



**Atelier de Réflexion Prospective REAGIR**  
Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes  
de la géo-ingénierie de l'environnement

**Rapport final - Mai 2014**

**Auteurs :** O. Boucher, B. de Guillebon, L. Abbadie, P. Barré, S. Bekki, B. Bensaude-Vincent, S. Blain, D. Bonnelle, P. Ciais, F. Clin, A. Dahan, M.-L. Dangeard, R. de Richter, M. Dörries, L. Dumergues, B. Fisset, T. Gasser, F. Gemenne, S. Godin-Beekmann, B. Guillaume, M. Ha-Duong, J.-M. Laperrelle, P. Maugis, D. Montout, P. Perret, B. Quéguiner, D. Salas y Melia, F. Trolard, M. van Hemert, E. Vésine, et E. Vidalenc

## Table des matières

1. Introduction.....	4
2. La géo-ingénierie .....	4
2.1 Eléments historiques.....	4
2.2 Perception publique du mot "géo-ingénierie" .....	5
2.3 Un concept lourd d'enjeux.....	7
2.4 Définition et attributs.....	8
2.5 Nouvelle catégorisation des approches vis-à-vis du changement climatique .....	11
3. Examen critique des différentes techniques.....	14
3.1 Gestion du rayonnement solaire par les aérosols atmosphériques .....	17
3.2 Capture directe du dioxyde de carbone.....	18
3.3 Capture du dioxyde de carbone par biologie terrestre.....	19
3.3.1 Stockage du carbone dans la biomasse continentale .....	19
3.3.2 Bioénergie couplée à la capture du CO <sub>2</sub> émis .....	21
3.3.3 Augmentation du carbone contenu dans le sol.....	21
3.3.3.1 <i>Augmentation du carbone organique des sols en modifiant les pratiques culturales</i> ....	22
3.3.3.2 <i>Augmentation du carbone organique des sols par apport de biochars</i> .....	23
3.3.3.3 <i>Augmentation du carbone contenu dans les horizons profonds des sols</i> .....	23
3.3.3.4 <i>Augmentation de la masse des bactéries de la biosphère profonde</i> .....	24
3.4 Capture du dioxyde de carbone par la biologie océanique .....	24
3.5 Permanence / Non-permanence des puits dans les méthodes types CDR.....	26
3.6 Méthane et chimie atmosphérique .....	27
3.7 Co-bénéfices, climat en deuxième intention, et courts-circuits énergétiques.....	28
3.8 Géo-ingénierie territoriale .....	29
4. Aspects sociétaux .....	32
4.1 Les risques .....	32
4.1.1 Classification des risques .....	32
4.1.2 Les risques liés à la recherche en géo-ingénierie de l'environnement.....	34
4.1.3 Risques de la mise en œuvre de la géo-ingénierie.....	36
4.1.4 Conclusions .....	37
4.2 Nature et technique .....	38
4.2.1 Approche épistémologique .....	38
4.2.2 Problèmes éthiques .....	40
4.2.3 Anthropocène et géo-ingénierie.....	43
4.3 Gouvernance de la géo-ingénierie .....	45
4.3.1 Problèmes de la gouvernance.....	45

4.3.2 Le cas de l'océan .....	49
4.3.3 Le cas de l'afforestation .....	50
4.3.4 Le cas du biochar .....	50
4.4 Aspects financiers .....	50
5. Conclusions.....	53
6. Postface : la géo-ingénierie vis-à-vis des politiques climatiques actuelles .....	54
7. Références .....	56
8. Annexes .....	67
Annexe A: Deux concepts en rupture radicale pour épurer le CO <sub>2</sub> de l'environnement global. 67	
Annexe B: Communication / Information / Débat public .....	71
Annexe C: Les recherches en géo-ingénierie dans le monde.....	73
Annexe D: Calendrier de l'atelier REAGIR .....	88
Annexe E: Liste des participants à l'atelier REAGIR.....	89

## 1. Introduction

Les **Ateliers de réflexion prospective** (ARP) lancés par l'Agence nationale de la recherche (ANR) ont pour vocation d'encourager la réflexion collective prospective au sein de la communauté scientifique sur des thématiques transverses, à forts enjeux sociétaux et scientifiques, afin d'identifier de nouvelles pistes et questions de recherche.

Sur le sujet de la géo-ingénierie de l'environnement, il s'agit de mener une réflexion ouverte aux secteurs publics et privés, aux scientifiques et acteurs des sciences sociales sur les solutions directes ou indirectes, en étudiant les interactions d'échelles (temporelles et spatiales), avec une vision large sans parti pris sur les effets positifs ou négatifs. Le projet REAGIR a eu pour objectif de développer une réflexion globale et systémique sur l'ensemble des méthodes de géo-ingénierie de l'environnement envisageables aux échelles régionale et globale.

L'ARP a rassemblé et synthétisé dans ce document l'ensemble des travaux menés en groupe ainsi que des contributions collectives et individuelles. Un résumé, volontairement court et donc parfois réducteur, de l'ensemble des travaux est aussi disponible sur le site de l'ANR et celui de l'ARP REAGIR <http://www.arp-reagir.fr/>.

## 2. La géo-ingénierie

### 2.1 Eléments historiques

Tout comme l'historien de la météorologie des Etats-Unis James Fleming, on peut identifier deux « âges d'or » de la géo-ingénierie dans la littérature scientifique : i) la guerre froide, où la géo-ingénierie est envisagée comme une opportunité belligérante ou positiviste, encouragée par les financements accrus pour la recherche publique et l'apparition de 'Big Technologies' (dont la bombe atomique) ; ii) la période en cours débutant au milieu des années 2000, au moment où se multiplient les constats d'échecs de la gouvernance du changement climatique, inapte à maintenir les émissions de gaz à effet de serre à un niveau qui garantirait un réchauffement climatique global moyen inférieur à 2°C (objectif faisant l'objet d'un consensus large). L'analyse de ces deux époques est éclairante à plusieurs titres.

Depuis la fin des années 1940, beaucoup se sont intéressés aux changements climatiques, qu'ils soient associés à une prochaine glaciation, comme conséquence d'une guerre nucléaire ou au réchauffement actuel résultant des activités humaines. Alors que la bombe-A soulevait pour la première fois la possibilité de l'autodestruction de l'humanité, la bombe-H suscitait de nouvelles craintes au début des années 1950, non seulement en raison de sa puissance destructrice mais aussi de ses effets secondaires, comme une modification possible des conditions météorologiques et climatologiques. Utiliser les modifications de l'environnement comme une arme possible devint un enjeu important pour les deux supers puissances et certains think tanks. Il était possible d'imaginer des scénarios tels que détruire la couche d'ozone stratosphérique protectrice au-dessus des territoires ennemis. Cependant, il s'agissait souvent là de spéculations car la compréhension de phénomènes aussi complexes que le climat était encore plus limitée que maintenant. Ces spéculations trouvèrent toutefois leurs premières applications concrètes dans des tentatives de modifications du climat aux Etats-Unis dans les années 1950 et 1960 (sans grand succès) et durant la guerre du Vietnam, au début des années 1970.

