiques à mettre tout en œuvre pour maintenir une hausse des températures inférieure à 2°C, la communauté internationale peine à s'entendre sur des mesures globales pour réduire les émissions de GES. Et les scientifiques commencent à douter de la possibilité de respecter cet objectif de 2°C, avec une hausse possible des températures pour le moment envisagée à 3,5°C en 2100⁴.

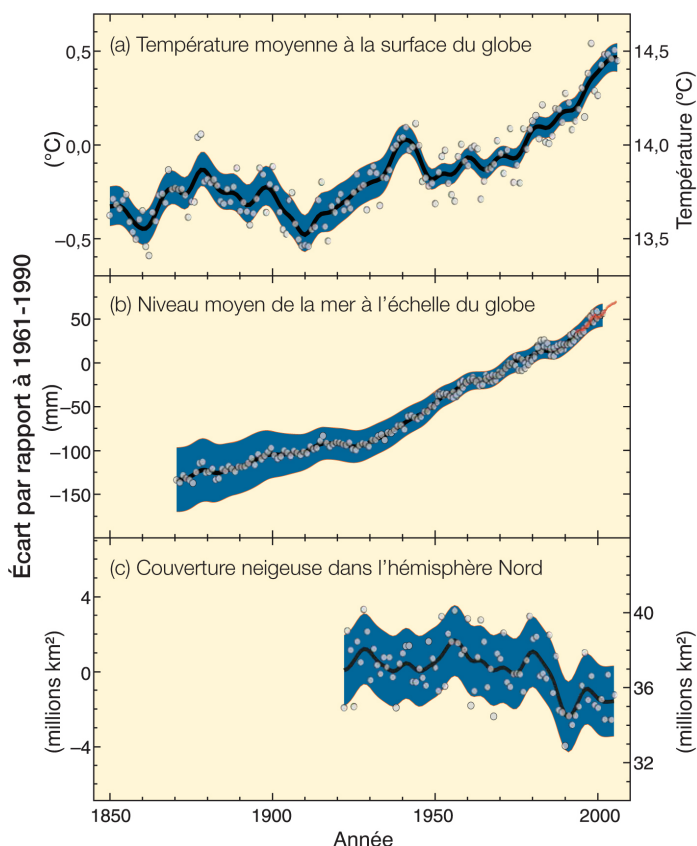


Figure 4. Des conséquences mesurables du changement climatique

Source : GIEC, AR4

La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques⁵ (CCNUCC) a été adoptée en 1992 lors du Sommet de la Terre de Rio et constitue la première tentative internationale destinée à mieux cerner la problématique du changement climatique et les manières d'y remédier. En 1997, dans le cadre de la CCNUCC, la plupart des États (à l'exception notable des États-Unis qui ont refusé de la ratifier) se sont accordés sur un traité fixant un objectif de réduction des émissions de GES valable entre 2005 (entrée en vigueur) et 2012 : le Protocole de Kyoto⁶. Si ce traité marque une étape fondamentale, il ne concerne pas directement les pays en développement pour lesquels aucun engagement quantifié n'est fixé.

Depuis 2007, les parties membres de la CCNUCC (la Conférence des Parties ou COP) se rencontrent régulièrement pour poursuivre les négociations avec pour objectif ultime un accord globalement contraignant (Bali en 2007, Poznań en 2008), ainsi que pour établir des mécanismes d'aide à la lutte et à l'adaptation au changement climatique, en particulier à destination des pays en développement. En 2009, la conférence (COP 15) s'est tenue à Copenhague, marquée

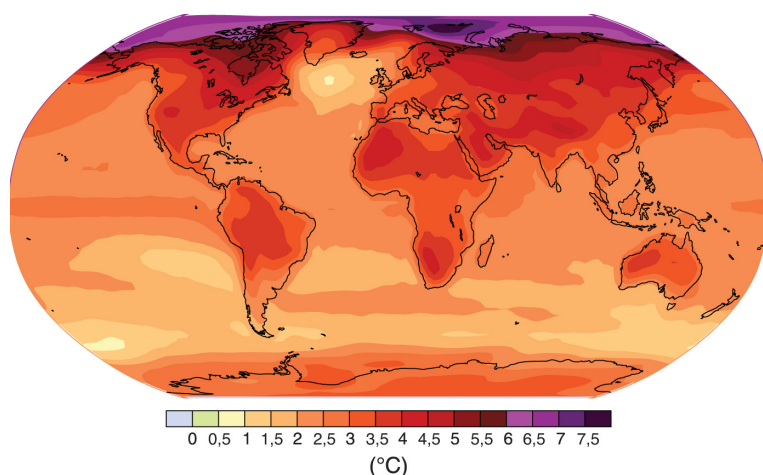


Figure 5. Températures dans un scénario à 850 ppm de concentration atmosphérique en GES

Source : GIEC, AR4

par des espoirs très élevés mais aussi très vite déçus par l'impossibilité d'arriver à un accord contraignant incluant tous les principaux pays émetteurs de GES, au premier rang desquels les États-Unis et la Chine. Seule une déclaration d'intention sur l'importance à ne pas dépasser l'objectif de 2°C a pu être trouvée, sans traité remplaçant le Protocole de Kyoto arrivant à terme en 2012. Cet échec, qui a également révélé les divisions de l'Union européenne, a sans doute marqué un tournant, soulignant l'extrême difficulté à atteindre un accord global. Après Cancùn (2010), qui a vu la mise en place d'accords sur des questions plus secondaires (biodiversité, déforestation et un Fonds mondial vert pour le climat), la conférence de Durban de 2011 a été présentée comme celle de la « dernière chance ». Le 11 décembre, avec 36 heures de retard, un texte final a été adopté. Il prévoit la poursuite du Protocole de Kyoto après 2013, un accord sur le fonctionnement du Fonds vert (sans en préciser le financement) et surtout une procédure de négociation (*Durban Platform for Enhanced Action*) dont l'objet est d'élaborer un engagement juridique qui s'appliquerait à tous les États, signé en 2015, pour une application après 2020.

Alors que les négociations sur le changement climatique sont marquées par une très grande difficulté à atteindre un accord juridiquement contraignant au niveau mondial, et que la concentration atmosphérique en CO₂ n'a jamais été aussi élevée (390 ppm), les scientifiques sont de plus en plus nombreux à tirer le signal d'alarme. Ils soulignent qu'attendre 2020 pour s'engager à réduire les émissions mondiales de GES réduit chaque jour d'avantage la possibilité de respecter l'objectif de 2°C en 2100. Dans le même temps, des organismes comme l'Agence internationale pour l'énergie, préviennent que sans action massive immédiate, 2017 pourrait être l'année de « non retour ». En effet, le carbone émis par l'homme reste dans l'atmosphère pour plusieurs milliers d'années. Respecter le seuil de 450 ppm qui assurerait un réchauffement limité à 2°C, revient à fixer un volume total de GES qui peut être émis au cours du prochain siècle. Or, étant donnée la durée de vie des centrales électriques et des infrastructures construites actuellement, ce « budget carbone » pourrait bien être dépassé dès 2017, plaçant inéluctablement la Terre sur la trajectoire d'un réchauffement supérieur à 2°C⁷.

Face à ce constat alarmant, une nouvelle approche est désormais de plus en plus sérieusement étudiée : disposer d'un « plan B », en agissant directement sur le climat afin de contrer le réchauffement de la planète, ou du moins le contenir⁸. C'est la géo-ingénierie du climat.

1.3 Définition du concept de géo-ingénierie

Comme le souligne la Commission de la science et de la technologie de la Chambre des communes du parlement britannique, il n'existe pas de définition monolithique de la géo-ingénierie. Les concepts recouverts par ce terme « sont divers et varient beaucoup par leurs caractéristiques techniques et leurs conséquences potentielles »⁹.

Il est généralement retenu que la géo-ingénierie du climat qualifie des propositions destinées à intervenir sur le système climatique, à une grande échelle, afin de contrebalancer le réchauffement climatique anthropogénique, et ainsi stabiliser, voire réduire, la température moyenne du globe.

On peut distinguer deux principales catégories de techniques :

- **Suppression du dioxyde de carbone** (*Carbon dioxide removal, CDR*) qui vise à retirer le CO₂ présent dans l'atmosphère ;
- **Gestion du rayonnement solaire** (*Solar radiation management, SRM*) dont l'objet est de limiter la quantité d'énergie solaire qui atteint la Terre.

Cette définition laisse de côté les manipulations de l'environnement à grande échelle dont l'objet serait autre que combattre le réchauffement climatique (par exemple l'utilisation du climat à des fins militaires), et de telles actions n'entrent pas dans le domaine couvert par cette étude. Il peut être également avancé que l'homme manipule déjà son environnement par ses émissions de GES. Cependant, bien que nous puissions prévoir, dans une certaine mesure, les conséquences induites par nos activités, l'injection de CO₂ dans l'atmosphère ne vise pas à changer le climat de manière intentionnelle, elle ne rentre pas dans la définition proposée. Cette distinction, entre effets intentionnels et effets prévisibles mais

non-intentionnels, comporte une dimension philosophique. Les lecteurs désireux d'en savoir plus sur cette question liront avec intérêt les travaux de Mark Alusio¹⁰. Enfin, cette définition n'inclut pas les techniques de captage et stockage du carbone (CSC), telles qu'utilisées en sortie des centrales énergétiques, car ces technologies ne réduisent pas la concentration de CO₂. Elle ne concerne pas non plus les modifications du climat à petite échelle (techniques d'ensemencement des nuages pour générer des précipitations, par exemple).

Notons que, de part les controverses que causent ces techniques, certains scientifiques préfèrent ne pas utiliser le terme « géo-ingénierie » qui peut être connoté négativement (comme l'ingénierie génétique). Il existe ainsi plusieurs périphrases qui décrivent des concepts très proches, voire similaires, comme « macro-ingénierie pour la gestion et la lutte contre le changement climatique » (utilisé par le *Cambridge-MIT Institute*), ou encore « émissions négatives ». Enfin, certaines techniques, comme la reforestation à grande échelle, peuvent être assimilées à des techniques de géo-ingénierie, même si elles seront généralement plutôt présentées comme des mesures d'atténuation (mitigation) des émissions de GES.

1.4 Bref retour sur l'histoire du concept

Le concept de géo-ingénierie du climat n'est pas une idée récente, mais il n'a véritablement fait l'objet de recherches et débats scientifiques que récemment. Les premières études en science climatique considéraient déjà la possibilité d'agir sur le climat comme une option valable. Dans les années 1830, le météorologue américain James Pollard Espy avait proposé de stimuler la génération de pluie par des incendies de forêt contrôlés, ce qui lui valut le surnom de « roi des tempêtes » (*Storm King*). Durant la guerre froide, les militaires américains ont étudié pendant plus de 20 ans, dans le cadre du projet « *Stormfury* », la possibilité de modifier la trajectoire des cyclones en les ensemençant avec de l'iodure d'argent.

L'idée de modifier le climat spécifiquement afin de contrebalancer l'effet de serre remonte à 1965, lorsqu'un rapport allant dans ce sens a été publié par le Conseil scientifique du président des États-Unis (US President's Science Advisory Council). Ce rapport, « *Restoring the Quality of Our Environment* », consacré aux menaces du changement climatique lié à la hausse du CO₂ atmosphérique, a été présenté à Lyndon B. Johnson. Il identifiait la géo-ingénierie comme la seule réponse au « problème du CO₂ ». La possibilité de réduire la consommation en carburants fossiles n'était même pas évo-

quée (le réchauffement du climat n'était alors pas associé aux activités humaines). À la suite de ce rapport, quelques premières études ont été lancées, des années 1970 aux années 1990 : Budyko (1977), Marchetti (1977), Académie nationale des sciences des États-Unis (1992)...

Au cours des années 2000, alors que les émissions anthropogéniques de GES se poursuivent, et même s'accroissent, le concept de géo-ingénierie fait l'objet petit à petit de débats et de discussions plus nombreux, en particulier au Royaume-Uni (par exemple, avec l'organisation d'un séminaire d'étude prospective à Cambridge en 2004, intitulé « *Macro-Engineering Options for Climate Change Management & Mitigation* »). Le public a réellement été confronté pour la première fois à la géo-ingénierie en 2006, lorsque les médias se sont faits l'écho d'un article scientifique du chimiste néerlandais et lauréat du Prix Nobel, Paul Crutzen, un spécialiste de l'atmosphère terrestre, qui examinait la possibilité d'abaisser la température moyenne globale en injectant des aérosols, une autre approche soutenue notamment par deux américains, Ken Caldeira et David Keith. D'une manière générale, les États-Unis, et dans une moindre mesure l'Allemagne, apparaissent avec le Royaume-Uni comme les pays où le débat sur la géo-ingénierie et la recherche sont les plus présents. Remarquons cependant que les efforts internationaux se concentrent avant tout sur les stratégies de limitation des émissions des GES (mitigation).

2. Techniques de géo-ingénierie

Il existe donc deux principales classes de techniques de géo-ingénierie : par suppression du dioxyde de carbone (*Carbon dioxide removal*, CDR) et par gestion du rayonnement solaire (*Solar radiation management*, SRM). Ces deux approches ont pour but de réduire la température moyenne du globe, mais il existe des différences fondamentales : leurs modes d'actions, l'échelle de temps sur laquelle elles agissent, l'effet sur la température, ou encore les conséquences sur l'environnement. Ce chapitre revient sur les principales solutions actuellement à l'étude ou envisagées, et repose en partie sur le rapport de la *Royal Society* de 2009.

2.1 Suppression du dioxyde de carbone

En anglais : *Carbon dioxide removal*, *Greenhouse gas remediation*, *Carbon sequestration*. Ces méthodes cherchent à retirer le CO₂ présent dans l'atmosphère, et donc s'attaquent directement à la cause du réchauffement climatique. Elles

	Terrestre	Océanique
Biologique	Reboisement, utilisation des territoires Biomasse / biocarburants avec séquestration du carbone	Fertilisation au fer Fertilisation au phosphore / azote Renforcement de l'upwelling
Physique	Épurateurs de CO ₂ atmosphérique (<i>Air Capture</i>)	Modification de la circulation océanique
Chimique (techniques d'amélioration de la fixation du carbone)	Transformation de silicates (SiOx) en carbonates (CO ₃)	Modification de l'alcalinité (broyage, dispersion et dissolution de calcaire, silicates ou hydroxyde de calcium)

Un autre classement possible des techniques de géo-ingénierie

Source : Royal Society, 2009

consistent en deux groupes de techniques :

- renforcer les processus naturels de fixation du carbone (forêt, roche sol, océan), en agissant donc de manière indirecte ;
- absorber directement le carbone par des moyens industriels, pour ensuite le stocker dans des couches géologiques ou au fond des océans.

Elles se caractérisent toutes deux par le temps long nécessaire avant de bénéficier des premiers effets positifs (plusieurs décennies, voire siècles).

Gestion des territoires pour protéger ou renforcer les puits de carbone naturels



wikipedia

Les écosystèmes terrestres absorbent chaque année environ 3 Gt de carbone, soit autour de 30 % des émissions anthropogéniques de CO₂ liées aux combustibles fossiles et à la déforestation, tandis que les forêts mondiales stockent plus de deux fois la quantité de carbone présent dans l'atmosphère. Toutefois, la déforestation et les changements dans l'utilisation des territoires contribuent pour près de 20 % des émissions totales de GES (la destruction des forêts tropicales compte, à elle seule, pour 16 %).

Au-delà d'une simple limitation de la déforestation et de la protection des zones boisées, la géo-ingénierie propose le reboisement à grande échelle et plus généralement l'encouragement à la plantation de cultures et autres végétaux, qui lors de leur croissance vont fixer du carbone (toutefois pas de manière durable, car les forêts sont toujours sensibles aux incendies). Ces techniques sont relativement simples et peuvent être financées via des mécanismes déjà existants (comme le marché du carbone). Cependant, la conversion de territoires en forêts risque d'entrer en conflit avec le besoin croissant de surfaces agricoles ainsi qu'avec la nécessité de protéger certains types d'écosystèmes, limitant le potentiel de déploiement de ces techniques. Il est estimé qu'entre 0,4 à 0,8 Gt de carbone pourraient être fixées par année d'ici 2030, pour un prix variant entre 20 et 100 \$/t.

Ces méthodes présentent l'avantage d'être des solutions relativement bon marché, faciles à mettre en place et à risque très limité. Leur potentiel de séquestration est faible et la durée d'action, longue.

Utiliser la biomasse pour séquestrer le carbone



<http://bit.ly/xcmIJJ>

Lorsque les végétaux meurent, une large partie du carbone utilisé pour leur croissance retourne dans l'atmosphère. Seule une faible fraction est stockée durablement dans l'humus et le sol. L'idée est donc d'intervenir dans ce cycle pour accroître la quantité de carbone séquestré. Il existe différentes approches :

- utiliser la biomasse pour produire de l'énergie. Cette technique est très similaire (sinon identique) à la fabrication des biocarburants (et pourrait être ainsi assimilée d'avantage à une méthode de réduction des émissions que de géo-ingénierie) ;
- utiliser la biomasse pour produire de l'énergie (par exemple

pour générer de l'hydrogène ou de l'électricité), capturer le CO₂ issu de la combustion et le stocker durablement (notamment dans des réservoirs géologiques). C'est le concept *Bio-energy with CO₂ capture and sequestration* (BECS) ;

- enterrer directement cette biomasse, éventuellement après transformation en biochar (charbon produit par pyrolyse, riche en carbone et stable).

Les technologies à l'œuvre ici sont relativement simples ou similaires à celles déjà développées pour la production de biocarburants. Cependant, comme pour la reforestation, des conflits risquent d'apparaître avec d'autres modes d'utilisation des territoires (agriculture en particulier), et l'enterrement (ou stockage en eau profonde) de larges quantités de biomasse pourrait fortement perturber les écosystèmes existants. La stabilité dans le temps de ces dépôts est également encore mal connue.

Séquestrer le carbone par la biomasse fait appel à des techniques connues et maîtrisées. Leur efficacité est néanmoins relativement limitée, avec un potentiel de stockage moyen-faible¹¹. Économiquement, le coût de déploiement serait du même ordre de grandeur que celui des biocarburants.

Améliorer les phénomènes naturels de fixation chimique du carbone – « enhanced weathering »



IPSOS Mori

Le carbone est naturellement fixé par des réactions chimiques qui le stockent durablement dans la croûte terrestre. Les roches silicates sont transformées en carbonates, consommant au passage des molécules de CO₂ ($\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$). Une variante consiste à produire des ions hydrocarbonates en milieu aqueux (océan). Si ces processus jouent un rôle clef dans la réduction naturelle de la concentration de carbone atmosphérique sur le long terme, ils ne contribuent que de manière marginale sur le court terme (moins de 0,1 Gt de carbone absorbé par an).

Plusieurs techniques visent à augmenter artificiellement (par plusieurs ordres de grandeur) le nombre de réactions chimiques ou à les accélérer : usines produisant les réactions, injection de CO₂ dans les roches terrestres pour forcer les réactions chimiques, dispersion des réactifs nécessaires dans les océans... Cependant, le retrait d'une tonne de carbone atmosphérique nécessiterait environ deux tonnes de minerai contenant des silicates (abondant sur Terre). Économiquement et énergétiquement, le coût risque donc d'être élevé, car il faudrait mettre en place un système industriel du même ordre de grandeur que celui qui produit actuellement le CO₂ rejeté dans l'atmosphère. De plus, les conséquences environnementales sont non négligeables et plutôt bien appréhendées. Notons que les réactions chimiques contribueraient à réduire l'acidité des océans.

L'amélioration de la fixation chimique du carbone a le potentiel de retirer de très larges quantités de CO₂, mais à un coût élevé et sur des échelles de temps relativement longues.

Renforcer la capacité d'absorption du carbone par les océans

Les échanges de carbone entre l'atmosphère et l'océan se



<http://bit.ly/xlBkbx>

font rapidement, mais le transfert et le stockage vers les couches profondes se fait sur de très longues périodes de temps (plusieurs siècles). Ce mouvement de carbone est de l'ordre de 10 Gt par an, mais seule une fraction atteint les couches les plus basses et les plus stables. Des méthodes de géo-ingénierie, très discutées et controversées, cherchent à accélérer ce transfert. Elles consistent en deux approches différentes : renforcer la capacité des écosystèmes océaniques à capturer du carbone, ou accroître la quantité de carbone transférée vers les couches océaniques profondes au niveau des zones où les eaux s'enfoncent (*downwelling*).

Pour renforcer la capacité des écosystèmes marins (algues, planctons) à fixer du carbone, il faut favoriser la croissance des micro-organismes consommateurs de CO₂ (la « pompe biologique »). Or, l'efficacité de cette pompe est limitée par la présence en faible quantité de nutriments (azote, phosphates, fer). Les méthodes de géo-ingénierie proposent d'accroître la concentration de ces nutriments : c'est la technique de « fertilisation » (la dispersion de fer est celle qui fait l'objet de nombreuses recherches, et même de quelques expérimentations). L'un des principaux risques est de générer des efflorescences algales (« *algal bloom* »), de fortes concentrations d'algues, qui peuvent causer une eutrophisation du milieu tuant toutes autres formes de vie. De plus, le processus de carbone qui entraîne durablement le carbone vers le fond de l'océan est encore mal compris, et les premières expériences semblent montrer que son efficacité serait limitée. En revanche, les coûts de mise en œuvre pourraient être relativement faibles (de l'ordre de 20 \$/t de carbone séquestré).

Agir sur le transfert des masses d'eau, au niveau des zones de *downwelling*, est l'autre approche, mais beaucoup plus difficile à réaliser pour des résultats très limités (accroître d'un million de mètres cubes par seconde la quantité d'eau, au niveau mondial, ce qui représenterait un défi technique considérable, permettrait de capturer moins de 0,01 Gt de carbone par an).

La fertilisation des océans est une technique de géo-ingénierie plutôt simple mais relativement coûteuse à mettre en œuvre. Elle semble être peu efficace et potentiellement très risquée, tout en requérant de très longues périodes de temps pour agir.

Retirer directement le CO₂ par des procédés industriels



IMEchE

Si la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est trop élevée, et bien réduisons la ! C'est en substance l'idée fondamentale qui motive cette dernière classe de techniques de géo-ingénierie. Souvent présentées sous le vocable d'« arbres artificiels », il s'agit de retirer, à grande échelle, le carbone présent dans l'atmosphère par des moyens industriels et commerciaux. La faisabilité technique a déjà été démontrée, avec des prototypes développés notamment par Klaus Lackner qui propose de construire des arbres artificiels absorbant le CO₂ sur un substrat solide. D'autres approches envisagent l'utilisation

de nanomatériaux ou de solutions alcalines, tandis que certaines techniques reposent sur la culture d'algues dans des bassins. Le carbone récupéré est ensuite stocké, par exemple dans des réservoirs géologiques.

La difficulté réside en la très faible concentration relative du CO₂ (autour de 0,04 %), ce qui rend de tels procédés potentiellement énergétiquement coûteux. Toutefois, ces arbres artificiels pourraient être disposés n'importe où (contrairement aux systèmes de capture du carbone en sortie des centrales électriques) ce qui permettrait de valoriser des terrains de inutilisés alors que les nouvelles technologies pourraient réduire le coût de la tonne de carbone retiré jusqu'à 20 \$. Il faudrait cependant un nombre important de ces arbres artificiels pour obtenir un effet visible sur le climat¹²: 100 000 arbres de Lackner pour absorber les émissions de CO₂ du Royaume-Uni (soit 600 ha, pour un rythme d'absorption de 10 t par jour, qui reste à démontrer) et de l'ordre de 5 à 10 millions pour les émissions mondiales (hors secteur énergétique). Pour mémoire, autour de 75 millions de véhicules sont produits chaque année dans le monde.

Cette approche a le mérite d'être techniquement réalisable (moyennant des efforts de R&D) avec un risque quasi nul pour l'environnement. Cependant, les investissements requis seraient importants et le temps d'action, long.

2.2 Gestion du rayonnement solaire

Nommées en anglais *Solar Radiation Management* (SRM), ces techniques modifient directement le bilan énergétique de la Terre en limitant la quantité de lumière solaire qui est absorbée par notre planète. Elles se caractérisent par leur extrême rapidité d'action. Après leur déploiement, seulement quelques années seraient nécessaires pour mesurer un effet sur le climat. C'est cette rapidité qui sert de principal argument aux défenseurs de cette approche : les techniques de gestion du rayonnement solaire constitueraient en fait une solution d'urgence, dans le cas où l'évolution du climat mondial atteindrait un point de non retour. Leur utilisation donnerait alors du temps pour agir.

En revanche, elles n'agissent pas sur les causes fondamentales du réchauffement climatique, ne réduisent pas la concentration en GES et donc ne peuvent empêcher certaines des conséquences secondaires comme l'acidification des océans. De plus, les opposants à cette approche soulignent que, de part leur rapidité d'action, de telles techniques pourraient finalement dissuader d'agir pour réduire les émissions de GES.

Accroître la réflectivité de la surface terrestre

Aussi qualifiées de « gestion de l'albédo », ces techniques

L'**albédo** est une grandeur sans dimension : le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. Par définition, l'albédo est donc une valeur comprise entre 0 et 1. Un corps noir parfait (objet idéal qui absorbe toutes les ondes électromagnétiques et n'en réfléchit aucune) aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait aurait un albédo égal à 1. La neige a un fort pouvoir réfléchissant (albédo de 0,75 à 0,9), tandis que la mer absorbe une large partie de l'énergie solaire incidente (albédo de 0,05 à 0,15).



<http://bit.ly/xjlhGO>

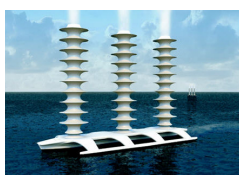
visent à augmenter le pouvoir réfléchissant de la surface terrestre et donc accroître la quantité d'énergie solaire renvoyée vers l'espace. Un doublement de la concentration en CO_2 signifie un accroissement de $+4 \text{ W/m}^2$ de forçage radiatif qui pourrait être contrebalancé par un changement de l'albédo terrestre de 0,02. Ce qui peut sembler très modeste. Sauf que la vaste majorité de la surface du globe est recouverte d'eau, et qu'il faudrait en conséquence transformer 10 % de toutes les surfaces émergées et rendre leur albédo proche de 1.

Plusieurs approches sont envisagées :

- peindre en blanc les toits, et plus généralement rendre plus claires toutes les constructions humaines. Ce qui coûterait plus de 300 Md\$ par an pour un effet extrêmement mince, voire négligeable ;
- utiliser ou produire des végétaux dont les feuilles possèdent un plus fort pouvoir réfléchissant. Cette méthode pourrait avoir un certain effet, mais il faudrait un déploiement à grande échelle ;
- les déserts chauds couvrent 2 % de la surface terrestre et sont situés dans des zones où la densité surfacique d'énergie solaire reçue est importante. Une modification de leur albédo pourrait donc avoir des effets non négligeables. Alvia Gaskil¹³ a proposé de recouvrir les déserts d'une mince couche de matériau réfléchissant, ce qui permettrait un forçage radiatif négatif de 2.75 W/m^2 . Mais ceci aurait un coût de plusieurs centaines de milliards de dollars et des conséquences environnementales importantes sur les écosystèmes fragiles des zones désertiques ;
- une dernière approche propose de recouvrir les océans avec des matériaux réfléchissants, avec un risque environnemental conséquent.

Certaines de ces techniques peuvent présenter un faible risque pour l'environnement (les phénomènes à l'œuvre sont connus et compris), mais les effets sont pour la plupart très limités et les coûts élevés.

Augmenter la blancheur des nuages



<http://bit.ly/z3qz9W>

La surface du globe est largement recouverte de nuages. Une approche consisterait donc à accroître leur pouvoir réfléchissant. C'est-à-dire les rendre plus blancs, généralement en injectant de fines particules qui serviront de noyaux favorisant la condensation de la vapeur d'eau, et donc la génération de nuages plus denses. Cette technique fait l'objet d'un certain nombre de recherches et des modèles numériques ont montré qu'une telle méthode peut effectivement contribuer à réduire la température moyenne du globe. Le défi réside dans la façon de disperser ces particules : avions, ballons, ou une flotte de navires injectant de l'eau de mer (salée) dans l'atmosphère. Cependant, les effets négatifs associés à cette technique peuvent être importants : modification des précipitations et des courants océaniques, ou encore nocivité des produits injectés.

Agissant rapidement (quelques années), et plutôt efficacement (au moins au niveau régional), cette technique présente

À la suite de l'**éruption du Pinatubo**, aux Philippines en juin 1991, une réduction moyenne des températures mondiales de $1,5^\circ \text{C}$ fut observée durant les deux années qui suivirent. Lors de la phase explosive de l'éruption, l'injection massive à très haute altitude de fines particules, rapidement dispersées par les vents tout autour du globe, avait alors créé un fin voile qui réfléchissait vers l'espace une petite fraction de la lumière solaire. La quantité était cependant suffisante (plus de 5 km^3 de cendres et de gaz) pour que cet effet soit ressenti à l'échelle du globe.

plusieurs inconvénients (coût important, dissipation de l'effet dès que l'injection de particules est stoppée) et des risques élevés pour l'environnement.

Injecter des aérosols dans l'atmosphère



<http://bit.ly/w9FyaC>

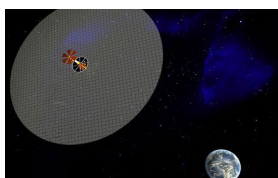
C'est sans doute l'une des techniques les plus controversées. Elle s'inspire des conséquences de certaines éruptions volcaniques majeures, comme celle du Pinatubo, lorsque de grandes quantités de particules sont relâchées dans l'atmosphère, créant un voile réfléchissant la lumière solaire vers l'espace. Parmi les aérosols dont la dispersion est étudiée, le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de soufre sont les deux molécules les plus souvent envisagées.

Plusieurs modèles ont été développés afin de mieux évaluer l'impact de la dispersion de ces particules et montrent qu'une réduction significative de la température moyenne du globe peut être atteinte en quelques années. Pour cela il faudrait injecter entre 1 et 5 Mt de soufre par an dans la stratosphère, ce qui est techniquement réalisable, par exemple à l'aide d'une flotte d'avions ou de ballons (pour mémoire, cela ne représente que 10 % des émissions de soufre liées aux activités humaines actuelles). Le coût est évalué à 10 Md\$ par an. Cependant, les conséquences environnementales sont très mal comprises et potentiellement très importantes sur la couche d'ozone, ou encore avec des modifications des précipitations, en particulier de la mousson. De plus, de par la fragilité des phénomènes intervenant dans les hautes couches atmosphériques, il n'est pas impossible que se produisent des conséquences imprévisibles. L'acidification des océans, due à la hausse de la concentration en CO_2 resterait inchangée. Enfin, l'injection doit être recurrente car les particules ne restent pas dans la stratosphère.

L'injection d'aérosols dans l'atmosphère (généralement la stratosphère) est techniquement réalisable pour un coût relativement modeste et avec une efficacité importante à court terme (réduction d'un degré, après quelques années de déploiement). Cependant, les risques environnementaux pourraient être particulièrement élevés et sont encore très mal compris.

Placer des miroirs en orbite

Cette dernière catégorie consiste à placer des éléments réfléchissants entre le Soleil et la Terre, soit en orbite terrestre, soit au point Lagrange L1 (zone d'équilibre orbital). Plusieurs solutions technologiques ont été explorées : d'un anneau ou nuage de particules réfléchissantes à un seul grand miroir, en



<http://bit.ly/xRq3DC>

passant par une flottille de plus petits disques réfléchissants. Au point L1, pour atteindre une réduction de 2 % de la quantité d'énergie solaire atteignant la Terre, il faudrait une surface réfléchissante de l'ordre de 3 millions de km². L'effet serait assez rapide, mais avec des variations au niveau régional sur les précipitations, le cycle des saisons, ou encore sur la circulation océanique. Par contre, le coût de mise en œuvre risque fort d'être prohibitif, et les technologies nécessaires sont loin d'être maîtrisées (quelques expérimentations à très petite échelle, de quelques dizaines de mètres carrés, ont été tentées, notamment par les russes : opération Znamya).