Ainsi, pendant la Guerre froide, la pensée de la géo-ingénierie s'est développée en même temps que d'autres formes d'ingénierie de l'atmosphère, locales et régionales. La combinaison des échecs répétés des expériences de modification des pluies et des dompteurs de tornades, du caractère suspecté dangereux de leurs pratiques, ainsi qu'un certain tournant environnementaliste (avec une redéfinition des concepts de risque et d'incertitude, mutation culturelle, naissance d'institutions nationales et onusiennes de gestion/protection de l'environnement), ont suscité un rejet de l'ingénierie atmosphérique dans son ensemble, dans l'opinion et chez la plupart des scientifiques (Fleming, 2010 ; Kwa, 2001 ; Hamblin, 2013).

Au début des années 1970, l'ingénierie atmosphérique se trouva associée à l'impopulaire guerre du Vietnam. Ceci constitua une épine supplémentaire dans le pied des ingénieurs de l'atmosphère. Le droit à la transparence fut exigé au sujet des expériences belligérantes d'ensemencement des nuages au Vietnam. En 1977, un précédent juridique international à la réglementation sur les activités de modification du temps fut signé par la plupart des grandes puissances militaires, Etats-Unis et URSS compris, France exclue : la « Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques » ou « ENMOD » (Fleming, 2010 ; Brahic, 2009). Le Canada et les Etats-Unis avaient déjà signé, en 1975, un accord bilatéral « relatif à l'échange d'informations sur les activités civiles de modification du temps ». Dans un article daté de 1975, Alexandre-Charles Kiss, considéré aujourd'hui comme l'un des pionniers du droit international de l'environnement, faisait référence à des expériences précédentes en matière de droit national sur la modification du temps. Kiss proposait que des « solutions juridiques soient recherchées dès maintenant », à l'image du « précédent du droit de l'espace extra-atmosphérique, [... lieu pour lequel] des règles juridiques appropriées [étaient, selon lui,] déjà en place au moment où l'exploration de l'espace [était] entrée dans une phase où pouvaient précisément se poser des problèmes majeurs de droit international. » (Kiss, 1975).

Dans le contexte du « virage environnementaliste » et des protestations contre la guerre du Vietnam à la fin des années 1960 et 1970 mentionnées ci-dessus, l'idée de manipuler l'environnement à grande échelle vient moins de projets militaires mais plutôt de l'essor exponentiel de la science de l'espace. Au début des années 1970, les scientifiques obtinrent une meilleure compréhension des climats et atmosphères planétaires du système solaire et estimaient possible la transformation de l'atmosphère de Mars, la rendant habitable par les êtres humains (terraformation). Du fait d'une meilleure compréhension du climat planétaire, ces résultats ont été par la suite projetés sur le système Terre, dans le contexte du débat autour de l'hiver nucléaire (1983) et du changement climatique (Dörries, 2011).

Un autre enseignement émerge de la mise en regard des écrits scientifiques et politiques des années de guerre froide avec ceux des années 2000-2010. La géo-ingénierie, et plus généralement l'ingénierie de l'environnement, est présentée ou perçue non seulement comme une technologie de combat, l'ennemi étant maintenant le changement climatique d'origine anthropique, mais aussi comme une technologie bienfaitrice (pour la prospérité et le confort humains). Cette dualité se retrouve par ailleurs dans le concept récent d'Anthropocène, un terme créé et utilisé par certains scientifiques pour désigner une nouvelle époque où l'influence de l'Homme sur le système terrestre serait devenue prédominante. Et, de fait, les promoteurs du concept d'Anthropocène et de la géo-ingénierie sont parfois les mêmes, mais cette dualité n'est pourtant que rarement assumée.

## 2.2 Perception publique du mot "géo-ingénierie"

L'usage encore peu courant du mot « géo-ingénierie » ne permet pas de construire une représentation claire de son signifié à disposition d'un large public, ni de véhiculer un contenu précis à l'usage de ce grand public. La sollicitation d'un public « non averti » mais cultivé, fait néanmoins

spontanément ressortir que le préfixe « géo » signale une action d'échelle globale tandis que le mot « ingénierie » évoquant une intervention humaine suscite immédiatement une inquiétude. La première réaction est donc de méfiance. Le mot est connoté de manière anxiogène. Ce caractère anxiogène se nourrit de toute une série de questionnements du public sur : 1) les intentions à la fois des effets recherchés et des effets non voulus d'une intervention sur les écosystèmes de la géo-ingénierie, 2) une rupture d'équilibres de la biosphère et du système global produite par cette intervention, et 3) le non-contrôle (à la fois ne pas comprendre et n'avoir plus de prise).

Nous pouvons anticiper que toutes tentatives de donner quelques crédits que ce soit à une mise en œuvre de la géo-ingénierie, même présentée de manière aussi limitative que possible, ne pourront pas faire l'économie d'un "débat public" sur les :

- Effets recherchés, leur justification, leur localisation, ... ;
- Effets secondaires non voulus et/ou rétroactions, anticipés ou non ;
- Voies de retour possibles à un état antérieur, réversibilité ;
- Prises de décision et de contrôle, les questions de gouvernance et de responsabilité.

Il a été permis de trouver, lors d'interventions en entreprises, un autre type de verbatim, représentatif de l'effet délétère du concept de géo-ingénierie auprès de décideurs/acteurs en charge de prise de décision en matière de plans de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES). La géo-ingénierie est alors analysée, sinon proposée, comme une voie nouvelle, alternative à l'activation jugée problématique et économiquement coûteuse de plans de réduction des émissions de GES. On la crédite au surplus d'un potentiel de « création de valeur » de nature à aiguïser les appétits de développeurs d'affaires.

Cette vision pose problème en termes d'éthique et de responsabilité sociétale de celui qui l'adopte :

- Elle tend à alléger le poids de la responsabilité de l'acteur économique concerné en relativisant la gravité de la situation climatique globale et la nécessité de la réduction... puisqu'il existe, par ailleurs, une solution !
- Elle exonère ce dernier du caractère d'urgence des mesures à prendre... pour la même raison !
- Elle lui permet de repousser à demain et sur d'autres instances que la sienne, en l'occurrence sur les champions de la géo-ingénierie, la responsabilité de l'action à entreprendre ou de l'inaction ;
- Elle participe à cette croyance inébranlable dans « le progrès », grâce auquel tout problème trouvera toujours une solution technique ;
- Elle offre un terrain d'entente objective avec les thèses climato-sceptiques.

**Verbatim 1 :** " Je ne connais pas le sens ... en revanche géo, évidemment, relatif à la terre. Ingénierie, un ensemble de techniques " intelligentes" opérantes pour la terre ... Cela ne me parle pas trop ... mais il y a ... peut-être une connotation négative ... si ce terme sous-entend la main de l'Homme. C'est un mot qui pour moi sent la technique, et très vite des choses que je peux ne pas comprendre, ce qui pourrait me les faire écarter ... "

**Verbatim 2 :** " La géo-ingénierie propose le recours à des méthodes ou des techniques (je ne sais pas lesquelles) dans le but d'étudier les changements du climat et de proposer des solutions pour limiter les effets du réchauffement climatique. Elle ... a ses partisans et ses détracteurs. "

**Verbatim 3 :** “ La question principale que ce concept m'évoque réside avant tout dans le choix de l'action : le devenir de notre espèce, de son support (la Terre), de notre environnement, doit-il passer par une démarche d'"invention", c'est-à-dire de découverte, d'expérimentation et de mise en œuvre de moyens, au risque de jouer à "l'apprenti-sorcier"... ”

**Verbatim 4 :** “ ... si je comprends bien le sens du préfixe : qui a rapport à la planète Terre, je saisis mal le sens d'ingénierie ... j'imagine qu'il s'agit de la gestion globale de la planète ... Je connais la géologie, la géo-graphie, la géo-thermie etc ... voilà un nouveau barbarisme ... qui me dérange.”