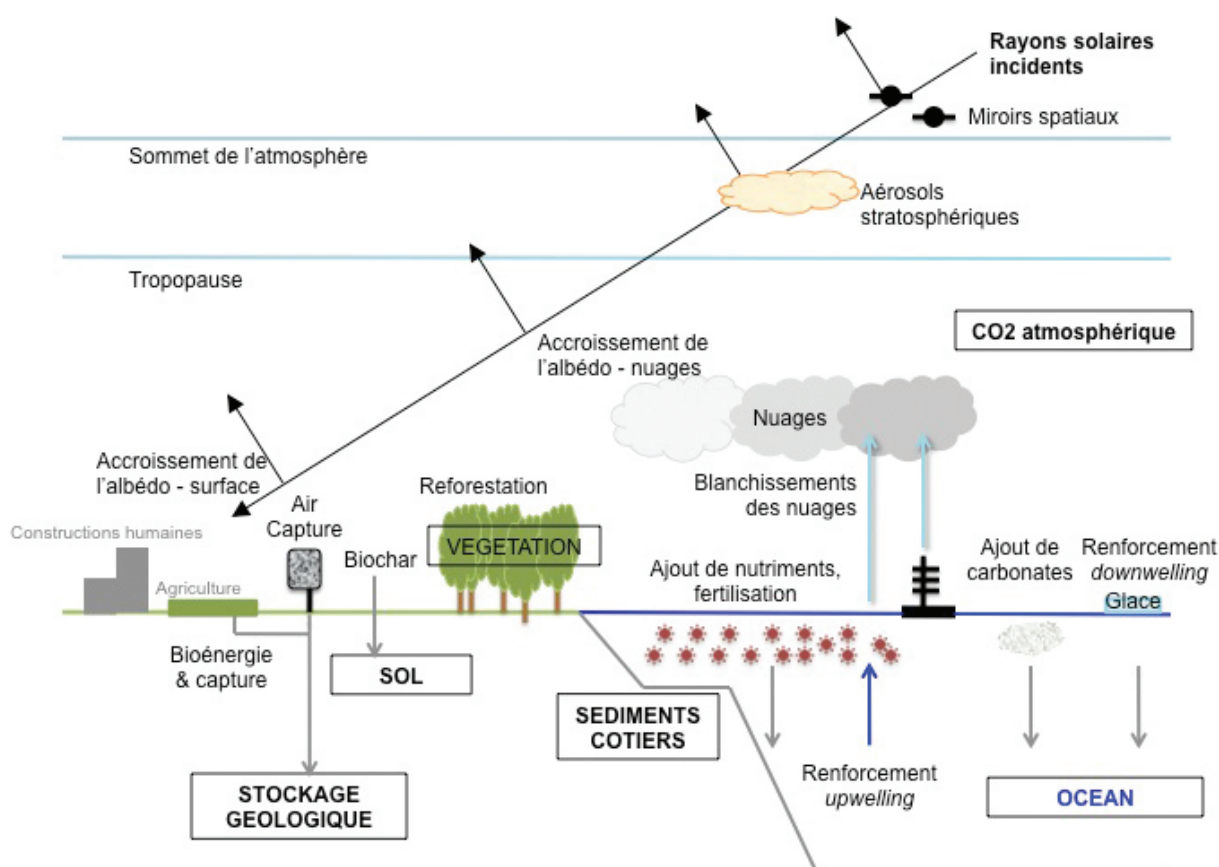
Très efficace et moyennement risquée, cette approche est cependant particulièrement coûteuse et technologiquement encore spéculative. De plus, le temps de mise en œuvre risque d'être long.

2.3 Des techniques largement regardées comme « risquées »

Les connaissances actuelles sont insuffisantes pour permettre une évaluation complète des risques liés à la géo-ingénierie. L'approche par suppression du CO₂ semble présenter des incertitudes et des risques moindres que celle de la gestion du rayonnement solaire, dans la mesure où elle vise à faire revenir le système climatique vers un état préindustriel. En revanche, un climat où les teneurs atmosphériques de gaz à effet de serre seraient élevées et les températures artificiellement abaissées présenterait un état dynamique nouveau, associé à des incertitudes considérables. Celles-ci concernent notamment des valeurs seuils et des mécanismes de rétro-

action encore très mal compris ainsi que les conséquences d'une acidification progressive des océans. De plus, la plupart de ces techniques produisent des effets qui varient d'une région à l'autre, induisant des conséquences sur les courants océaniques ou encore les précipitations. L'approche de gestion du rayonnement solaire ne peut donc pas être considérée comme une solution durable, en particulier du fait de la délicate question du moment approprié et de la manière de l'arrêter. En effet, les modélisations montrent qu'un arrêt subit du déploiement de ces techniques comporterait le risque d'un réchauffement brusque.

Deux techniques font l'objet de nombreuses discussions, mais comportent chacune des risques particuliers. La fertilisation des océans induit des effets secondaires potentiellement considérables sur la biodiversité marine (encore difficiles à comprendre car les résultats expérimentaux apparaissent contradictoires). Il semblerait que, dans certaines circonstances, la décomposition des algues qui s'enfoncent dans les océans favoriserait la production de protoxyde d'azote, un puissant gaz à effet de serre, ce qui pourrait avoir un effet contraire à celui souhaité. L'injection constante dans la stratosphère d'aérosols soufrés est considérée par beaucoup de partisans de la géo-ingénierie comme la technique la plus simple à mettre en œuvre. Les observations et les résultats de modélisation indiquent toutefois qu'elle pourrait influencer le profil des précipitations sur l'ensemble de la Terre et compromettre l'approvisionnement en nourriture de milliards de personnes en Afrique et en Asie, par l'affaiblissement des grandes moussons d'été. De surcroît, les aérosols pourraient entraîner un amincissement dangereux de la couche d'ozone.



Synthèse des différentes techniques de géo-ingénierie. Encadrés, les divers réservoirs de CO₂

Source: www.exeter.ac.uk/g360/geoengineering/

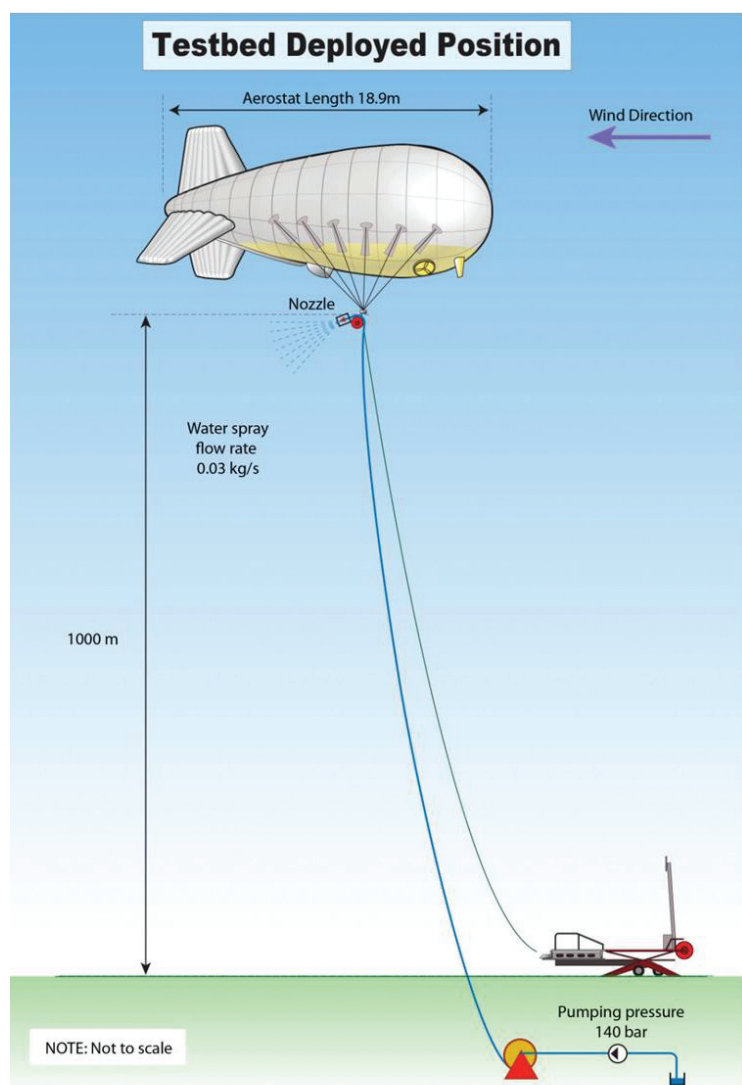


Figure 6. Composante expérimentale du programme de recherche SPICE

Source : NERC

Enfin, la responsabilité envers les générations futures soulève des questions d'ordre éthique. En choisissant la géo-ingénierie, on contraint ces générations à poursuivre les mesures mises en œuvre, dans le pire des cas pendant plusieurs siècles, à des coûts élevés, et avec des effets secondaires sur les écosystèmes globaux encore imprévisibles, à l'heure actuelle.

3. Panorama de la recherche au Royaume-Uni

Il est possible de distinguer trois périodes dans la façon dont la recherche est conduite au Royaume-Uni dans le domaine de la géo-ingénierie. Avant 2006, c'est « l'âge de la recherche personnelle » : un petit groupe de scientifiques intéressés par ces questions poursuit des travaux de recherche, mais généralement comme une activité annexe et sur leur temps libre. À partir de 2007, le Royaume-Uni entre dans « l'âge des PhD » : le nombre de publications scientifiques commence à croître, alors que l'option de la géo-ingénierie émerge dans le débat public. Plusieurs études doctorales sont financées au sein de quelques universités. Cette période se poursuit et s'accélère actuellement. Enfin, en 2010, une nouvelle période a débuté, « l'âge des premiers programmes financés », avec des projets

comme SPICE et IAGP. Elle fait suite à la publication en 2009 du rapport de la Royal Society.

3.1 Les programmes de recherche financés publiquement

En mars 2010, s'est tenu un « sandpit », séminaire d'une semaine organisé par l'Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC, Conseil pour la recherche en sciences physiques et en ingénierie), dont l'objectif était de faire émerger des projets de recherche qui pourraient se positionner dans la suite du rapport de la Royal Society. Le conseil avait annoncé qu'environ 3 M€ seraient allouées à la recherche en géo-ingénierie. Après évaluation des propositions reçues, deux projets majeurs ont été retenus : SPICE et IAGP. Le Natural Environment Research Council (NERC, Conseil pour la recherche sur l'environnement naturel) finance de son côté des études de modélisation, notamment sur la formation des nuages, à hauteur d'environ 2 M€.

3.1.1 SPICE

Le projet SPICE (*Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering*, Injection stratosphérique de particules pour l'ingénierie du climat) est consacré à la technique d'injection d'aérosols. SPICE est un programme de recherche collaboratif entre les universités de Cambridge, Oxford, Bristol et Édimbourg et en partenariat avec Marshall Aerospace. Il est doté de 1,6 M€ par l'EPSRC et le NERC, avec le soutien du Science and Technology Facilities Council (STFC, Conseil pour les infrastructures scientifiques et technologiques).

Il comprend trois approches destinées à mieux comprendre les processus physiques qui relient ces voiles de particules stratosphériques et le refroidissement de l'atmosphère :

- l'évaluation des différentes particules candidates, c'est ce sur quoi se penchent les chercheurs de Cambridge, Oxford et Bristol ainsi que le laboratoire Rutherford-Appleton (appartenant au STFC). Il s'agit d'identifier quel serait l'aérosol idéal à injecter dans la stratosphère (il doit posséder une excellente réflectivité solaire, c'est le cas des sulfates), tout en prenant en compte les impacts potentiels sur le climat, la météorologie, les écosystèmes ou encore sur la santé humaine ;
- les mécanismes d'injection font aussi l'objet de recherches notamment par les ingénieurs et chercheurs de l'Université de Cambridge et de Marshall Aerospace, à travers des tests de faisabilité de ballons comme support à l'injection des particules (voir Figure 6).
- enfin, des modélisations du climat et de l'environnement sont réalisées par les équipes d'Oxford, Édimbourg et Bristol, en association avec le Met Office Hadley Centre (centre de recherche du Met Office, l'équivalent britannique de Météo France) afin de mieux comprendre comment ces dispersions de particules agiront. Ces modèles permettront également d'évaluer les conséquences potentielles sur la couche d'ozone, de possibles modifications des précipitations au niveau local, ainsi que sur la chimie de l'atmosphère.

L'annonce de ce projet de recherche, assez controversé, a reçu une certaine couverture médiatique, en particulier pour la composante d'expérimentation à l'aide du ballon. Une partie de la communauté scientifique et des associations environnementales se sont offusquées, dénonçant l'inutilité de ce projet ou sa dangerosité, « ouvrant la porte à des expérimentations à grande échelle ». Face à ces réactions, il a été décidé

de suspendre temporairement cette composante du projet. Il est certain que l'annonce de SPICE a contribué à créer une amorce de débat public au Royaume-Uni.

3.1.2 IAGP

Integrated Assessment of Geoengineering Proposals (évaluation intégrée des propositions de géo-ingénierie), est financé à hauteur de 1,7 M£ sur quatre années par l'EPSRC, avec la collaboration du NERC. Débuté en octobre 2010, son objectif est de mener une recherche de fond multidisciplinaire afin de pouvoir mieux évaluer les différentes techniques et ainsi éclairer le débat. Cela passera par des échanges avec tous les acteurs concernés, incluant le public, afin de produire une base scientifique objective qui puisse servir à la prise de décisions politiques. IAGP rassemble des experts d'horizons très divers, de la modélisation du climat à la philosophie, l'ingénierie ou la sociologie. Six universités britanniques de premier plan (Cardiff, Lancaster, Bristol, East Anglia, Leeds et Oxford), ainsi que le *Tyndall Centre for Climate Change* et le *Met Office*, sont impliqués dans ce projet qui veut explorer toutes les options de géo-ingénierie. Ses objectifs de recherche sont :

- évaluer l'effectivité et les effets secondaires d'un large spectre de méthodes de géo-ingénierie ;
- évaluer la contrôlabilité du climat mondial en utilisant ces techniques ;
- susciter et inclure dans l'évaluation les réactions des parties prenantes.

Quelques sous-objectifs clefs : examiner en détail l'acceptabilité par le public des différentes options de géo-ingénierie, ou encore évaluer la possibilité de contrer des points de non-retour (« *tipping point* ») dans l'évolution du climat. Afin de créer le débat et informer, plusieurs séminaires sont prévus, l'un en mai 2012, le suivant en octobre. Certains résultats de ces recherches ont déjà fait l'objet de publications¹⁴.

3.1.3 Climate Geoengineering Governance

Ce projet, financé à hauteur de 1,3 M£ par l'*Economics and Social Research Council* (ESRC, Conseil pour les recherches économiques et sociales), devrait débuter en mai ou juin 2012. Il concerne principalement l'Université d'Oxford (directeur, Steve Rayner), en collaboration avec University College London (UCL) et l'Université du Sussex. Se plaçant dans le prolongement de l'appel de la *Royal Society* dans son rapport de 2009, ainsi que sur les « Principes d'Oxford » (voir page 20), ce programme se propose d'identifier et d'aborder les défis de la gouvernance.

Les travaux se subdiviseront en trois thèmes de recherche. (Re-)cadrer (« *framing* ») la géo-ingénierie (par exemple, comment est-elle définie en termes sociotechniques et légaux, ou encore quelles conceptions de justice et d'équité peuvent être utilisées pour définir en l'approche ?) ; études des dilemmes que représente le contrôle des technologies de géo-ingénierie ; et enfin, choisir les conditions de gouvernance et de régulation.

3.1.4 AVOID

AVOID¹⁵ (*Avoiding dangerous climate change*) est un programme de recherche financé par les ministères DECC (*Department of energy and climate change*) et Defra (*Department of environment, food and rural affairs*), et conduit par le *Met Office*, en collaboration avec le *Tyndall Centre* (Université d'East

Anglia), le *Grantham Centre (Imperial College London)* et le *Walker Institute for Climate System Research*. Dans le cadre de ce programme, un rapport a été publié (« *The Potential for the Deployment of Negative Emissions Technologies in the UK* ») évaluant les différentes techniques de suppression du dioxyde de carbone atmosphérique. Si le mot géo-ingénierie n'est pas mentionné, les méthodes étudiées recoupent celles qui sont généralement admises comme relevant de cette approche : « arbres artificiels », utilisation de la biomasse pour capturer le CO₂, ou encore renforcement des processus océaniques d'absorption du carbone (augmentation de l'alcalinité).

Ces différentes techniques sont évaluées, tant sur l'aspect de l'efficacité à résorber le CO₂ et à le fixer durablement, que sur les effets négatifs sur l'environnement et le coût de leur mise en œuvre. Toutefois, l'approche est d'avantage portée sur l'utilisation de ces techniques comme moyens de réduire les émissions de CO₂ du Royaume-Uni. Il est conclu que plusieurs solutions ont le potentiel de jouer un rôle non négligeable dans la réduction des émissions du pays d'ici 2030, et que plus généralement, un mélange de plusieurs de ces options pourrait être « viable à une échelle et à un coût raisonnable ». Ces émissions « négatives » (une autre façon de regarder des méthodes de capture du CO₂ atmosphérique), peuvent contribuer à la réduction de l'équivalent de 10 % des émissions actuelles du Royaume-Uni (en particulier celles diffuses : voitures, agriculture). En conséquence, et reconnaissant les risques et inconnues qui demeurent, les auteurs appellent au financement de programmes de recherche dans ce domaine, en particulier pour la technique qui consiste à utiliser la biomasse pour produire de l'énergie avant de capturer le CO₂ issu de la combustion et de le stocker (BECS).



3.1.5 Experiment Earth

En réaction à l'appel de la *Royal Society* à plus d'implication du public dans les débats scientifiques sur la géo-ingénierie, et également afin de comprendre quel est le positionnement du public face à la recherche dans ce domaine, le NERC a financé une étude sur ce sujet : « *Experiment Earth. Public dialogue on geoengineering* ». Celle-ci s'est appuyée à la fois sur des séminaires organisant un dialogue entre le public et des chercheurs, ainsi que sur un sondage en ligne. Le chapitre 5 couvre plus en détails les résultats issus de ce projet.

3.2 Recherche menée par les universités et laboratoires

Trois universités forment le cœur du dispositif actuel de recherche. L'Université de Bristol, qui figure certainement parmi les centres de recherche en géo-ingénierie les plus actifs au Royaume-Uni, participe activement au projet SPICE. Les ensei-

gnants-chercheurs de Bristol soulignent également l'intérêt grandissant que portent leurs étudiants (en licence et master) aux problématiques de géo-ingénierie. L'Université d'East Anglia (UEA), qui héberge le siège du *Tyndall Centre for Climate Change Research*, est très impliquée dans la recherche sur l'évolution du climat. Se fondant sur cette expertise reconnue, elle s'intéresse désormais à la géo-ingénierie et constitue l'un des noyaux du programme IAGP. Enfin, l'Université d'Oxford est également un pôle d'excellence en matière de recherche sur le changement climatique. Utilisant ces ressources, un centre de recherche spécialisé dans l'étude des grands défis du 21^{ème} siècle, la *Oxford Martin School*, fondée en 2005, s'est naturellement intéressée à la géo-ingénierie. Ses cher-

cheurs ne cachent pas leur ambition de devenir un centre de recherche majeur et multidisciplinaire, tout en bâtissant un réseau d'experts tant au niveau national, qu'international.

Les tableaux 1 et 2 dressent un panorama de la recherche dans les principales universités britanniques qui s'y intéressent.

3.3 Projets internationaux, coopérations

Plusieurs scientifiques britanniques sont impliqués dans le projet GeoMIP²³ (*Geoengineering Model Intercomparison Project*), dont l'objet est de réaliser et comparer des modèles impliquant des méthodes de gestion des rayonnements

Institution	Nature des travaux	Intensité de recherche
Université de Bristol	Rôle des aérosols dans la réduction des températures : <i>School of Geographical Sciences</i> (Dan Lunt, Andy Ridgwell), <i>Department of Earth Sciences</i> (Matthew Watson). Modification de l'albédo (plantes présentant un plus grand pouvoir réfléchissant) : <i>School of Biological Sciences</i> (Joy Singarayer, Alistair Hetherington). Evaluation des différentes techniques, modélisations des impacts (plusieurs départements) ¹⁶	*****
NOC (Southampton)	Transfert de CO ₂ dans les océans. De manière annexe à ces travaux, intérêt pour les approches de géo-ingénierie qui visent à renforcer la capture océanique du CO ₂ , principalement à travers des modèles, plusieurs articles allant dans ce sens ont été publiés ¹⁷	**
Université d'Exeter	Un nouveau projet de recherche, G360 ¹⁸ , rassemble des chercheurs de l'université à travers une approche multidisciplinaire (« 360° ») afin d'évaluer la faisabilité, les risques et les bénéfices. Ils s'intéressent à un large spectre de disciplines ¹⁹ (ingénierie, engagement du public, acceptabilité, éthique, économie, gouvernance, juridique)	***
Imperial College London	Ne réalise pas directement de la recherche en géo-ingénierie mais s'intéresse à des problématiques très liées et dispose donc d'une expertise potentielle.	*
Tyndall Centre - University of East Anglia	Évaluation des techniques, sur la modélisation et l'étude de leurs effets (en particulier pour les techniques de suppression du CO ₂ atmosphérique). Ses travaux recoupent fortement ceux du programme IAGP (Naomi Vaughan, plusieurs élèves doctorants). Utilisation du biochar, avec comme utilisation potentielle, le retrait de CO ₂ atmosphérique (Brian Reid). Océans et interaction atmosphère-océan (Peter Liss, Andrew Watson qui travaille sur la fertilisation des océans).	*****
Université de Cardiff	Point de vue sociologique et perception par le public de ces méthodes. Évaluation par le public des arguments, des preuves avancées et de la communication. Article publié en 2010 qui fait référence : « <i>Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications</i> ».	****
Université d'Oxford	« <i>Oxford Geoengineering Programme</i> » à l'origine des « <i>Oxford Principles</i> ». Travaille sur tous les aspects de la géo-ingénierie (science du climat, modélisation, économie, éthique, gouvernance, gestion du risque). Ne cache pas son ambition de devenir un centre de recherche majeur et multidisciplinaire, tout en bâtissant un réseau d'experts tant au niveau national, qu'international.	*****
Met Office	Méthodes de gestion du rayonnement solaire (aérosols, blanchissement des nuages). Simulations montrent que rendre les nuages plus blancs dans le sud de l'océan Atlantique, pourrait conduire à une réduction importante de la pluviométrie, de l'ordre de 30 % sur la forêt amazonienne.	***
Université de Cambridge	Contribuera à développer le ballon de démonstration de SPICE.	**
Université de Lancaster	Analyse du changement climatique du point de vue des théories des systèmes et contrôles. Petit projet de recherche sur l'imaginaire associé à la géo-ingénierie du climat, qui explore quelles sont les présuppositions et motivations des scientifiques qui travaillent sur ce sujet.	**
Université de Leeds	Expertise de premier plan sur le rôle des aérosols et de la chimie atmosphérique dans le climat (modèle aérosol-chimie-climat « <i>UK Chemistry and Aerosol project</i> »). Programme de recherche utilisant ce modèle pour évaluer les effets de méthodes d'ingénierie stratosphérique. Une position doctorale, financée par le NERC, s'intéresse à la reforestation.	****
Université d'Edimbourg et UK-BRC	Biochar, issu de la conversion thermochimique de matériaux organiques en l'absence d'oxygène, peut être utilisé pour amender les sols, mais également pour stocker du carbone. UK-BRC promeut le biochar en tant que technique d'« émissions négatives ». Notons que certains travaux récents remettent en question la stabilité sur le long terme du biochar et donc sa capacité à stocker durablement le carbone ²⁰ .	****
University College London	Questions juridiques liées au déploiement de techniques de géo-ingénierie.	***

Tableau 1

Institutions	Moyens consacrés	Participation aux principaux projets de recherche
Université de Bristol	Au total une quinzaine de personnes. 5 étudiants doctorants (notamment : évaluation du mode d'action et des conséquences des techniques de gestions du rayonnement solaire). L'un de ces PhD est financé par le NERC et l'EPSRC dans le cadre du projet IAGP, les autres par les départements de l'université.	SPICE (Matthew Watson est le directeur du Projet SPICE), 1 doctorant financé par IAGP
NOC (Southampton)	Un petit groupe de chercheurs (Shepherd, Richard Lampitt, Damon Teagle). Pas de financements fléchés vers des travaux labélisés géo-ingénierie, mais un étudiant vient de débiter un doctorat spécifiquement consacré à la géo-ingénierie.	Le NOC a contribué à l'expérimentation LOHAFEX ²¹
Université d'Exeter	Une dizaine, dont Tim Lenton, Jim Haywood, Peter Cox. Nombreux liens avec le centre de recherche sur le climat du Met Office. Modélisation des effets de l'approche par gestion du rayonnement solaire.	L'université accueillera le prochain séminaire du projet de coopération internationale en modélisation GeoMIP
Imperial College London	Joanna Haigh et Georgina Mace ont contribué au rapport de la <i>Royal Society</i> . Existence d'un laboratoire de premier ordre pour l'étude de la capture du carbone. Centre reconnu en modélisation du climat.	Impliqué dans le programme AVOID
Tyndall Centre et University of East Anglia	Une quinzaine de chercheurs actifs. Dès 2009, un groupe de recherche, « <i>GeoEngineering Assessment & Research</i> » ²² (GEAR), s'était formellement mis en place au sein de l'université, notamment soutenu par des financements privés.	Cœur du programme IAGP
Université de Cardiff	L'Ecole de psychologie et le « <i>Understanding Risk Research Group</i> ». Petit groupe (Nick Pidgeon, certainement l'un des chercheurs britanniques qui s'est le plus intéressé à ces questions), Adam Corner, Karen Parkhill.	IAGP
Université d'Oxford	« <i>Oxford Martin School</i> » (Richard Darnton, Steve Rayner, Tim Kruger, Gideon Henderson...). « <i>Oxford Geoengineering Programme</i> ».	Impliquée dans SPICE, IAGP et « <i>Climate Geoengineering Governance</i> ».
Met Office	Petit groupe de chercheurs.	Partenaire du projet IAGP, indirectement dans SPICE qui utilisera l'un de ses modèles
Université de Cambridge	Département d'ingénierie. Plusieurs élèves doctorants impliqués dans le projet SPICE.	SPICE
Université de Lancaster	Au sein du « <i>Lancaster Environment Centre</i> », un petit groupe d'une douzaine de chercheurs, post docs, et élèves doctorants s'intéresse au système climatique et aux boucles de rétroaction. Andrew Jarvis (IAGP).	IAGP, une position de chercheur-associé est financée dans ce cadre à partir d'avril 2012
Université de Leeds	Département environnement, en particulier au sein du « <i>Physical Climate Change Group</i> ». Piers Forster (sujets très liés à la géo-ingénierie : influence des traînées de condensation des avions sur les nuages, rôle des aérosols volcaniques).	IAGP, avec plusieurs recherches doctorales portant sur les aérosols
Université d'Édimbourg et le UK-BRC (Biochar Research Centre)	Stephen Salter, professeur émérite d'ingénierie, certainement l'un des principaux défenseurs de la géo-ingénierie au Royaume-Uni. Il a développé, avec John Latham, le concept du blanchissement des nuages par des moyens mécaniques (eau salée). « <i>UK Biochar Research Centre</i> », une communauté dynamique d'une vingtaine de chercheurs travaillent au sein de ce centre sur le biochar et la géo-ingénierie.	
University College London	Catherine Redgewell, de la faculté de droit, spécialiste du droit international de l'environnement, est fréquemment consultée. Elle a notamment conseillé le GIEC sur les structures de gouvernance qui seraient appropriées pour encadrer l'utilisation de telles techniques.	IAGP (comité consultatif)

Tableau 2

solaires afin de mieux comprendre quels seraient leurs effets possibles. Ce groupe ne cherche pas à promouvoir la géo-ingénierie du climat, ou à se positionner sur la question, seulement à coordonner les modèles développés. Parmi les universités britanniques participantes : Leeds, Cambridge, Bristol et Exeter (avec le *Met Office*). Le second séminaire du projet est organisé fin mars 2012 à Exeter²⁴.



Le *Tyndall Centre*, les universités d'Édimbourg et d'Exeter seront également impliqués dans le nouveau programme de recherche européen « *European Trans-disciplinary Assessment of Climate Engineering* » (EuTRACE). Ce programme évaluera les

connaissances en géo-ingénierie, selon une approche transdisciplinaire, qui inclura notamment la mise en place d'une plateforme internet de partage afin de diffuser les résultats des recherches.

3.4 Initiatives privées

Il existe une initiative privée, lancée le 9 février 2007 par Sir Richard Branson, l'entrepreneur britannique et fondateur de la marque Virgin. Le *Virgin Earth Challenge* est un concours doté d'un prix de 25 M\$ récompensant une « initiative réussie de commercialisation d'un procédé retirant les GES présents dans l'atmosphère et les stockant durablement sans risque pour l'environnement ». Outre Sir Richard, le jury comprend des scientifiques (James Lovelock, Tim Flannery, James Hansen et Crispin Tickell), ainsi que l'ancien Vice-président Al Gore. Près de cinq ans après l'annonce du lancement, et 2 600 soumissions de projets, 11 organisations ont été sélectionnées en novembre 2011. Parmi les solutions proposées, quatre procédés retirent directement le CO₂ de l'atmosphère,

quatre utilisent la biomasse (généralement le biochar) et une solution repose sur la capture par des procédés géochimiques. Le vainqueur final n'a pas encore été annoncé.

3.5 Réflexions sur la recherche en géo-ingénierie au Royaume-Uni

Des entretiens avec les chercheurs impliqués dans ce domaine, il ressort un appel quasi unanime à accroître l'effort de recherche fondamentale et systématique. En effet, les inconcues, simplement en matière de compréhension du système climatique, restent encore très nombreuses. Les approches de géo-ingénierie ouvrent un nouvel espace de trajectoires possibles pour contrer le réchauffement climatique, mais également un ensemble de climats que l'homme pourrait générer, pour lesquels les scientifiques disposent de très peu de connaissances.

Une partie non négligeable des premières études, sur lesquelles se fondent certains des appels en faveur de la géo-ingénierie du climat (souvent publiées avant 2006), ne reposent pas toujours sur des études scientifiques complètes et exhaustives. Il est d'ailleurs souvent difficile de déterminer sur quelles bases reposent certaines estimations des coûts de développement et de déploiement de ces techniques, et les chiffres avancés ne peuvent pas toujours être vérifiés. Consciente de ce problème, la *Royal Society* avait appelé dans son rapport de 2009 à plus de recherche fondamentale, avançant le chiffre de 100 M£ sur 10 ans à investir au Royaume-Uni. Il est clair que les montants alloués par les conseils de recherche (EPSRC et NERC) sont bien inférieurs, de l'ordre de 4 à 5 M£ sur 3 ans, mais ces projets (SPICE, IAGP, *Experiment Earth*, *Climate Geoengineering Governance*) ont le mérite d'exister. Ils posent surtout les bases d'une recherche britannique plus systématique des diverses techniques, de leurs modes d'action, ainsi que de l'évaluation de leurs effets et conséquences non seulement environnementales, mais également économiques et sociétales. Toutefois, il ne semble pas exister, pour le moment, de nouveaux projets de financement d'études en géo-ingénierie. Il est possible qu'il n'y en ait pas de nouveaux avant quelques années, en fonction des résultats des projets actuels.