## 2.3 Un concept lourd d'enjeux

De fait, aucune définition ne peut prétendre à la neutralité car **le concept même de géo-ingénierie est lourd d'enjeux**, de valeurs et de représentations. Les enjeux culturels, éthiques, politiques ne sont pas encore bien analysés mais ils sont manifestes dans les réactions que suscite ce terme.

Bien que le mot « géo-ingénierie » ne soit pas bien connu du grand public, les quelques expériences de sollicitation d'un public non averti mais possédant une culture scientifique permettent de dégager deux visions antagonistes :

- ce terme a un effet anxiogène sur certains. Le préfixe « géo » signale une action d'échelle globale tandis que le mot « ingénierie » évoque une intervention humaine et suscite immédiatement l'inquiétude de **l'homme jouant à l'apprenti sorcier**,
- ce terme a, pour d'autres, un effet « libérateur ». La géo-ingénierie est alors vue comme une voie nouvelle, qui permettrait de s'affranchir des efforts nécessaires de réduction d'émissions de GES. De plus, la géo-ingénierie semble créditée d'un potentiel de « création de valeur » de nature à aiguïser les appétits de développeurs d'affaires. Bref, la société et les décideurs pourraient se sentir exonérés de prendre des mesures de lutte contre les émissions de GES car il y aurait une solution alternative qui permettrait de continuer à produire et consommer sur les bases actuelles d'exploitation des énergies fossiles.

### **En guise d'introduction aux ateliers de l'ARP, les participants ont été invités à exprimer ce qu'évoque pour eux la géo-ingénierie**

- Jeu d'apprenti sorcier
- Techniques et pratiques de gestion environnementale agissant en compensation
- Mécanisme anthropique « petite cause, grand effet »
- Idée de rupture, de nouveauté appelant à trouver de nouvelles pistes de recherche
- Source de questionnement et de scepticisme
- Action anthropique délibérée sur le système Terre
- Nécessité de ne pas mettre de barrière entre atténuation, géo-ingénierie et adaptation
- Besoin urgent de se positionner sur un sujet qui apparaît dans les médias
- Divers objectifs (curatif, correctif ou amélioratif)
- Manipulation de l'environnement en première intention et à grande échelle
- Caricature des grands projets prométhéens de la modernité
- Problème politique : qui prendra la décision ?
- Visée de conservation de l'espace naturel
- Solution technologique mais questions éthiques et politiques
- Idée de contrôle et de manipulation, qui renvoie à la place de l'homme

Dans ces conditions, distinguer la géo-ingénierie de ce qu'elle n'est pas revient à se prononcer sur ce qui est acceptable et souhaitable. Ayant pleine conscience du caractère normatif d'une définition de la géo-ingénierie, il nous a semblé important d'apporter autant que possible une granularité dans l'analyse des techniques de géo-ingénierie de manière à souligner l'éventail des solutions envisageables pour agir sur le climat et de délimiter aussi clairement que possible l'usage du terme ombrelle de géo-ingénierie.

## 2.4 Définition et attributs

Le projet REAGIR a débattu sur une proposition de définition. La définition proposée ci-dessous se veut constructive et non dogmatique. Elle prend en compte la charge de valeurs (non neutralité axiologique) de la notion de géo-ingénierie. C'est pourquoi elle est précédée d'un bref historique de la notion et d'un questionnement sur les perceptions publiques de cette notion. Cette définition pointe une question centrale relative à l'échelle de grandeur des mécanismes et des impacts qui sera explicitée.

La définition est la suivante :

*« La géo-ingénierie de l'environnement correspond à l'ensemble des techniques et pratiques mises en œuvre ou projetées dans une visée corrective à grande échelle d'effets de la pression anthropique sur l'environnement. Il importe de bien distinguer la géo-ingénierie qui met en jeu des mécanismes ayant un impact global sur le système planétaire terrestre des techniques et pratiques d'atténuation ou ayant simplement un impact local. »*

La définition est analysée ci-dessous :

### - *Techniques et pratiques développées*

On soulignera la combinaison entre outils ou procédés technologiques (désignés ici par le mot « **techniques** ») et des mécanismes d'usage ou d'organisation, notés « **pratiques** ». La géo-ingénierie n'exige donc pas forcément une composante technologique. Le mot « **développées** » implique la notion d'intentionnalité délibérée, ici finalisée.

### - *Action corrective d'effets de la pression anthropique sur l'environnement*

Il s'agit dans ces termes de confiner la notion de géo-ingénierie, notamment pour ce qui est du secteur d'application. Tout d'abord, elle a ici pour finalité une gestion de l'**environnement**, alors qu'on pourrait imaginer bien d'autres motivations : alimentaires, sanitaires, démographiques, ou militaires... Les frontières stratégiques et déontologiques de la géo-ingénierie mériteront une attention particulière. L'**action** est **correctrice d'effets** parce que ne relevant pas directement des activités primaires génératrices de la **pression anthropique** (comme il en est par exemple de l'atténuation de l'émission de gaz à effet de serre, **préventive** mais non **corrective d'effets** établis dans l'atmosphère). La formulation proposée ici n'implique cependant pas que les techniques ou pratiques soient exclusivement développées pour l'action corrective. Les techniques et pratiques de géo-ingénierie peuvent venir se greffer à une action dont l'intention est autre. Une priorité, voire une exclusivité sont données aux sujets d'évolutions environnementales considérées comme dues ou partiellement dues à la **pression anthropique** : ceci n'entame en rien les possibilités de recours correctifs à partir de phénomènes naturels. Enfin, la définition ne préjuge a priori pas des grandeurs environnementales à identifier comme cibles (température, précipitations, extrêmes climatiques, acidification, eutrophisation, salinisation, désertification, pollutions,...).



- **Mettant en jeu des mécanismes**

Le **jeu**, qualifie la géo-ingénierie dans sa caractéristique d'outil (types de **mécanismes**) indépendamment de son champ d'application, notamment sans distinction sémantique entre environnement local et environnement global : par exemple, le rejet des effluents gazeux d'une unité industrielle par une cheminée pour dilution dans l'atmosphère et héliodégradation peut être considérée comme une technique de géo-ingénierie de l'environnement local, alors que le ramassage ponctuel de déchets dans les grandes aires marines internationales ne relèvera pas de la définition de la géo-ingénierie malgré son enjeu déterritorialisé. De même, la capture pour stockage du CO<sub>2</sub> dans les installations industrielles ne relèvera pas de la géo-ingénierie, contrairement à sa résorption après diffusion atmosphérique. L'étape de stockage ultérieure, elle, sera à considérer au regard de la géo-ingénierie selon la notion de **grands systèmes** retenue ou non vis-à-vis du site envisagé, telle que décrite ci-dessous.