Mis à part les quelques partisans et défenseurs acharnés de la géo-ingénierie, la plupart des scientifiques qui travaillent sur ces questions restent sceptiques quant aux bénéfices potentiels, mais soulignent que la recherche est indispensable afin de pouvoir prendre des décisions pleinement informées.

La recherche en géo-ingénierie du climat est émergente au Royaume-Uni. Mais le financement de ces quelques projets transdisciplinaires ainsi que la mise en place de réseaux (informels ou formels) des chercheurs, ont certainement lancé une nouvelle étape (incluant une nouvelle série d'études doctorales). Il est indubitable que le Royaume-Uni possède une certaine avance dans la recherche en géo-ingénierie, avec les États-Unis et l'Allemagne. Il faut cependant relativiser, en soulignant que les efforts consacrés ne sont en rien comparables avec ceux affectés à la recherche classique en science du climat et dans la lutte contre le changement climatique.

4. Institutions publiques : gouvernement, parlement et sociétés savantes

4.1 Le gouvernement et le parlement

Les gouvernements britanniques successifs se sont tous attachés à n'apparaître en aucun cas comme soutenant la géo-ingénierie. La position officielle défendue, tant sur la scène intérieure qu'au niveau international, reste la nécessité impérieuse de réduire les émissions de GES au niveau mondial. Prendre une position qui pourrait signifier reconnaître la géo-ingénierie comme une option valable risquerait de décrédibiliser cette volonté de placer le pays sur la voie de la transition vers une économie décarbonée.

Ainsi, en 2009, interrogée dans le cadre d'une audition au parlement²⁵, Joan Ruddock, sous-secrétaire d'État parlementaire (Labour) au sein du DECC, a précisé que le ministère ne doit pas évaluer la géo-ingénierie comme une option parmi d'autres : « *il s'agit d'une option que je considère comme très basse sur la liste des priorités pour un potentiel plan B, car nous devons concentrer tous nos efforts sur le plan A* ». Pous-sée à expliquer pourquoi prendre une telle position qui pourrait être considérée comme de la « *négligence* » étant donnée l'urgence de la situation, la ministre a précisé que « *si le plan A a échoué, il y a peu de raisons que le plan B réussisse* ». « *Soutenir la recherche en géo-ingénierie, a-t-elle ajouté, serait perçu comme le signal que le gouvernement n'est pas entièrement engagé dans les efforts de réduction des émissions de GES* ». Cependant, lors de cette même audition, certains membres du gouvernement, en particulier Lord Drayson, le ministre pour la science et l'innovation, ont nuancé cette position, défendant qu'il « *ne faut pas placer tous nos œufs dans le même panier* »²⁶ et que la recherche est nécessaire pour pouvoir, le cas échéant, prendre des décisions informées (« *on ne sait jamais* »). La politique du gouvernement, légèrement ambivalente, serait donc de garder un œil (discret ?) sur ces techniques (« *watching brief* »), tout en concentrant tous ses efforts sur le « *plan A* » (réduire les émissions de GES). Il serait donc exagéré d'affirmer que le gouvernement britannique dispose d'une politique claire et définie relative à la géo-ingénierie, à tenter même qu'il ait une politique. Il est sans doute plus juste de dire que le gouvernement fait tout pour ne pas se voir associer à ces techniques controversées, tout en ne bannissant pas la recherche fondamentale dans ce domaine.

« *Foresight* », la cellule d'études stratégiques et prospectives du *Government Office for Science*, ne fait que mentionner la géo-ingénierie du climat dans son récent rapport sur les dimensions internationales du changement climatique, publié en 2011²⁷. Il y est seulement indiqué que le Royaume-Uni a le potentiel de jouer un rôle de premier plan dans ces technologies. De son côté, le professeur Sir John Beddington, conseiller scientifique en chef du gouvernement, avait précisé en 2009 qu'un « *investissement modeste dans la géo-ingénierie est ce qu'il faudrait envisager pour le moment* », en ajoutant que ces techniques « *ne constituent pas la solution, mais font partie de la solution* »²⁸.

Très tôt et à deux reprises, la Chambre des communes du parlement britannique s'est intéressée à la géo-ingénierie. D'abord dans le cadre d'un rapport intitulé « *Engineering: turning ideas into reality* », dont les auditions contributives



Commission pour la science et la technologie de la Chambre des communes.

Source: UK Parliament

ont eu lieu en 2008 et 2009, pour une publication en mars 2009, c'est-à-dire avant le rapport de la *Royal Society*. Dans ce document, après avoir passé en revue les différentes techniques (aussi bien de gestion du rayonnement solaire, que de suppression du CO₂) et avoir interrogé plusieurs ministres et scientifiques, la commission pour la science et les universités a tiré plusieurs conclusions. Tout d'abord, il lui semble impératif de soutenir la recherche afin de pouvoir évaluer le potentiel de ces technologies, tout en considérant la géo-ingénierie non pas comme un « plan B », mais comme une option parmi les autres. Elle qualifie même de « négligence » des décisions qui viseraient à ne pas les évaluer. Les parlementaires demandent également au gouvernement de clarifier sa position, qui leur est apparue « confuse ». Ils appellent également les conseils de recherche à financer des projets destinés à mieux comprendre ces techniques. Ce qui a en effet été le cas deux ans plus tard, avec les projets IAGP et SPICE. Reconnaisant l'importance de prendre en compte les aspects sociaux, éthiques et légaux, elle souligne la nécessité d'un débat public transparent et rationnel, ainsi que de l'implication active au niveau international.

Un an plus tard, la Commission pour la science et la technologie de la Chambre des Communes, a réalisé une étude consacrée à la réglementation de la géo-ingénierie (« *The Regulation of Geoengineering* »)²⁹. Ses travaux se sont déroulés en collaboration avec leurs homologues de la Chambre des représentants des États-Unis (« *US House of Representatives Science and Technology Committee* »), ce qui constitue une première en la matière. Du point de vue du besoin de réglementation, la commission fait la distinction entre les techniques qui retirent du CO₂ de l'atmosphère, pour lesquelles une simple évolution des accords internationaux existants suffirait, et les techniques qui agissent sur l'énergie solaire reçue par la Terre, pour lesquelles un nouveau cadre de réglementation leur semble nécessaire. La commission n'appelle pas nécessairement à un traité international, mais plutôt à des travaux exploratoires, base d'un futur cadre réglementaire. Un ensemble de principes largement acceptés (par exemple la transparence en matière de recherche, l'accès ouvert aux publications, le développement d'une gouvernance avant tout déploiement) formerait le fondement d'une telle régulation. Sur cet aspect des principes, les « *Oxford Principles* », rendus publics lors des auditions, se veulent une réponse à l'appel de la commission.

Enfin, notons que le *Parliamentary Office for Science and Technology* (POST, Office parlementaire pour la science et

la technologie), un organe qui informe les parlementaires de manière neutre, a publié en mars 2009 une note de synthèse (POSTnote, *Geo-engineering research*) résumant les différentes techniques et faisant le point sur les recherches en cours ainsi que les questions juridiques et éthiques.

Si le gouvernement a pour politique de ne pas avoir de politique relative à la géo-ingénierie du climat et cherche avant tout à ne pas apparaître associé à ces techniques (pour ne pas décrédibiliser son engagement à réduire les émissions de GES), le parlement semble avoir pris une approche légèrement plus pragmatique, et sans doute plus conforme aux attentes de la communauté scientifique. Il appelle en effet à réaliser un effort de recherche afin d'évaluer rationnellement ces techniques, tout en reconnaissant le besoin de réglementation et de débat public.

4.2 La Royal Society

Confrontée à l'émergence d'un débat public sur la géo-ingénierie qu'elle considérait comme étant mal informé, la *Royal Society* a décidé en 2008 de réaliser une étude bibliographique passant en revue les différentes techniques de géo-ingénierie (voir Figure 9), en veillant à garder un point de vue neutre. Ce rapport, publié en septembre 2009, est largement regardé comme l'un des plus exhaustifs réalisés à cette date par une institution publique.

La Royal Society tire deux principales conclusions. Elle souligne tout d'abord que les efforts déployés afin de réduire les émissions et développer des mesures d'adaptation doivent être poursuivis et même intensifiés. La géo-ingénierie pourrait éventuellement devenir un composant d'un ensemble de mesures plus large. Il serait alors préférable d'adopter des techniques de suppression du CO₂ qui sont complémentaires des mesures conventionnelles de réduction des émissions. Toutefois, en cas de besoin, seules les techniques de gestion de rayonnement solaire pourraient être utilisées comme « solution d'urgence ». Elles ne devraient néanmoins être appliquées que sur une période limitée et avec une stratégie de retrait claire et réaliste. La seconde recommandation est d'accroître les efforts de recherche et de développement en géo-ingénierie, afin d'être en mesure de mieux estimer son efficacité, ses coûts et ses risques par la compréhension des phénomènes à l'œuvre. Depuis, les programmes financés (SPICE, IAGP, *Experiment Earth*...) n'ont pas atteint l'ampleur recommandée par la société savante. La publication de ce rapport a fait l'objet d'un assez large écho dans la presse, reprenant en particulier l'appel à financer la recherche en géo-ingénierie.

Le 1^{er} décembre 2011 a été rendu public un rapport issu des travaux de la « *Solar Radiation Management Governance Initiative* » (SRMGI)³⁰. Ce groupe de travail a été lancé et financé par la Royal Society (avec la contribution du *Environmental Defense Fund* et de TWAS) afin de réfléchir sur la gouvernance de la recherche en matière de gestion du rayonnement solaire. Associant de nombreux experts étrangers issus de 22 pays, ce document appelle à plus de recherche dans ce domaine. Surtout, il reconnaît que la gouvernance de la recherche au niveau international fait défaut et l'importance de la mettre en place de manière coordonnée, transparente et internationale, particulièrement avant toute tentative de

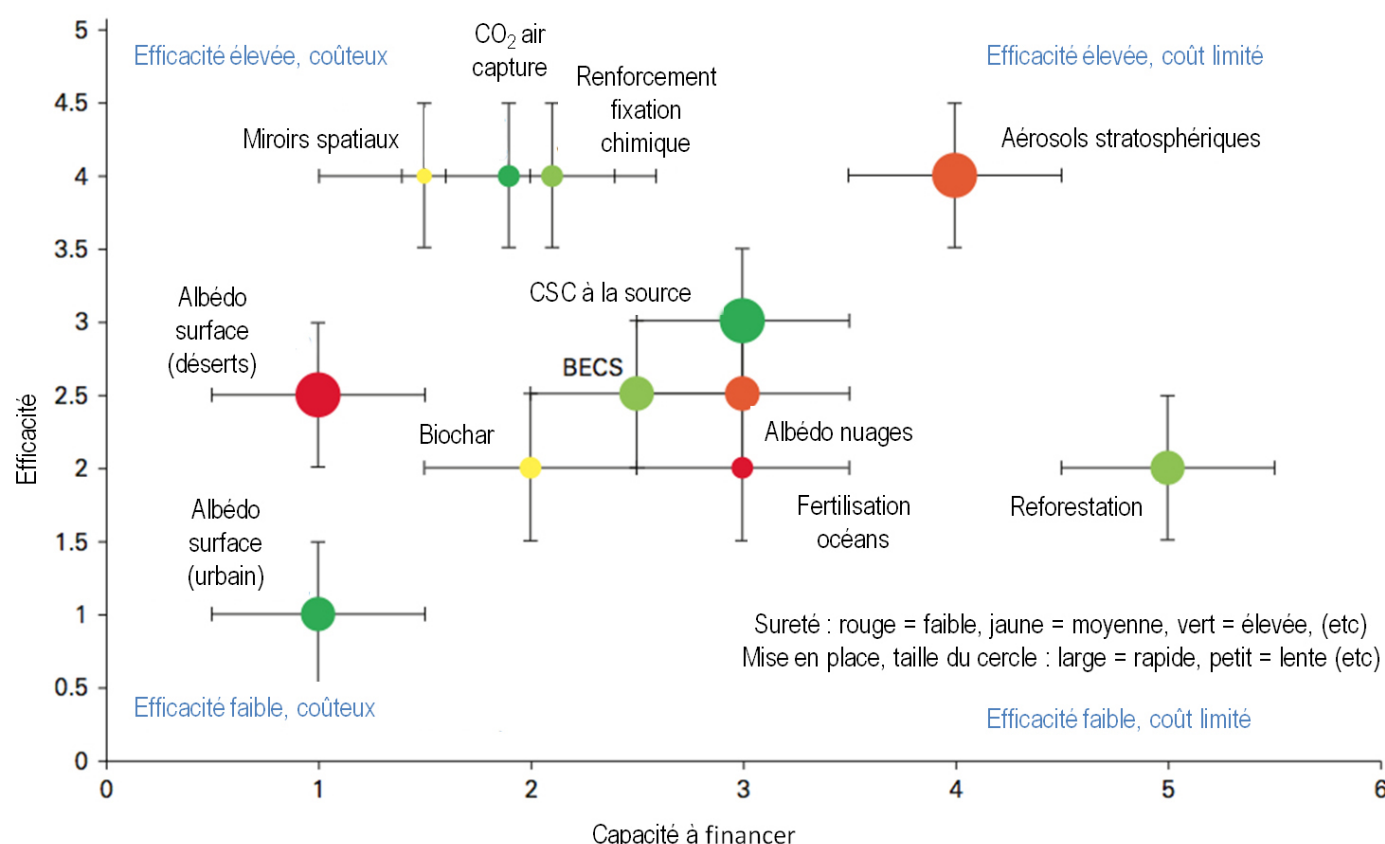


Figure 9. Évaluation préliminaire des techniques de géo-ingénierie effectuée par la Royal Society

Source : Royal Society, 2009

développer des programmes expérimentaux :

- si l'approche de gestion du rayonnement solaire apparaît risquée, un moratoire sur la recherche dans ce domaine le serait plus encore, du fait de l'extrême difficulté à pouvoir alors évaluer leurs conséquences. Un tel moratoire serait, de plus, compliqué voire impossible à faire respecter ;
- ces techniques ne permettent en aucun cas d'affaiblir les efforts internationaux de réduction des émissions de GES ;
- les auteurs du rapport admettent que la recherche dans ce domaine pourrait générer une dynamique de soutien à leur déploiement, mais soulignent qu'ignorer ces techniques ne réduit en rien la possibilité de les utiliser ; en fait elles pourraient même l'accroître ;
- certaines expérimentations d'échelle moyenne à large sont risquées et nécessitent donc une réglementation appropriée au niveau international.

Depuis la publication du rapport de 2009, la Royal Society place désormais son action dans le soutien à la mise en place de structures de gouvernance de la recherche, en particulier pour les méthodes de gestion du rayonnement solaire. Son approche est d'intéresser les autres pays à ces questions, tout en ne cherchant en aucun cas à imposer des structures ou méthodes de discussion ou de réglementation. L'idée est plutôt de faire reconnaître l'importance de coopérer et coordonner la recherche au niveau international et d'associer les différents acteurs à cette réflexion. Plusieurs missions ont été réalisées à l'étranger, en particulier au Pakistan et en Inde, où les échos ont été favorables.

4.3 Institution of Mechanical Engineers

L'*Institution of Mechanical Engineers* (IMechE) a publié en août 2009 un rapport intitulé « *Geo-engineering : giving*

us the time to act ? » (géo-ingénierie: nous donner le temps d'agir?). Ce titre pourrait résumer la position tenue par cette société savante, dont l'influence n'est pas négligeable. En effet, l'IMechE considère que les techniques de géo-ingénierie sont peut-être les seules solutions capables de donner les quelques années supplémentaires dont nous aurions besoin pour mettre en place la décarbonisation de l'économie et réduire les émissions de GES. C'est l'approche pragmatique MAG (Mitigation, Adaptation, Géo-ingénierie) : la géo-ingénierie du climat doit être considérée comme une composante intégrée et indissociable de la lutte contre le changement climatique.

Ce rapport a exploré trois techniques et évalué leur potentiel (« *Cooling the Planet* »). Pour ces ingénieurs, ces trois solutions apparaissent les plus prometteuses :

- les « arbres artificiels », rassemblés en forêts. La conception, de ces arbres, par Lackner, a depuis été largement reprise (voir Figure 10). Le coût à l'unité d'un de ces arbres est évalué à 20 000 \$, et 100 000 seraient requis pour capturer les émissions diffuses de CO₂ du Royaume-Uni. Cependant, ces estimations font l'objet d'une remise en cause par certains scientifiques ;
- des tubes remplis d'algues recouvrant les bâtiments. Ces algues seraient régulièrement récoltées pour produire de l'énergie en association avec des systèmes de capture et stockage du carbone (CSC). IMechE souligne qu'une telle approche présenterait l'avantage de ne pas entrer en conflit avec l'utilisation de territoires pour l'agriculture ;
- accroître la réflectivité des surfaces, en particulier en milieu urbain (où cette technique contribuerait à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain), en soulignant la simplicité de cette approche. Cependant, cette technique aurait un effet très limité au niveau local.



Figure 10. Forêt d'arbres artificiels et centrales solaires
Source : Institution of Mechanical Engineers

L'IMEchE propose également dans ce rapport une feuille de route ambitieuse détaillant les étapes à réaliser au cours des 75 à 100 prochaines années pour associer étroitement les efforts de réduction des émissions de GES avec la géo-ingénierie. Selon ce plan, les premiers démonstrateurs d'arbre artificiel verraient le jour en 2014, pour une première « forêt » en place quatre ans plus tard. Dans les décennies suivantes, les efforts se concentreraient sur le déploiement des énergies renouvelables et du parc nucléaire, ou encore la mise en place de réseaux de transport électrique. En 2040, les forêts artificielles seraient déployées dans le monde. À la fin du XXI^{ème} siècle, la transition vers une économie décarbonée serait achevée, et les arbres artificiels commenceraient à être retirés. La géo-ingénierie apparaît clairement comme une solution uniquement destinée à gagner du temps. IMechE appelle à soutenir la recherche et s'appuyer sur les atouts du pays en terme d'ingénierie et de modélisation du climat. Elle considère comme urgent de piloter des programmes de démonstration afin d'identifier les meilleures technologies. Une politique ambitieuse de soutien aux arbres artificiels permettrait de positionner très tôt le Royaume-Uni sur un secteur industriel d'avenir et maximiser ainsi les opportunités économiques et commerciales du pays.

L'institution continue de soutenir résolument cette approche qu'elle qualifie de « pragmatique » : placer la géo-ingénierie au même niveau que la réduction des émissions de GES. Toutefois, seule la technologie des arbres artificiels continue d'être mise en avant, par exemple dans le cadre d'un « policy statement », publié en juin 2011 et intitulé « *Negative emissions and carbon recycling air capture* ». Dans celui-ci, l'IMEchE se désolé que les décideurs politiques continuent d'ignorer largement le rôle que pourraient jouer les « émissions négatives ».

4.4 La Régulation et la gouvernance de la recherche : les Oxford Principles

L'ensemble des acteurs publics qui sont intervenus dans ce débat émergent reconnaissent la nécessité de définir des règles aptes à encadrer les travaux de recherche et d'éventuelles expérimentations (en particulier pour les méthodes de gestion du rayonnement solaire). Cette réflexion internationale

sur la gouvernance doit prendre en compte les questions sociales et éthiques, tout en incluant le débat et l'information du public.

Un groupe d'universitaires d'Oxford a proposé une série de principes destinés à guider la recherche en matière de géo-ingénierie. Ce « code de conduite » est désormais connu sous le nom d'*Oxford Principles*, il comprend cinq principes :

- **la géo-ingénierie doit être réglementée comme un bien public.** Si l'implication du secteur privé ne doit pas être prohibée, voire peut-être même encouragée, celle-ci doit être réglementée dans l'intérêt général, par des organismes appropriés au niveau national et/ou international ;
- **participation du public dans les processus de décision.** Autant que possible, les chercheurs en géo-ingénierie, doivent notifier, consulter et idéalement obtenir l'approbation informée de ceux qui seraient affectés par ces activités de recherche ;
- **divulgaration de la recherche et publication ouverte des résultats.** Il est essentiel que tous les résultats de toute recherche en géo-ingénierie, incluant des résultats négatifs, soient rendus publics ;
- **nécessité d'une évaluation indépendante des impacts de la recherche en géo-ingénierie.** Cet organisme d'évaluation peut être, le cas échéant et en fonction des impacts, international et/ou régional. Ces évaluations doivent couvrir à la fois les impacts environnementaux et socio-économiques ;
- **gouvernance avant déploiement.** Toute décision liée au déploiement ne doit être prise seulement si des structures robustes de gouvernance existent au préalable, utilisant autant que possible des règles et institutions déjà existantes.

Dans sa réponse à la publication du rapport de la Commission pour la science et la technologie, où figure l'énoncé des principes d'Oxford, le gouvernement (en l'occurrence le DECC) les approuve (« endorse »), sous réserve de clarifier et préciser certains points. Il est donc sans doute possible d'avancer qu'actuellement ces principes constituent, de facto, la référence sur laquelle se base la politique du gouvernement en matière de gouvernance de la recherche en géo-ingénierie.

5. L'opinion publique et les médias

5.1 La perception du public

L'une des recommandations clefs de la *Royal Society* était d'initier au plus vite un dialogue avec le public afin d'explorer l'attitude du public et de la société vis-à-vis de la géo-ingénierie. Il semble exister une réelle demande de la part des scientifiques, comme des décideurs, d'impliquer le public le plus tôt possible dans le processus de réflexion sur la recherche. Deux principales études sur ce sujet ont été menées au cours de ces trois dernières années : *Experiment Earth* et une évaluation de la perception du projet SPICE. Ces deux études reposent sur des séminaires auxquels sont invités des groupes de personnes censés représenter un échantillon de la société britannique. Durant ces séminaires, les chercheurs n'ont pas simplement posé des questions au public, mais engagé un dialogue grâce à l'intervention de scientifiques, afin de déboucher sur une prise de position informée des personnes interrogées.

Suppression du CO₂

Systématiquement mis en avant comme la technique préférée de géo-ingénierie. La **reforestation** et le **biochar** sont vues comme des approches « naturelles » et préférées pour cette raison.

Le niveau de soutien pour les méthodes basées sur l'utilisation des océans, telles que la **fertilisation** ou l'**acalinisation**, est bas. Cependant, lors du second séminaire, les participants sont devenus plus enclins à les considérer.

Le soutien aux **arbres artificiels** a augmenté durant les séminaires. Les participants apprécient le fait que cette technologie peut être mise en place localement, sans avoir besoin d'une réglementation internationale, avec des effets plus rapides que la reforestation.

Gestion du rayonnement solaire

Généralement moins d'adhésion à ces techniques, perçues comme ne s'attaquant pas à la racine du problème du changement climatique (considérée par les participants comme étant les GES).

Le **blanchissement des nuages** et les **aérosols stratosphériques** sont les deux technologies les plus positivement perçues, de cette classe de technologies, mais ne sont pas soutenues par la majorité.

Les **miroirs spatiaux** sont vus comme onéreux et risqués, tandis que **peindre les toits en blanc** est considéré comme probablement inefficace et irréalisable. Les deux ont reçu peu de soutien.

Figure 12. Perception de la géo-ingénierie

Source: Ipsos MORI pour le NERC

5.1.1 Experiment Earth

Cette recherche expérimentale a été conduite par Ipsos MORI pour le NERC. Trois groupes (85 personnes au total), se sont réunis durant deux jours, à une semaine d'intervalle. Chaque session comportait un dialogue entre le public, des scientifiques et des spécialistes des questions éthiques, portant sur neuf techniques de géo-ingénierie. La séparation d'une semaine entre les deux séminaires permettait aux participants de réaliser leurs propres recherches et réfléchir sur ce dont ils avaient discuté (voir Figure 11). Il faut noter que cette étude est avant tout qualitative, et non pas quantitative (les groupes étant trop petits). Les principaux résultats sont les suivants :

- la connaissance de la géo-ingénierie est faible. Au cours des dialogues, les vues sur ces techniques sont devenues plus sophistiquées et fines. Le soutien à certaines solutions de géo-ingénierie s'est accru, tandis qu'il déclinait pour d'autres, même si ces changements sont presque tous statistiquement insignifiants. Aucun des participants n'était violemment opposé par principe à la géo-ingénierie dans son ensemble, mais il y a eu l'expression de sérieuses inquiétudes vis-à-vis de certaines technologies ;
- la perception qu'ont les participants de la gravité du changement climatique affecte leurs vues sur la géo-ingénierie. La majorité accepte le besoin potentiel de recourir à ces techniques si les efforts d'atténuation (mitigation) de ce changement ne s'avèrent pas assez efficaces ;

« La recherche en elle-même, ça me va tout à fait. Mais passer à la grandeur nature, c'est là où je commencerais à avoir des réserves » (Riley, Norwich)

- les participants pensent qu'il est à la fois éthiquement et pratiquement important de lier toute nouvelle solution de géo-ingénierie à la poursuite des efforts d'atténuation, reconnaissant qu'une solution seule ne puisse pas être suffisante. La majorité veut combiner différentes approches internationales de géo-ingénierie avec des efforts internationaux, nationaux et individuels de réduction des émissions de CO₂. Ceci va à l'encontre de l'argument de « l'aléa moral », selon lequel la géo-ingénierie saperait le soutien populaire aux efforts de d'atténuation ou d'adaptation ;

- certaines technologies sont considérées comme plus acceptables que d'autres (voir Figure 12).

Lors de ces dialogues, le public a accordé un soutien prudent aux efforts de recherche dans ce domaine. Les participants ont posé un certain nombre de questions clefs qui révèlent les aspects auxquels les participants attachent le plus d'importance, ainsi que les lacunes dans leurs connaissances en science du climat.

5.1.2 Étude sur le projet SPICE

Le groupe de sociologues de l'Université de Cardiff, autour du professeur Nick Pidgeon, a mené une étude (également fondée sur le dialogue avec des groupes d'une trentaine de participants conviés à participer durant un jour et demi à un séminaire) se focalisant sur le projet SPICE. Cette étude a été commissionnée par l'EPSRC, dans le cadre du projet IAGP, afin de contribuer à déterminer si le conseil de recherche doit ou non financer la composante expérimentale de SPICE.

Il ressort de leur étude que les participants soutiennent le besoin de recherche en matière de géo-ingénierie. Toutefois, la recherche sur la technologie des aérosols stratosphériques (telle que conduite dans le cadre de SPICE) ne rassemble qu'un soutien limité, que l'on peut qualifier de « hautement conditionnel », ou encore « d'acceptation avec réticence ». De nombreuses inquiétudes sont présentes pour toute activité qui irait au-delà de l'expérimentation du ballon SPICE, au regard de la justification, de l'efficacité, de l'éthique et de la gouvernance. Il apparaît en effet que le public est profondément inquiet de l'absence d'un cadre international de réglementation et de gouvernance et demande que sa mise en place précède d'éventuelles expérimentations.

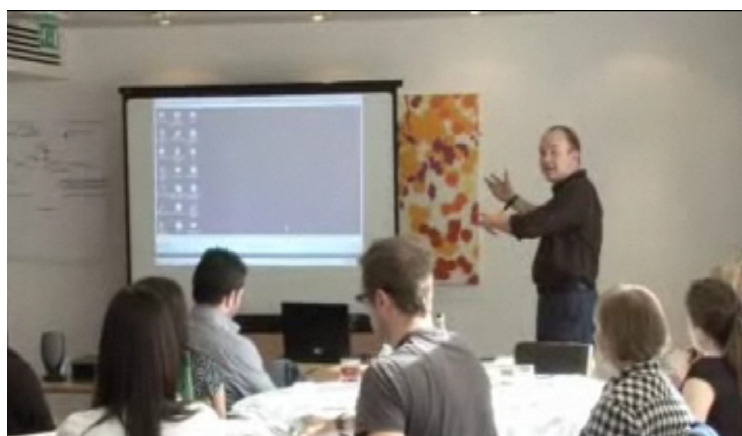


Figure 11. Séminaire organisé dans le cadre de « Experiment Earth »

Source: NERC

Enfin, les participants appellent à une transparence totale de la part des scientifiques et des conseils de recherche. Ces derniers doivent expliquer clairement leur stratégie de financement et de soutien à la recherche en géo-ingénierie, et très spécifiquement comment le financement de la composante expérimentale de SPICE s'articule dans leur stratégie globale en matière de sciences du climat. Il existe également une attente très forte pour l'équipe du projet SPICE de communiquer, notamment auprès des communautés locales où aura lieu l'expérimentation (Sculthorpe dans le Norfolk, nord de l'Angleterre).

D'une manière plus générale, les participants sont plus enclins à soutenir l'approche de la suppression du CO₂ atmosphérique que celle de la gestion du rayonnement solaire, ce qui est cohérent avec les résultats de *Experiment Earth*. Les techniques perçues comme plus « naturelles », telles que le biochar, reçoivent un soutien plus large, renforcé par le fait que ces techniques apparaissent en accord avec la vision d'une harmonie entre la nature et la société. Par opposition, les aérosols stratosphériques sont décrits par certains comme creusant encore la dissociation entre l'humanité et les phénomènes naturels, en promouvant une société toujours plus « techno-centrique ». À la différence des résultats d'*Experiment Earth*, l'équipe a trouvé que les participants sont moins perplexes vis-à-vis des techniques de gestion du rayonnement solaire, que « frustrés, déçus et inquiets » que ces technologies n'apportent qu'une solution rapide et (« trop ») facile.

5.1.3 Poser les bonnes questions

Ces deux études sociologiques ont permis de jeter les bases d'un dialogue avec le public. Elles ont également démontré l'importance de la formulation des questions et des informations fournies lors de ces échanges. Ainsi, *Experiment Earth* présentait la géo-ingénierie comme le « plan B », un plan de recours face à une situation d'urgence. Ceci pouvait induire un taux d'adhésion plus élevé qu'il ne l'aurait été si la géo-ingénierie était présentée comme une solution parmi d'autres, au même titre que l'adaptation. À partir de l'analyse de ces biais possibles, la seconde étude, menée par l'Université de Cardiff, s'est attachée à ne pas introduire de tournures telles que « mimer les processus naturels », préférant les voir émerger lors du dialogue. Les scientifiques ont pris une position plus neutre, ne donnant pas d'estimation du coût des différentes techniques et préférant souligner que les inconnues sont encore trop grandes pour pouvoir avancer des chiffres avec confiance. Plusieurs programmes de recherche, à l'Université de Cardiff et celle d'East Anglia (dans le cadre du projet IAGP), s'intéressent à cette problématique de la formulation du débat avec le public. Une étude plus systématique sera conduite dans les prochains mois par l'équipe du professeur Pidgeon et étudiera sur plusieurs mois la perception de la géo-ingénierie par le public.

5.2 La Géo-ingénierie dans les médias

Les médias britanniques ont encore relativement peu couvert la géo-ingénierie du climat, comme solution alternative ou de recours au cas où les efforts de réduction des émissions des GES apparaîtraient insuffisants. En conséquence, il n'existe à ce jour aucune étude scientifique de l'approche qu'ont les médias sur ce sujet.

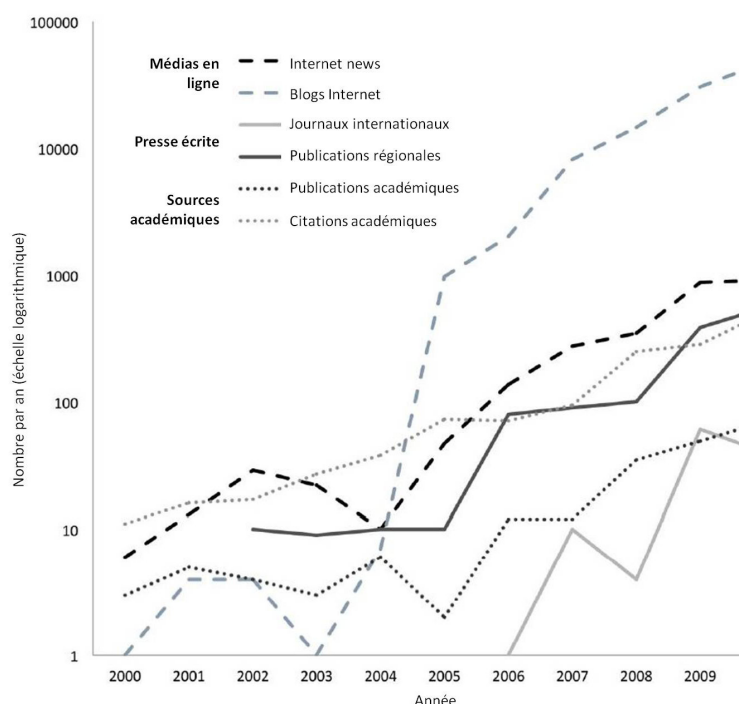


Figure 13. Évolution de la couverture médiatique au niveau mondial des techniques de gestion du rayonnement solaire.