- **Qui contribuent à réguler le système planétaire terrestre**

La notion de **régulation du système planétaire terrestre** doit s'entendre dans un sens large recouvrant aussi bien une approche par milieux composant le système (atmosphère, océan, biosphère, sous-sol) que par types de phénomènes contribuant à son fonctionnement (cycles biogéochimiques, cycles énergétiques, cycle de l'eau, fonctionnement de la biosphère,...) ainsi que leurs interactions ou combinaisons en sous-systèmes. Ces phénomènes peuvent relever aussi bien de lois naturelles que d'une éventuelle gouvernance mondiale de l'environnement. La mention du **système planétaire terrestre** donne une idée d'échelle qui pourra sans doute se considérer, en comparant les techniques et pratiques en question, à d'autres techniques nettement moins extensifs qu'on retrouve dans des approches antérieures : certaines tentatives de modification du temps, génie écologique et génie géologique. Ces deux derniers sont surtout développés aujourd'hui sur des systèmes peu ouverts et en environnement local. Ils pourraient à l'avenir être étendus spatialement jusqu'à atteindre une dimension qui relève alors de la géo-ingénierie proprement dite, comme la gestion interactive de la qualité de l'eau de grands hydro-systèmes, la création de puits de carbone atmosphérique, l'atténuation d'extrêmes climatiques, des régulations par jeu d'écosystèmes, la création de milieux réactionnels...

La géo-ingénierie se distingue donc en principe des mesures dont le but est de limiter en amont la pression anthropique sur l'environnement (le plus souvent en réduisant directement l'activité humaine ou son empreinte environnementale) et des mesures d'adaptation dont le but est de diminuer les impacts en aval sans en éliminer la cause. Cette définition, restant néanmoins très générale, appelle de nouvelles distinctions pour préciser les **frontières de la géo-ingénierie**.

Dans l'absolu, **la géo-ingénierie de l'environnement peut avoir des cibles très variées** : climat (température, précipitations, événements extrêmes...), degré d'acidité des océans, cycle de l'eau, cycles biogéochimiques (C, N, K, P et autres micronutriments), qualité de l'air, hydrosystèmes, pollutions dans les gyres océaniques... Toutefois, l'essentiel des débats menés dans l'ARP a porté sur la géo-ingénierie du climat qui vise à corriger des impacts du changement climatique. La suite de ce document est donc principalement consacrée à la géo-ingénierie du climat.

La géo-ingénierie n'exige pas forcément une composante technologique. Des mécanismes d'usage ou d'organisation (pratiques) peuvent relever de la géo-ingénierie. C'est le cas en particulier des **pratiques agricoles ou forestières** si elles sont déployées à suffisamment grande échelle pour avoir un impact sur le climat ou les cycles biogéochimiques.

Par ailleurs, une action de géo-ingénierie peut venir en complément d'une activité dont l'objectif principal n'est pas climatique. Par exemple, certaines techniques de géo-ingénierie peuvent être

greffées à d'autres activités telles que la production d'énergie renouvelable, le dessalement de l'eau de mer, l'agriculture.... On parle alors de **géo-ingénierie en seconde intention**.

**La géo-ingénierie est intentionnelle** et a une visée corrective et non préventive des effets de la pression anthropique. On exclura donc de ce rapport les méthodes conventionnelles d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES), la capture à la source du CO<sub>2</sub>, la production de biocarburants, les écotechnologies, ou encore les activités de plus petite échelle, comme l'ingénierie écologique ... ou toute autre intervention qui se distingue de la géo-ingénierie par l'échelle des impacts de l'intervention.

Enfin, il importe de bien distinguer **la géo-ingénierie qui met en jeu des mécanismes ayant un impact global sur le système planétaire terrestre** des techniques et pratiques ayant un impact uniquement local.

On peut donc *a contrario* lister un certain nombre d'exclusions qui n'appartiennent pas à la géo-ingénierie de l'environnement :

- Méthodes d'atténuation conventionnelle
- Capture à la source du CO<sub>2</sub>
- Ecotechnologies
- Techniques de modification du temps
- Ingénierie climatique (isolation des maisons)
- Géo-ingénierie du sous-sol (mines)
- Ingénierie des autres planètes (terraformation de Mars...)
- Nettoyage des déchets spatiaux en orbite

Toute action locale à impact local est également exclue. Par contre, certaines techniques locales employées de manière systématique en de nombreux endroits peuvent avoir un impact global.

### Faut-il remplacer le mot géo-ingénierie ?

Le terme de « géo-ingénierie » (traduction hâtive de « geo-engineering »), dont on propose ici la définition, relève d'un mouvement conceptuel international néoformé au regard des disciplines et métiers scientifiques confirmés de la « géologie de l'ingénieur ». Ce terme est particulièrement troublant pour la communauté des acteurs de cette dernière. Une assimilation ou une confusion médiatiques dans les termes avec les concepts très ou trop avancés de la « geo-engineering » ne doivent pas discréditer l'opérationnalité et l'innovation raisonnée des champs technologiques de la géologie de l'ingénieur durablement établis et professionnellement référencés. De plus le mot géo-ingénierie est très chargé négativement quand il évoque la problématique du changement climatique.

En français, peut-on choisir un autre mot que la traduction littérale du mot anglais *geoengineering* ? Plusieurs mots ou expressions ont été proposés :

- Ingénierie climatique et/ou environnementale,
- Ingénierie du système terre,
- Gaïa-ingénierie,
- Ingénierie globale,
- Ingénierie (climatique) planétaire

Chaque expression a des avantages et des inconvénients et la question n'a pas été tranchée. Par ailleurs, il peut être intéressant de ne pas utiliser de terme générique mais de désigner plus spécifiquement les familles de techniques dont on souhaite parler.

## 2.5 Nouvelle catégorisation des approches vis-à-vis du changement climatique

Dans son quatrième rapport d'évaluation, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (Giec) a défini l'atténuation et l'adaptation de la manière suivante (IPCC, 2007) :

- **Atténuation** : « modification et substitution des techniques employées dans le but de réduire les ressources engagées et les émissions par unité de production. Bien que certaines politiques sociales, économiques et technologiques puissent contribuer à réduire les émissions, du point de vue du changement climatique, l'atténuation signifie la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et renforcer les puits ».
- **Adaptation** : « initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus. On distingue plusieurs sortes d'adaptation : anticipative ou réactive, de caractère privé ou public, autonome ou planifiée. Citons à titre d'exemple l'édification de digues le long des cours d'eau ou des côtes et le remplacement des plantes fragiles par des espèces résistantes aux chocs thermiques ».

De plus la géo-ingénierie du climat ou ingénierie climatique a été définie dans le rapport de la réunion d'expert du Giec sur le sujet comme « toutes méthodes ou technologies dont le but est la manipulation délibérée et à grande échelle du système climatique visant à réduire les impacts du changement climatique » (IPCC, 2011). D'autres définitions existent comme celle adoptée par la Convention on Biological Diversity (CBD, 2012).