Source: Mercer & al., 2011

Néanmoins, il ne serait pas exact de dire que les médias sont totalement absents du débat. Tant sur Internet que dans les journaux, on observe au niveau mondial depuis une dizaine d'années, un intérêt grandissant sur la question (voir Figure 13). Au Royaume-Uni, le rapport de la *Royal Society* a probablement été à l'origine de la première vague d'articles dans les principaux médias, presse écrite notamment³¹. Leur tonalité était plutôt à la neutralité, reconnaissant la légitimité de l'appel à accroître la recherche fondamentale. Mais ils pointaient souvent les risques, le danger à placer une trop grande confiance dans des solutions technologiques pour résoudre « simplement » le problème du changement climatique, ou encore rappelaient que seule compte la réduction des émissions de GES. Certains journaux, comme le *Financial Times* titrant « *Hopes dashed for geo-engineering solutions* », étaient prudents, d'autres plutôt optimistes, comme le *Daily Mail* annonçant « *Cloud ships and artificial trees could offer last hope to save climate, say British experts* », ou encore le *Telegraph*, « *Geo-engineering should be developed as insurance against dangerous climate change* ».

La géo-ingénierie est revenue sur le devant de la scène médiatique (tout est relatif) en septembre 2011, à l'occasion de l'annonce du projet SPICE. C'est la composante expérimentale du projet, l'essai d'un ballon dispersant de l'eau en altitude, qui a fait l'objet de débats dans la presse. Les articles ont, encore une fois, pris des positions diverses. Par exemple, le *Telegraph* a qualifié cette expérience de « *bizarre "artificial volcano"* », d'autres, comme le *Daily Mail*, décrivant le projet comme la première étape avant de lancer des ballons géants (« *A helium balloon the size of Wembley Stadium and a 14 mile garden hose: How scientists plan to cool down the planet* »). Plusieurs journaux, comme le *Guardian*, ont fait écho de la controverse alors apparue, et qui a conduit à suspendre cette composante du projet (« *Scientists criticise hand-*

ling of pilot project to 'geoengineer' climate »). Enfin, la BBC en a profité pour appeler à un débat public sur la question.

Une rapide étude réalisée par Tom Sheldon, du *Science Media Centre* permet de dresser un premier panorama du positionnement des principaux médias britanniques (voir Figure 14). La majorité des articles écrits sont plutôt équilibrés, présentant les faits de façon assez neutre, soulignant souvent l'importance de la recherche mais également les risques. Cependant, il existe nettement plus d'articles présentant la géo-ingénierie de manière positive que négative, avec en particulier *The Telegraph* (plutôt conservateur) pour qui cette approche doit être développée comme une assurance des plus utiles.

	Plutôt positif	Neutre / équilibré	Plutôt négatif
New Scientist	2	3	3
Reuters	-	3	3
Nature	2	4	2
Times	1	3	-
Daily Mail	2	1	-
Independent	4	2	4
BBC	1	8	1
Telegraph	7	4	-
Daily Mirror	-	1	-
Economist	1	-	-
Guardian	1	3	1
Total	21	32	14

Figure 14. Couverture médiatique de la géo-ingénierie au Royaume-Uni (2007-2011)

Source : Tom Sheldon, *Science Media Centre*

5.3 Information du public : le *Science Museum*

Le *Science Museum*, situé à Londres, a récemment ouvert une galerie interactive consacrée au changement climatique. La géo-ingénierie y est présentée comme une « *backup solution* » (solution de repli), de façon relativement neutre. Plusieurs techniques des deux approches, gestion du rayonnement solaire et suppression du CO₂ atmosphérique, sont présentées avec leur mode d'action, leurs effets, ainsi que les risques associés. Sur Internet, le site du musée propose des informations sur trois techniques de gestion du rayonnement solaire (blanchissement des nuages, injection d'aérosols, miroirs spatiaux), en soulignant les nombreuses inconnues qui demeurent avec notamment une série d'articles intitulée « *Backup plan: The small print* »³². Enfin, le musée met à disposition des enseignants des fiches d'information, dont l'une présente brièvement la technique de blanchissement des nuages³³.

6. Les Questions éthiques et de sécurité et de droit international

6.1 Une approche risquée qui soulève de nombreuses questions éthiques

Risquées, aux conséquences et effets mal compris voire tout simplement inconnus et/ou controversées, les techniques de géo-ingénierie du climat soulèvent d'importantes questions éthiques. Au premier rang desquelles, manipuler

intentionnellement le climat sur une très grande échelle est-il éthiquement acceptable? Certains estiment qu'il s'agit simplement d'une analyse coût-bénéfice par rapport aux effets catastrophiques d'une hausse des températures mondiales de trois ou quatre degrés, telle qu'elle risque d'arriver si rien n'est fait pour changer profondément la façon dont nous utilisons l'énergie. De plus, l'homme a déjà modifié intentionnellement l'environnement régionalement, ou non intentionnellement au niveau global en causant le changement climatique que nous connaissons actuellement. Pourtant, si une technique de géo-ingénierie du climat est déployée, ce serait la première fois que cette modification serait intentionnelle et à l'échelle mondiale. C'est cette unicité qui démarque ces technologies et place ce questionnement éthique au cœur des réflexions actuelles de la communauté scientifique britannique.

Sur le plan éthique, une distinction entre les deux groupes de techniques, gestion du rayonnement solaire et celles de suppression du CO₂ atmosphérique, est souvent réalisée. En effet, cette dernière classe de solutions s'attaque aux causes du réchauffement du climat, alors que celles qui visent à réduire la quantité d'énergie solaire n'apportent que des solutions faciles, cachant le problème. Selon certains, elles nous dispenseraient de réaliser les vrais efforts, c'est-à-dire ceux qui réduisent drastiquement les émissions de GES. Dans cette perspective, un second argument qui revient régulièrement dans ce débat est celui de l'aléa moral. Le « *moral hazard* », décrit par Adam Smith, désigne la tendance à prendre des risques plus grands lorsque l'on dispose d'une assurance, c'est-à-dire que l'on est isolé du risque. La géo-ingénierie du climat serait une sorte d'assurance contre le risque de changement catastrophique du climat. Puisque ces technologies sont disponibles, quel besoin de réduire les émissions de GES ?

D'autres arguments sont avancés. En particulier, comment garantir le consentement informé des citoyens de tous les pays du monde ? Est-ce même réalisable, et sinon, qui disposerait de la légitimité pour prendre une telle décision ? Car le déploiement de solutions de géo-ingénierie affecterait (par définition) l'ensemble du globe, en particulier les pays les plus pauvres (qui sont souvent les plus vulnérables aux changements climatiques et qui ne disposent que d'une faible voix sur la scène internationale).

Autre questionnement : avons-nous le droit de prendre la décision de déployer une ou plusieurs techniques de géo-ingénierie, impliquant nos descendants sur peut-être plusieurs siècles ? Par exemple, une fois engagé sur la voie de la dispersion d'aérosols stratosphériques, il n'est plus possible de stopper, au risque de voir les températures grimper très vite pour retrouver leur niveau « naturel ». C'est donc un héritage très lourd qui serait laissé aux prochaines générations.

Enfin, pour certaines de ces techniques, il n'y aura pas de seconde chance. Le principe de précaution ne devrait-il pas alors s'appliquer ? Plusieurs scientifiques rencontrés admettent qu'au vu des nombreuses inconnues associées à ces techniques, il serait peut-être préférable de ne jamais les mettre en place. Car toutes les simulations qui pourraient être faites ne peuvent jamais totalement exclure le risque de conséquences inattendues et catastrophiques. Les scientifiques

ne comprennent déjà que très imparfaitement le climat actuel, que dire alors d'un climat artificiellement manipulé ?

6.2 Un risque pour la sécurité internationale ?

L'hypothèse du déploiement de techniques de géo-ingénierie soulève également de nombreuses questions géopolitiques et de sécurité internationale. Ces risques stratégiques sont particulièrement aigus pour les techniques de gestion du rayonnement solaire.

Les technologies de géo-ingénierie pourraient être détournées et intentionnellement employées à des fins terroristes ou militaires. La plupart de ces techniques peuvent avoir des effets secondaires importants sur l'environnement : modification régionale du régime des précipitations (mousson notamment), sécheresses, inondations... Il est envisageable que des variantes de ces technologies, accroissant leurs effets régionaux ou locaux, soient développées à partir de recherches originellement destinées exclusivement à contrer le réchauffement climatique. Par exemple, un État, ou une organisation criminelle, pourrait chercher à développer une arme qui puisse induire une sécheresse sur le territoire d'un pays ennemi. En fait, même des technologies développées afin d'obtenir des effets globaux, pourraient être intentionnellement employées abusivement. Par exemple, un pays qui bénéficierait de la hausse des températures mondiales (en ouvrant à l'utilisation de nouveaux territoires), pourrait chercher à produire (ou accélérer) une telle hausse par l'utilisation de la géo-ingénierie, alors même que cela nuirait à d'autres pays. Cet usage double des technologies, soulève évidemment d'importantes questions de gouvernance mondiale et de prise de décision.

Il est également envisageable qu'un État, un groupe d'États, voire même une multinationale ou un individu suffisamment riche décide de développer unilatéralement une solution de géo-ingénierie. Fortement vulnérable aux conséquences de la hausse mondiale des températures (par exemple du fait de la désertification), un pays peut ainsi espérer contrer ces effets grâce à des techniques de géo-ingénierie. Il pourrait également s'agir de soumettre la communauté internationale à un chantage. Ceci est d'autant plus envisageable que le coût de la dispersion d'aérosols stratosphériques ne semble pas être prohibitif, certains chiffres avancés étant de l'ordre de grandeur de la dizaine de milliards de dollars (en utilisant par exemple des avions modifiés ou une flotte de ballons). Toutefois, beaucoup de spécialistes ne pensent pas qu'un tel scénario soit probable. Un État qui oserait se lancer sur cette voie serait certainement ostracisé par le reste de la communauté internationale, et son geste pourrait être vu comme un *casus belli* (en gardant en mémoire que l'imbrication et l'interdépendance croissante des économies rend toute mesure de rétorsion ou militaire plus difficile à prendre, en particulier si l'État agresseur est une grande puissance économique). Il reste envisageable qu'un État dont l'existence même serait menacée par la hausse du niveau de la mer (les États insulaires en particulier), ne décide d'opter pour une technique de géo-ingénierie, sans avoir réellement l'intention (ou les moyens) d'influer sur le climat mondial, mais pour attirer l'attention de façon spectaculaire sur son cas. Sans en arriver là, les Maldives, archipel menacé par la hausse du

niveau marin, ont déjà utilisé le procédé de la théâtralité, en organisant un conseil des ministres sous-marin, à la veille du sommet de Copenhague en 2009 (voir Figure 15).

Et si la communauté internationale parvient à établir un accord multilatéral autorisant l'emploi de la géo-ingénierie, le risque de conflits n'en disparaîtrait pas pour autant. Car ces techniques prendraient du temps à produire leurs effets (au moins quelques années, plus vraisemblablement des décennies). Que se passerait-il, par exemple, si un phénomène



Figure 15. Conseil des ministres sous-marin aux Maldives
Source : <http://bit.ly/zC2f6o>

climatique violent affecte gravement un État qui accuserait alors les mesures de géo-ingénierie d'en être à l'origine ? Il est très probable qu'il ne serait pas en mesure de le prouver, car relier un événement météorologique ponctuel au changement du climat est particulièrement difficile, sinon impossible. Contraint par sa population, un tel pays pourrait toutefois réclamer des dommages, ou encore vouloir stopper par la force le déploiement de la technique de géo-ingénierie... Enfin, la durée pendant laquelle la géo-ingénierie devra être maintenue, qui se comptera sans doute en siècles, rend l'humanité incroyablement vulnérable. Cette dépendance en ferait une cible idéale pour un groupe terroriste ou un État n'ayant rien à perdre : l'interruption brusque de la dispersion d'aérosols signifierait une hausse brutale des températures, en quelques années seulement. Gardons également en mémoire que rien ne peut garantir la stabilité politique des États sur de si longues périodes même si, peut-être, liés par cette dépendance, les pays seraient finalement condamnés à bien s'entendre, créant ainsi une nouvelle garantie contrainte de stabilité internationale.

6.3 Le droit international actuel est fragmenté

Face à ces enjeux géopolitiques, les appels à établir une gouvernance mondiale de la géo-ingénierie du climat se multiplient, au moins dans un premier temps pour encadrer de potentielles expérimentations. Dans l'état actuel, force est de constater que la gouvernance est largement fragmentée, avec quelques textes et accords internationaux qui peuvent s'appliquer indirectement, mais sans être adaptés ou spécifiques à la géo-ingénierie³⁴. Dans une certaine mesure, ces textes concernent la recherche scientifique, notamment par

le biais de l'encadrement des expériences dans le milieu naturel. Il n'existe pas de traité unique qui couvrirait tous les aspects de la géo-ingénierie. La gouvernance actuelle ne repose que sur la flexibilité des textes existants et d'éventuels amendements.

Les accords internationaux sur le changement climatique (UNFCCC-CCNUCC, Kyoto, Copenhague, Durban) auront certainement un poids important sur l'ensemble du spectre des technologies de géo-ingénierie, dans la mesure où ils encouragent les parties signataires à des politiques nationales et des actions d'atténuation pour réduire leurs émissions de GES. Cependant, ces textes ne font pas référence explicitement à la géo-ingénierie. La « *Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques* » (1978, ENMOD), qui bannit la modification de l'environnement à des fins hostiles, est peut-être le seul texte actuel qui puisse s'appliquer aux deux classes de techniques, mais il est en sommeil et n'a été signé que par 74 États. Notons que la jurisprudence internationale reste toujours l'ultime recours possible.

Plusieurs accords déjà existants peuvent encadrer les technologies qui visent à retirer du CO₂ de l'atmosphère, ou du moins établir une première base à partir de laquelle ces textes pourraient être développés et inclure spécifiquement cette classe de technologies. Les arbres artificiels utilisent des procédés relativement proches du CSC, tandis que le biochar ou BECS peuvent être réglementés de manière similaire aux biocarburants. La réglementation de la fertilisation des océans pourrait être encadrée par la Convention des Nations-Unies sur le droit de la mer (1994), dont plusieurs articles concernent la pollution (définie comme l'introduction par l'homme de substances qui conduit à une détérioration du milieu marin), ainsi que la recherche marine. La Convention de Londres (1996) qui interdit le déversement en mer de déchets et substances dangereuses, pourrait également s'appliquer, même s'il existe un débat sur la portée de ce traité. Elle a d'ailleurs récemment fait l'objet d'amendements (résolution LC-LP.1 en 2008) qui précisent que les activités de recherche sur la fertilisation ne constituent pas un acte de pollution tel que défini par la Convention.

Les techniques de gestion du rayonnement solaire sont nettement moins bien (voire pas du tout) encadrées par les textes existants. Cela tient partiellement au fait qu'il n'existe pas d'instrument global, tel que le Droit de la mer de 1994, qui gouvernerait l'atmosphère (la frontière entre l'espace aérien, qui est sous souveraineté des États, et l'espace extérieur n'est pas clairement définie³⁵). Si la modification de l'albédo des surfaces pourrait très bien être réglementée au niveau national, le blanchissement des nuages (qui se fait dans les eaux internationales) tomberait sous la juridiction d'aucun texte ou organisation clairement définie (si ce n'est peut-être ENMOD). La dispersion d'aérosols dans l'atmosphère serait possiblement régulée par la « *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* » (1983, CLRTAP), qui définit la pollution comme l'« *introduction par l'homme de substances ayant un effet délétère sur la santé ou l'environnement* », ainsi que par la Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone (1987). Enfin, les miroirs spatiaux entreraient (dans une certaine mesure), dans le cadre du « *Traité sur les princi-*

pes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes » (1967). Il faut noter que tous les pays du monde ne sont pas signataires de ces divers traités, sans parler des individus ou des multinationales.

La Convention sur la biodiversité (1993) autorise les États à exploiter leurs ressources naturelles, sous réserve que cela ne conduise pas à détériorer l'environnement dans d'autres États. En octobre 2010, la 10^{ème} conférence des parties signataires, réunie à Nagoya, a établi un moratoire sur la géo-ingénierie, incluant « *toutes technologies qui réduiraient délibérément le rayonnement solaire atteignant le sol, ou accroîtraient la séquestration du carbone atmosphérique à grande échelle, et affecteraient la biodiversité* ». Cette résolution a pu apparaître comme un bannissement de facto de la géo-ingénierie. Mais cette même résolution précise « *jusqu'à ce qu'il existe une base scientifique valable qui justifierait de telles activités, et une réflexion appropriée sur les risques et impacts associés pour l'environnement et la biodiversité (...)* ». De plus, l'accord exempté les « *études de recherche scientifique de petite échelle* ». Sa signification pratique n'est donc pas très claire, puisque par exemple, elle ne s'applique pas à la reforestation, alors qu'il peut être argumenté qu'une monoculture dégrade la biodiversité. Et puis la géo-ingénierie ne contribuerait-elle pas à sauver la biodiversité en stabilisant le climat ?

Au niveau des Nations-Unies, un groupe d'experts du GIEC s'est réuni à Lima en juin 2011 pour discuter de la géo-ingénierie du climat et des recherches actuelles. Alors que la géo-ingénierie était quasi absente du quatrième rapport (publié en 2007), elle sera incluse dans le prochain rapport (attendu pour 2014).

Conclusion

Le Royaume-Uni figure probablement parmi les pays les plus en avance dans ce domaine controversé de la géo-ingénierie du climat. Avec plusieurs programmes de recherche exploratoire, financés à hauteur de plusieurs millions de livres, quelques dizaines d'élèves doctorants, des universités de premier plan et des sociétés savantes renommées qui s'y intéressent (le rapport de 2009 de la *Royal Society* fait référence), il existe un réel potentiel scientifique dans ce domaine émergent. On note également la mise en place de réseaux d'universités et la volonté d'établir des projets de recherche très transdisciplinaires. Il faut bien entendu relativiser, les moyens consacrés à la géo-ingénierie ne sont pas comparables avec ceux dédiés à la recherche climatique plus classique ainsi qu'aux efforts pour réduire les émissions de GES.

Conscient de l'aspect très controversé des solutions que pourrait apporter la géo-ingénierie du climat, la communauté scientifique n'a pas hésité à adopter une démarche de transparence, associant le public et créant une amorce de débat. Si le parlement s'est penché sur la question, afin notamment d'appeler à une plus grande réglementation, le gouvernement a pris une posture de neutralité, probablement afin de ne pas sembler douter de ses propres efforts de réduction des émissions de GES. Le public semble être très prudent, reconnaissant toutefois le besoin de recherche. Il faut établir une distinction très claire entre les deux techniques de géo-ingénierie, la

suppression du CO₂ atmosphérique recueillant un plus grand soutien car certainement moins risqué et plus éthique que les technologies de gestion du rayonnement solaire. Encore une fois, il est nécessaire de relativiser, la grande majorité des britanniques ont une connaissance limitée ou nulle des options de géo-ingénierie du climat.

La communauté scientifique paraît divisée sur la pertinence de l'utilisation de ces technologies, au vu des risques importants et surtout des très nombreuses inconnues qui demeurent. Elle s'accorde quasi unanimement sur le besoin d'augmenter les efforts de recherche fondamentale, mais également sur celui d'établir une gouvernance internationale de cette recherche. Les technologies de gestion des rayonnements solaires (principalement les aérosols) sont peut-être les plus matures et les plus faciles à mettre en œuvre, avec des effets assez rapides. Mais elles sont également les plus risquées et surtout complexes au niveau de la gouvernance internationale, ce qui rend finalement peu probable leur utilisation à court terme (sauf peut-être à des fins hostiles ou pour attirer l'attention). Inversement, les techniques de suppression du CO₂ sont plus simples à mettre en place sur le plan de la réglementation, car leur déploiement peut se faire au niveau national (à l'exception de la fertilisation des océans), et graduellement. En revanche, elles ne sont souvent technologiquement pas prêtes et seraient (très) coûteuses, ce qui rend leur utilisation dans les prochaines décennies également peu probable.

Avec l'accélération du réchauffement climatique et l'incapacité à établir un accord mondial réduisant rapidement les émissions de GES, les appels à soutenir un effort de recherche minimal dans ce qui pourrait devenir notre « plan B » se font peu à peu plus nombreux.

Dossier rédigé par **Olivier Gloaguen**

Notes :

1. GIEC, www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml#21
2. <http://co2now.org/>
3. www.ambafrance-uk.org/Une-dimension-internationale-des
4. <http://climateactiontracker.org/>
5. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>
6. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>
7. Concept des points de non-retour pour le climat terrestre : T. M. Lenton et al, "Tipping elements in the Earth's climate system" Proceedings of the National Academy of Sciences, 105 (6), février 2008
8. Voir article Mark New et al., 2011
9. J. Shepherd et al., *Geoengineering the climate - Science, governance and uncertainty*, septembre 2009, Royal Society, <http://royalsociety.org/policy/publications/2009/geoengineering-climate/>
10. Mark P. Aulisio, 1995. In Defense of the Intention/Foresight Distinction. *American Philosophical Quarterly* 32 (4):341 - 354.
11. Voir D. Woolf & al, 2010. Ses travaux montrent que le biochar ne pourrait contribuer au mieux qu'à hauteur de 12 % des émissions actuelles de carbone.
12. Geo-engineering : giving us the time to act?, Institution of mechanical engineers, août 2009
13. www.global-warming-geo-engineering.org/1/contents.html

14. www.iagp.ac.uk/publications/
15. www.avoid.uk.net/
16. Voir Joy S. Singarayer, Andy Ridgwell & Peter Irvine, 2009
17. Voir notamment Lampitt et al. 2010
18. www.exeter.ac.uk/g360/publications/
19. www.metoffice.gov.uk/research/collaboration/jwcrp/ukca
20. M. Schmidt & al, 2011, Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature* 478, 49-56
21. www.awi.de/en/news/selected_news/2009/lohafex/
22. www.gear.uea.ac.uk/about-gear
23. <http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/publications.html>
24. www.exeter.ac.uk/g360/geomip2012/programme/
25. www.publications.parliament.uk/pa/cm200809/cmselect/cmdius/50/5007.htm
26. www.publications.parliament.uk/pa/cm200809/cmselect/cmdius/50/8111706.htm
27. id. 3
28. www.independent.co.uk/environment/climate-change/manmade-eruptions-ndash-plan-b-in-the-battle-for-the-planet-1780268.html
29. « Géo-ingénierie : un cadre réglementaire s'avère indispensable », Joël Constant, *Science et technologie au Royaume-Uni*, novembre-décembre 2009, www.ambafrance-uk.org/Geo-ingenierie-un-cadre
30. www.srmgi.org/report/
31. Pour la couverture médiatique du rapport, voir les liens sur : <http://royalsociety.org/policy/publications/2009/geoengineering-climate/>
32. www.sciencemuseum.org.uk/ClimateChanging/ClimateScienceInfoZone/Exploringourfuturechoices/3point7/3point7point2.aspx
33. Science Museum, <http://bit.ly/zvwtNA>
34. Pour une analyse plus poussée des textes actuels, voir Redgwell C., 2011
35. Robert Jennings & Arthur Watts (éditeurs), *Oppenheim's International Law*, Volume 1, 9^{ème} édition, 2008, 978-0-58-230245-7

Sources :

- Agence internationale pour l'énergie, *World Energy Outlook 2011*, 9/11/2011
- Boucher O., *Geoengineering*, Met Office, www.metoffice.gov.uk/research/media/pdf/o/0/geoengineering.pdf
- Bracmort Kelsi, Lattanzio Richard, Barbour Emily, *Geoengineering: governance and technology policy*, Congressional Research Service, 10/01/2011
- Cambridge University, Engineering Department, *Geoengineering by Solar Radiation Management*, 04/2010, www2.eng.cam.ac.uk/~hemh/climate/Geoengineering_RoySoc.htm
- COP17/CMP7, Durban Summit, www.cop17-cmp7durban.com/
- Corner Adam & Pidgeon Nick, 2010, *Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications*, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, Volume 52, Issue 1
- Corner A., Parkhill K. and Pidgeon N., 'Experiment Earth?' *Reflections on a public dialogue on geoengineering*, Working paper, Understanding Risk Working Paper 11-02. Cardiff: School of Psychology, Cardiff University, 2011, www.iagp.ac.uk/sites/default/files/IAGPWP_Cardiff_Reflections%20on%20ExpEarth_0.pdf
- Craig H., *Virgin Earth Challenge announces leading organisations*, 2/11/2011, www.virgin.com/people-and-planet/blog/virgin-earth-challenge-announces-leading-organisations
- DECC, *Government Response to the House of Commons Science and Technology Committee 5th Report of Session 2009-10 : The Regulation of Geoengineering*, 09/2010
- Département fédéral de l'environnement, des transports, de

l'énergie et de la communication DETEC de la Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement OFEV, Division Climat, Fiche géo-ingénierie, 14/07/2011

- Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), <http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/index.html>

- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse

- GIEC, Media Breifing, 22/06/2011, Lima (Pérou), www.ipcc-wg2.gov/meetings/geoeng/Media_Advisory_Peru_June2011.pdf

- Government Office for Science, Foresight, International Dimensions of Climate Change - Final Project Report, 2011.

- Harvey F., Worst ever carbon emissions leave climate on the brink, *The Guardian*, 29/05/2011, www.guardian.co.uk/environment/2011/may/29/carbon-emissions-nuclearpower

- Harvey F., World headed for irreversible climate change in five years, IEA warns, *The Guardian*, 9/11/2012, www.guardian.co.uk/environment/2011/nov/09/fossil-fuel-infrastructure-climate-change

- House of Commons - Innovation, Universities, Science and Skills Committee, Engineering: turning ideas into reality, Fourth Report of Session 2008–09, Volume I, 18/03/2009

- House of Commons - Science and Technology Committee, The Regulation of Geoengineering, Fifth Report of Session 2009–10, 10/03/2010

- Institution of mechanical engineers, Geo-engineering: giving us the time to act?, 08/2009, www.imeche.org/knowledge/themes/environment/climate-change/geo-engineering

- Institution of mechanical engineers, 2002, Geo-engineering policy statement 09/02, www.imeche.org/knowledge/policy/environment/policy/geo-engineering_policystatement0902

- Ipsos MORI, Natural Environment Research Council & Sciencewise-ERC, Experiment Earth? Report on a Public Dialogue on Geoengineering, 09/09/2010, www.ipsos-mori.com/researchpublications/publications/1376/Experiment-Earth.aspx

- Keith D. W., *Geoengineering the Climate: History and Prospect*, *Annu. Rev. Energy Environ.* 25:245–84, 2000

- Lampitt R. S. et al, Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? *Phil. Trans. R. Soc. A* doi:10.1098/rsta.2008.0139

- McGlashan N., Shah N. & Workman M., *The Potential for the Deployment of Negative Emissions Technologies in the UK, AVOID programme*, 30/07/2010, www.metoffice.gov.uk/avoid/files/resources-researchers/AVOID_WS2_D1_18_20100730.pdf

- Mercer A. M., Keith D. W. and Sharp J. D., Public understanding of solar radiation management, *Environmental Research Letters* Volume 6 Number 4, 24/10/2011

- Mims C., "Albedo Yachts" and Marine Clouds: A Cure for Climate Change?, *The Scientific American*, 21/10/2009

- New M., Liverman D., Schroder H. and Anderson K., Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 6-19, 2011

- Organisation météorologique mondiale, Communiqué de presse N° 934, 21/11/2011

- Oxford Martin School, Université d'Oxford, 'Oxford Principles' provide a code of conduct for geoengineering research, 14/09/2011, www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/press/201109-OxfordPrinciples-PressRelease.pdf

- Parkhill K. & Pidgeon N., Public Engagement on Geoengineering Research: Preliminary Report on the SPICE Deliberative Workshops, Understanding Risk Working Paper 11-01, 08/2011, <http://psych.cf.ac.uk/understandingrisk/docs/spice.pdf>

- Pearce F., What the UN ban on geoengineering really means, *New*

Scientist, 01/10/2011, www.newscientist.com/article/dn19660-what-the-un-ban-on-geoengineering-really-means.html

- POST, Geo-engineering research, numéro 327, 03/2009, www.parliament.uk/documents/post/postpn327.pdf

- Powell R. et al, *The Ethics of Geoengineering [Working Draft]*, James Martin Geoengineering Ethics Working Group, 06/2010

- Redgwell C., *Geoengineering the Climate: Technological Solutions to Mitigation – Failure or Continuing Carbon Addiction?* *Carbon and Climate Law Review*, pp. 178-189, 2011

- Royal Society, EDF, TWAS, *Solar Radiation management : the governance of research*, SRMGI, 01/12/2011, www.srmgi.org/report/

- Shepherd J. et al., *Geoengineering the climate - Science, governance and uncertainty*, 09/2009, Royal Society

- Shepherd J., *Geoengineering the Climate: A short briefing*, National Oceanography Centre, University of Southampton, UK, <http://jgshepherd.com/wp-content/uploads/2011/01/Geoengineering%20briefing.pdf>

- Singarayer J. S., Ridgwell A. & Irvine P., Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering, *Environ. Res. Lett.* 4, 045110, 10-12/2009

- Solar Radiation Management Research Governance Initiative (SRMGI), www.srmgi.org/about-srmgi/

- Thompson M. J., édité par Brian Launder, *Geo-Engineering Climate Change: Environmental Necessity or Pandora's Box?*, Cambridge University Press, 12/2009

- UKBRC, Biochar, www.biochar.org.uk/ukbrc_introduction.php

- Vaughan N. E. & Lenton T. M., A review of climate geoengineering proposals, *Climatic Change*, 109:745–790, 2011

- Woolf D. et al., Sustainable biochar to mitigate global climate change, *Nature Communications* 1, Article number: 56, 10/08/2010, www.nature.com/ncomms/journal/v1/n5/full/ncomms1053.html

Entretien :

- Rob Bellamy, Université d'East Anglia

- Peter Healey, Oxford Martin School

- Peter Irvine, Université de Bristol

- Sarah Jones, Université de Bristol

- Tim Kruger, Oxford Martin School

- Richard Lampitt, National Oceanography Centre

- Peter Liss, Université d'East Anglia

- Dan Lunt, Université de Bristol

- Andy Parker, Royal Society

- Nick Pidgeon, Université de Cardiff

- Steve Rayner, Oxford Martin School

- Catherine Redgwell, University College London

- Andy Ridgwell, Université de Bristol

- John Shepherd, National Oceanography Centre

- Damon Teagle, National Oceanography Centre

- Naomi Vaughan, Université d'East Anglia

www.ambascience.co.uk

Les articles de Science et Technologie au Royaume-Uni publiés par le service Science et Technologie de l'Ambassade de France au Royaume-Uni sont diffusés selon les termes de la licence Creative Common Paternité-Pas d'utilisation commerciale-Partage des Conditions Initiales à l'Identique 2.0 France. Les autorisations au-delà du champ de cette licence peuvent être obtenues via une demande par courriel à info@ambascience.co.uk