D'autre part, la Royal Society britannique a regroupé les méthodes de géo-ingénierie dans deux catégories : **l'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique**<sup>1</sup> d'une part et la **gestion du rayonnement solaire**<sup>2</sup> d'autre part (Royal Society, 2009). L'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique a pour but de diminuer la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> soit en modifiant les cycles biogéochimiques pour transférer du carbone vers les réservoirs non atmosphériques, soit par des techniques industrielles accompagné d'un stockage géologique. La deuxième catégorie consiste à intervenir sur le bilan radiatif en atténuant le rayonnement solaire afin de diminuer la quantité d'énergie absorbée par la terre et donc sa température moyenne.

Cependant, ces deux catégories ne recouvrent pas toutes les méthodes qui ont été proposées de par le monde. De plus, les frontières entre les méthodes de géo-ingénierie, d'**atténuation** du changement climatique et d'**adaptation** ne sont pas toujours claires. Par exemple, les techniques de capture du CO<sub>2</sub> rentrent *stricto sensu* dans le cadre de l'atténuation si elles se font en sortie d'installations industrielles, alors qu'elles relèvent de la géo-ingénierie du climat si elles s'appliquent au CO<sub>2</sub> atmosphérique. La frontière demeure également difficile à tracer dans le cas de la capture du CO<sub>2</sub> associée à l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie, d'autant plus que les techniques de séquestration géologique qui doivent s'ensuivre sont *a priori* les mêmes.

Un certain nombre de critères spécifiques ont été sélectionnés afin de distinguer les méthodes de géo-ingénierie des méthodes d'atténuation ou d'adaptation mais aussi de les différencier entre elles.

---

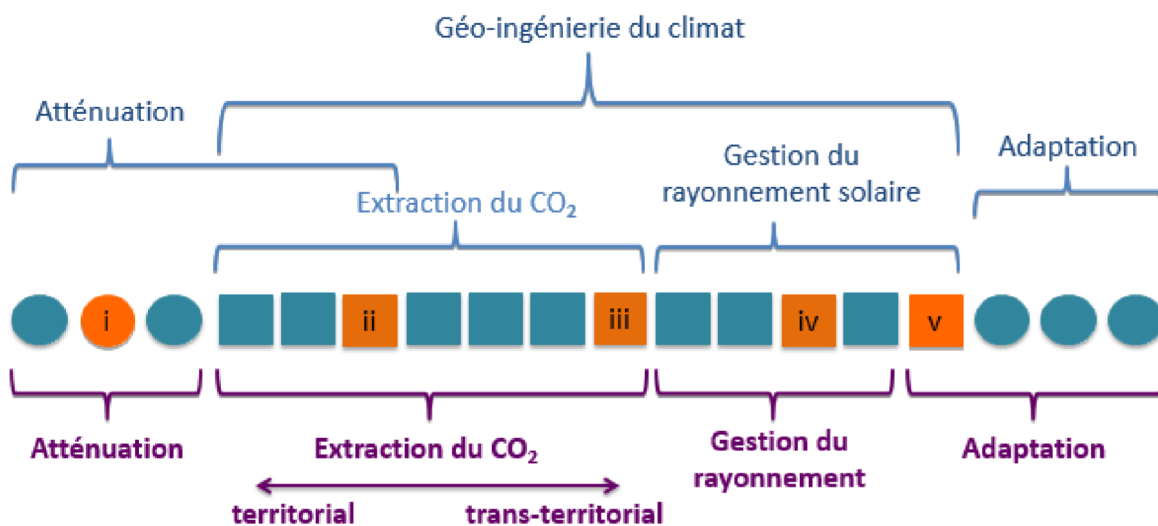
<sup>1</sup> Carbon dioxide removal ou CDR.

<sup>2</sup> Solar radiation management ou SRM.

Ont été retenus comme critères les plus significatifs : l'intentionnalité, l'échelle de temps, l'échelle spatiale, l'intensité de l'action et/ou de l'impact, le degré de réversibilité. Ceux-ci renvoient au caractère territorial ou trans-territorial des méthodes et donc aux enjeux de gouvernance et d'appropriation des techniques dans la société.

La définition et la classification des options de géo-ingénierie du climat sont des questions qui sont soulevées de manière récurrente lors des débats au sein de la communauté scientifique et avec le public. Les définitions actuelles de l'atténuation, de l'adaptation et de la géo-ingénierie du climat sont ambiguës, sources de recoupement et de confusion. Sur la base de ces critères, le groupe de travail a proposé une nouvelle classification des moyens d'actions sur le changement climatique qui distingue quatre catégories de techniques (voir la figure 1).

Ces catégories tiennent compte du contexte politique en séparant les effets territoriaux et trans-territorial. À la différence des définitions communément acceptées, notre nouvelle classification réduit l'atténuation aux seules techniques de réduction des émissions. Elle distingue les techniques d'extraction du CO<sub>2</sub> le long d'un spectre selon qu'elles sont confinées, territoriales ou trans-territoriales. Enfin, elle permet de clarifier la distinction entre techniques de gestion du rayonnement solaire, de grande échelle, et techniques relevant de l'adaptation généralement de plus petite échelle.



**Figure 1 : Nouvelle classification (en violet) des techniques de géo-ingénierie du climat dans le contexte des réponses possibles au changement climatique.** Les carrés représentent les techniques ou pratiques qui sont généralement classifiées comme relevant de la géo-ingénierie du climat, alors que les cercles représentent les autres approches. Les exemples en orange incluent (i) le développement des énergies renouvelables, (ii) l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie couplée au captage du CO<sub>2</sub>, (iii) la fertilisation des océans, (iv) l'injection d'aérosols stratosphériques, et (v) le blanchiment des toitures. Adapté de Boucher *et al.*, *Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation*, *WIREs Climate Change*, 5:23-35 doi: 10.1002/wcc.261, 2014.

Même si elle permet de mieux rendre compte de la diversité des solutions, cette classification n'est pas exempte de défauts. Il existe en effet des zones de recouvrement et des méthodes qui, selon l'approche adoptée, pourront être classées ou non dans la géo-ingénierie.

Toutefois, il nous a paru important d'adopter une classification qui conjugue des catégories scientifiques, techniques et géopolitiques pour parvenir à des recommandations claires fondées sur un examen attentif et réfléchi des diverses solutions envisageables.

#### **CATEGORIE A : REDUCTION DES EMISSIONS ANTHROPIQUES**

Cette catégorie regroupe les initiatives et mesures pour réduire ou prévenir les émissions d'agents réchauffants dans l'atmosphère. Elle comprend les actions classiques d'atténuation à la source mais exclut explicitement les méthodes de renforcement des puits de CO<sub>2</sub> comme l'afforestation ou la reforestation.

#### **CATEGORIES B ET C : EXTRACTION DU DIOXYDE DE CARBONE**

Elles englobent toutes les méthodes ayant pour but la capture directe du CO<sub>2</sub> atmosphérique ou d'autres gaz à effet de serre. Dans la catégorie B, se trouvent les méthodes à l'échelle territoriale et sans impact transfrontalier qui faisaient partie auparavant des méthodes d'atténuation.

Les autres méthodes de capture du CO<sub>2</sub>, i) qui utilisent les « biens communs » qui relèvent d'un usage collectif (comme l'océan ou l'atmosphère) ou ii) qui ont des impacts transfrontaliers, appartiennent à la catégorie C.

#### **CATEGORIE D : GESTION DU RAYONNEMENT DANS L'ATMOSPHERE**

Cette catégorie comprend toutes les méthodes ayant pour but d'affecter le climat par modification directe des flux radiatifs ou énergétiques, de l'échelle régionale (de l'ordre de 300 km x 300 km) à l'échelle globale. On retrouve là les méthodes qui reposent sur l'utilisation des « biens communs » comme l'atmosphère.

#### **CATEGORIE E : MESURES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Cette dernière catégorie englobe toutes les mesures d'adaptation, mais inclut aussi les méthodes de gestion du rayonnement dans l'atmosphère si celles-ci sont appliquées à l'échelle locale (de l'ordre de 30 km x 30 km) et à condition qu'elles n'aient pas d'impact transfrontalier.

Cette nouvelle catégorisation se projette facilement sur les définitions existantes (figure 1). La combinaison des catégories A et B correspond à la définition du Giec de l'atténuation, les catégories B et C aux méthodes d'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique et les catégories C et D aux formes les plus « perturbatrices » de la géo-ingénierie.

Contrairement aux trois premières catégories, les catégories D et E n'ont pas pour objectif d'inverser la modification anthropique de la composition de l'atmosphère qui est la principale cause du changement climatique.

### 3. Examen critique des différentes techniques

La figure 2 présente les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. Les voies de capture et de stockage du CO<sub>2</sub> atmosphérique (en bleu) sont différenciées des voies de gestion de l'équilibre radiatif de la planète, en particulier via le rayonnement solaire (en rouge).

Dans ce chapitre, on trouvera dans un premier temps une description linéaire des techniques présentées sur la figure 2 (A à K). Dans les sections suivantes, certaines de ces techniques sont analysées de manière plus détaillée.

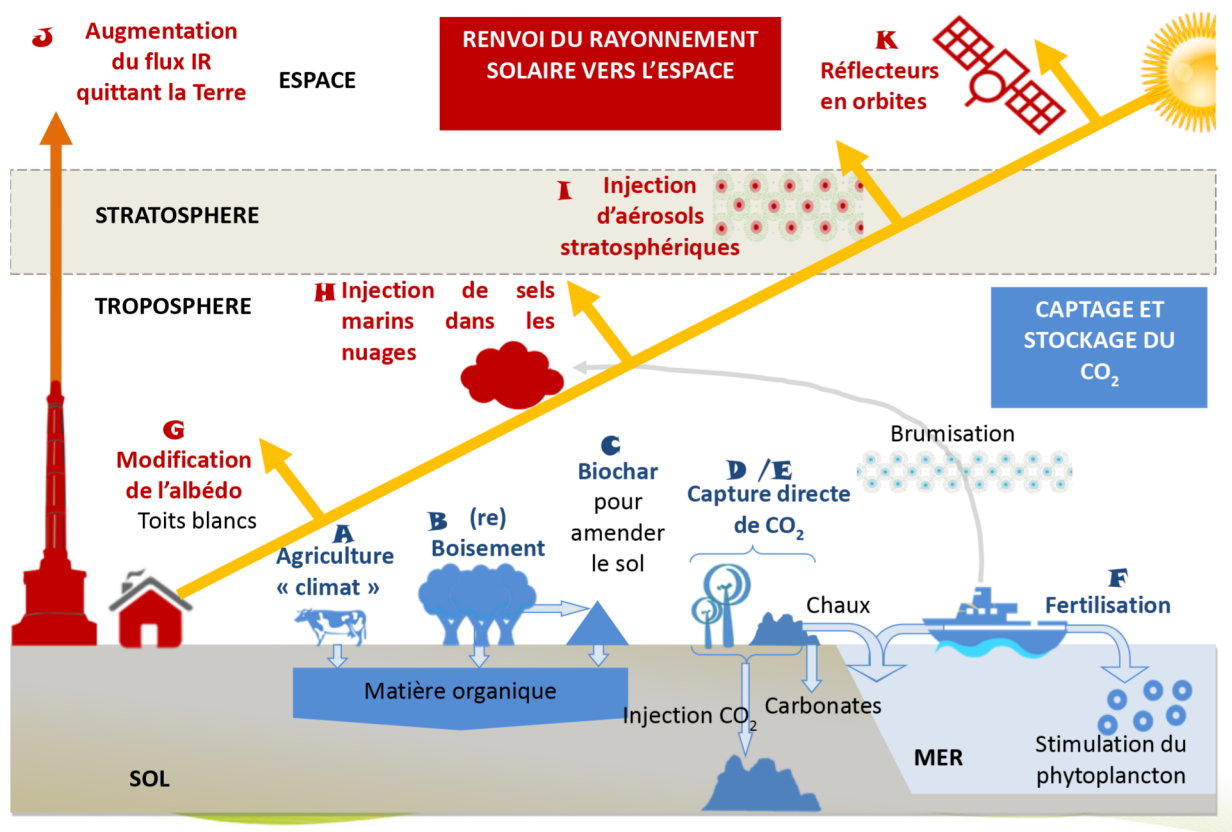


Figure 2 : Les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat

#### A/ AGRICULTURE « ORIENTEE CLIMAT »

A côté de leur finalité de production de nourriture, les techniques agricoles peuvent avoir un impact climatique non négligeable, soit en modifiant les flux du carbone, soit en modifiant la réflectivité des sols et le bilan d'énergie à la surface. Il est donc envisageable d'augmenter les puits de carbone en modifiant l'organisation des parcelles agricoles et forestières, en introduisant des techniques de non labour, en enfouissant des résidus de culture, en développant l'agroforesterie ou plus globalement l'agriculture « écologiquement intensive ». Les potentiels et la longévité du stockage du carbone associés à ces techniques sont encore très mal documentés.

## **B/ AUGMENTATION DES SURFACES BOISEES**

Les arbres présentent la capacité de séquestrer du carbone durant leur croissance (de plusieurs années à un siècle). Le développement des surfaces boisées par plantation d'arbres permettrait donc de stocker plus de carbone dans la végétation mais aussi dans les sols par la formation d'humus jusqu'à ce que le stock d'équilibre soit atteint. On parlera de reforestation pour la plantation d'arbres sur des surfaces qui ont été boisées dans le passé et d'afforestation pour la plantation d'arbres sur des surfaces non boisées dans le passé. Le stockage de carbone est avéré sur le moyen terme mais pourrait être affecté par le changement climatique. Cependant, la reforestation et l'afforestation posent des problèmes de compétition entre usages des sols, en particulier vis à vis de l'agriculture, ce qui limite leurs potentiels à l'échelle mondiale.

## **C/ AUGMENTATION DU CARBONE ORGANIQUE DES SOLS PAR APPORT DE BIOCHAR**

Grâce à la photosynthèse, les végétaux peuvent stocker du carbone. La biomasse végétale, une fois récoltée et après pyrolyse (décomposition par la chaleur en l'absence d'oxygène), peut donner du biochar, une sorte de charbon de bois qui contient environ 50% du carbone initialement présent dans le végétal. Enfouir du biochar dans le sol permettrait à la fois d'améliorer la fertilité de certains sols tout en permettant un stockage de carbone sous forme réduite. Certaines études ont montré une amélioration de la productivité agricole en particulier pour les sols des régions tropicales. Là encore, le potentiel et la longévité du stockage sont incertains et il peut exister des conflits d'usage de la biomasse.

## **D/ TECHNIQUES CONFINÉES DE CAPTURE DU CO<sub>2</sub> ATMOSPHERIQUE**

Une série de techniques d'ordre industriel a été proposée pour capter le CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère et le stocker de manière durable dans le sous-sol. Des dispositifs, qui ont reçu le nom d'« arbres synthétiques », permettent de capturer le CO<sub>2</sub> atmosphérique après réaction avec une solution basique (de type NaOH, KOH,...) contenu dans un dispositif industriel. Il se forme alors des carbonates qui peuvent être transformés en CO<sub>2</sub> concentré qui peut ensuite être séquestré. Une variante consiste en une colonne d'absorption (CO<sub>2</sub> atmosphérique / NaOH généré par électrodialyse d'eau salée) pour aboutir à du carbonate stockable géologiquement. Il existe déjà des prototypes mais ces techniques restent très coûteuses à l'heure actuelle et nécessitent des quantités importantes d'énergie décarbonée.

## **E/ ALCALINISATION DE L'OCEAN**

Une variante non confinée de la technique précédente consiste à modifier le pH de l'eau de mer par ajout de chaux (CaO) préalablement formée à partir de calcaire porté à haute température, de manière à doper le puits océanique de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cette technique, très peu étudiée et sans doute très difficile à mettre en pratique, nécessite des quantités importantes d'énergie et viendrait modifier les équilibres chimiques et biologiques de l'océan.

## **F/ FERTILISATION DES OCEANS**

Il existe un flux de matière organique et inorganique vers les sédiments provenant d'organismes marins ayant préalablement absorbé du CO<sub>2</sub> atmosphérique pour se développer. La technique de fertilisation des océans repose sur l'idée que l'ajout de fer dans des zones de l'océan pauvres en fer mais riches en autres nutriments favoriserait la production primaire marine et augmenterait la quantité de CO<sub>2</sub> « absorbée » par les océans. On peut aussi imaginer une fertilisation par l'ajout de matière azotée, phosphorée ou une modification de la colonne océanique pour favoriser le recyclage des nutriments. Le potentiel de ces techniques est incertain, la vérification des quantités de carbone

stocké est très difficile et des effets collatéraux néfastes sur la biologie marine ont d'ores et déjà été identifiés.

#### **G/ MODIFICATION DE L'ALBEDO DES SURFACES TERRESTRES**

Une technique consisterait à augmenter artificiellement la réflectivité des surfaces terrestres afin de renvoyer dans l'atmosphère une plus grande partie du flux solaire arrivant sur terre de manière à modifier le bilan radiatif de la planète et d'induire un refroidissement. Si une augmentation de l'albédo de l'océan et des déserts paraît difficilement réalisable, il est plus facile d'envisager une modification de l'albédo de certains couverts végétaux et des toits de surfaces bâties mais avec des effets moindres et plus locaux ou avec des modifications possibles de la circulation atmosphérique si la technique est pratiquée à grande échelle.

#### **H/ INJECTION DE SELS MARINS DANS LES NUAGES**

Il s'agirait d'augmenter la concentration de noyaux de condensation par pulvérisation de particules d'eau de mer dans la partie basse de l'atmosphère, ce qui, sous certaines conditions, conduirait à une augmentation de la brillance des nuages maritimes. Il existe là encore des effets collatéraux encore mal connus, en particulier sur les précipitations. De plus, l'efficacité de la technique pour contrecarrer le réchauffement climatique reste incertaine. Une fois mise en place, l'injection doit être permanente, sous peine de voir le refroidissement induit s'estomper très rapidement.

#### **I/ INJECTION D'AEROSOLS STRATOSPHERIQUES**

Les éruptions volcaniques suggèrent qu'il est possible de refroidir le climat en injectant des gaz soufrés dans la stratosphère (la partie haute de l'atmosphère). Cette méthode consisterait à disperser des gaz ou des particules soufrés en haute altitude dans la stratosphère de manière à réfléchir une partie du rayonnement solaire et à entraîner un refroidissement de la planète. L'efficacité de cette technique pour refroidir la planète est avérée, mais de nombreux effets collatéraux néfastes sont attendus, en particulier un retard dans le rétablissement de la couche d'ozone stratosphérique et des modifications dans les distributions régionales des précipitations. Comme pour la technique précédente, il y aurait un rattrapage climatique dans le cas d'une interruption prématurée de l'injection dans la mesure où les concentrations en GES ne répondront que très lentement aux réductions futures des émissions.

#### **J/ COURTS-CIRCUITS ENERGETIQUES**

Au lieu de réfléchir le rayonnement solaire (techniques G, H, I et K), on peut imaginer des techniques dont l'objectif serait d'accroître la quantité de rayonnement thermique s'échappant vers l'espace. La faisabilité, l'efficacité et les effets collatéraux de ces techniques dont certaines ont été proposées dans l'atelier restent à démontrer.

#### **K/ REFLECTEURS EN ORBITE**

Il s'agirait de diminuer la quantité de lumière solaire incidente sur la Terre, à l'aide de structures réfléchissantes localisées à très haute altitude. Le point de Lagrange a été proposé pour profiter d'un équilibre (certes instable) de l'orbite. Quand on sait que ce point est situé à environ 1 500 000 km de la Terre en direction du soleil, on mesure les défis technologiques et le coût sans doute exorbitant de la mise en œuvre de cette solution. Là encore, cette technique ne permet pas de contrecarrer le changement climatique dû aux GES dans toutes ses dimensions et souffre du même risque de rattrapage climatique que les autres techniques de gestion du rayonnement solaire.



### 3.1 Gestion du rayonnement solaire par les aérosols atmosphériques

L'un des projets de géo-ingénierie les plus discutés mais aussi parmi les plus controversés pour contrecarrer le réchauffement climatique est sans doute l'injection de soufre dans la stratosphère. L'objectif est d'y créer des aérosols d'acide sulfurique qui ont comme propriété de réfléchir le rayonnement solaire incident. De cette manière, on augmenterait l'albédo de la Terre, ce qui générerait un forçage radiatif négatif qui s'opposerait au forçage positif dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. On pourrait viser un effet similaire en injectant le soufre dans la troposphère mais il faudrait alors des quantités de soufre beaucoup plus élevées car les aérosols ont des temps de vie caractéristiques d'environ une semaine dans la troposphère et d'un an dans la stratosphère. La région préférée d'injection est la stratosphère tropicale car le soufre injecté sous forme gazeuse ou particulaire aux tropiques aurait tendance à être entraîné par la circulation générale stratosphérique et à se disperser dans les deux hémisphères, influençant ainsi le contenu en aérosols stratosphériques à l'échelle globale et de manière relativement homogène.

Ce projet s'inspire du refroidissement de la surface de la Terre observé après les grandes éruptions volcaniques qui sont associées à des injections de grandes quantités de soufre dans la stratosphère. Ce refroidissement est temporaire. Il ne dure que quelques années, le temps que les aérosols d'acide sulfurique d'origine volcanique soient éliminés de l'atmosphère. L'objet de la géo-ingénierie reposant sur les aérosols stratosphériques est d'obtenir un refroidissement ininterrompu de la surface en injectant continuellement du soufre de manière à maintenir une couche d'aérosols d'acide sulfurique permanente. Le niveau de refroidissement dépendrait du taux d'injection de soufre. L'éruption volcanique du Mont Pinatubo en 1991 a injecté 20 Mt de dioxyde de soufre dans la stratosphère et a généré un refroidissement global d'un demi-degré environ pendant la première année. Cependant, il n'est pas acquis que l'injection continue de 20 Mt de dioxyde de soufre durant un an produise une couche d'aérosols d'acide sulfurique comparable à celle produite par l'éruption volcanique du Mont Pinatubo en termes de distribution en taille d'aérosols et donc en termes de forçage radiatif. En effet, la distribution en taille des aérosols d'acide sulfurique est le résultat de la compétition entre différents processus microphysiques, tels que la nucléation homogène (formation de nouvelles particules d'aérosols) et la condensation d'acide sulfurique (produit par l'oxydation du soufre) sur des aérosols préexistants. Cette compétition varie selon la charge de soufre à oxyder. De plus, la question de la taille des aérosols n'est pas seulement déterminante dans l'efficacité de diffusion du rayonnement solaire mais aussi pour leur temps de résidence dans la stratosphère qui dépend très fortement de cette taille. Clairement, la relation entre l'amplitude du refroidissement et la quantité de soufre injecté est loin d'être linéaire avec probablement des effets de saturation pour des charges très élevées de soufre.

Les études de faisabilité ont conclu que ce projet de géo-ingénierie serait réalisable sur le plan technique à moyen-long terme même s'il existe de nombreuses incertitudes sur les coûts. Cependant, les études d'impact ont mis en évidence des effets collatéraux importants tels qu'une diminution de la couche d'ozone stratosphérique, notamment en Antarctique, tant que subsistera une teneur élevée de composés halogénés dans la stratosphère, ce qui sera le cas pendant encore de nombreuses décennies. La diminution de la couche d'ozone induit elle-même une augmentation du rayonnement ultraviolet à la surface, et des modifications régionales des précipitations. Elles ont aussi montré que les modèles de climat actuels ne sont pas suffisamment précis pour évaluer correctement les effets sur le climat régional d'une telle injection de soufre dans l'atmosphère. Les études ont également identifié un autre risque majeur. En effet, si pour une raison quelconque les injections de soufre cessent, une grosse partie du réchauffement global qui aurait été évité réapparaîtrait en moins d'une décennie. Un réchauffement aussi rapide aurait certainement des conséquences assez catastrophiques pour les écosystèmes et la société humaine. Enfin, l'implémentation de ce type de géo-ingénierie ne réglerait pas du tout le problème de l'acidification des océans causé par l'augmentation des teneurs en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Malgré les effets

secondaires assez inquiétants et de nombreuses incertitudes, le projet continue à retenir l'attention du fait de son très fort potentiel à modifier le bilan radiatif à l'échelle globale et de sa relative facilité technique de mise en place. Il est donc important de continuer à identifier et quantifier l'ensemble des effets secondaires directs et indirects associés à ce projet.

Outre les incertitudes nombreuses sur les impacts de cette technique et les conséquences sur d'autres paramètres climatiques que la température, comme la pluviométrie, ce projet de géo-ingénierie pose des problèmes majeurs de gouvernance mondiale. L'échec massif de cette dernière dans la lutte contre le réchauffement climatique suggère des difficultés analogues à propos de la gouvernance de cette technique. Des travaux réflexifs du côté des sciences sociales, des sciences politiques et de l'éthique, sur les questions de gouvernance mondiale de techniques de géo-ingénierie doivent être menés et approfondis.

### 3.2 Capture directe du dioxyde de carbone

La capture directe du carbone vise à proposer la résorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique comme une prestation technique de dépollution. Alors que dans la séquestration temporaire par les forêts, le carbone est capté par la végétation et ensuite conservé dans la biomasse ou les sols, on vise ici à capturer le CO<sub>2</sub> d'une manière industrielle directement à partir de l'atmosphère, pour ensuite le stocker. Il est en général proposé que ce stockage se fasse dans les couches géologiques profondes (sous forme de CO<sub>2</sub> gazeux et/ou dissous), mais il est aussi envisageable que le CO<sub>2</sub> soit stocké sous forme minérale (CaCO<sub>3</sub> et/ou MgCO<sub>3</sub>).

La capture directe nécessite une énergie plus importante que la capture sur site, puisque le CO<sub>2</sub> est moins concentré dans l'air que dans les fumées industrielles. Mais ce handicap peut être compensé par plusieurs avantages : l'air contient moins de produits indésirables que les fumées ; le taux d'utilisation des équipements et la durée des échanges gazeux peuvent être plus élevés dans une installation de capture directe à partir de l'atmosphère que dans une capture en sortie d'usine ; les plus grandes possibilités de localisation d'une installation de capture à partir de l'air peuvent diminuer les coûts liés à l'énergie ou au transport du CO<sub>2</sub> capturé, mais également la vulnérabilité aux risques induits.

Le défi technologique revient à mettre le CO<sub>2</sub> atmosphérique en contact avec des milieux hydro-chimiques fortement basiques, induisant une carbonatation rapide puis une précipitation du composé carboné. Ces pratiques sont proches de celles actuellement utilisées dans les industries minérales.

Deux exemples de procédés l'illustrent (voir Annexe A) :

- Le premier consiste à produire à partir d'eaux salées des flux d'acides et de bases fortes grâce à une électrolyse. Le flux basique sert à capturer le CO<sub>2</sub> atmosphérique, tandis que le flux acide peut soit être utilisé pour libérer le CO<sub>2</sub> avant stockage, soit bénéficier à une co-exploitation industrielle installée sur le site (telle que le dessalement ou l'hydro-métallurgie).
- Le second consiste en un dispositif d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans un lagunage de lait de chaux. La chaux (CaO) est initialement fournie par la calcination de roches calcaires (CaCO<sub>3</sub>) abondamment distribuées à la surface du globe. Le CO<sub>2</sub> émis lors de cette calcination est immédiatement capturé et stocké, et le calcaire formé après captation du CO<sub>2</sub> atmosphérique peut être réinjecté en début de chaîne.

Des sources d'énergies décarbonées et/ou intermittentes peuvent être utilisées dans ces deux exemples : électricité photovoltaïque, éolienne ou géothermique pour le premier, four solaire pour le second. Ces procédés présentent de faibles emprises au sol (quelques hectares par million de tonnes

de CO<sub>2</sub> annuellement absorbées) et correspondent à des confinements continentaux dont les aléas environnementaux apparaissent maîtrisables, les flux minéraux à gérer son comparables en quantité et en qualité au regard des activités conventionnelles des industries extractives. Ils contrastent sur ce point aussi avec d'autres concepts de géo-ingénierie impliquant le recours à des systèmes écologiques beaucoup plus ouverts (océan, atmosphère, biosphère, ...).

Ces types de procédés sont aussi plus proches de la démonstration industrielle car enchaînant des opérations unitaires assez connues et ne nécessitant, pour l'essentiel, qu'une ingénierie de calibrage. De ce fait, le défi dans ce domaine n'est pas l'invention mais l'innovation. Même si les perspectives de marché sont lointaines, si le coût futur du CO<sub>2</sub> ainsi capté est controversé, et si la sécurité environnementale reste à démontrer, des startups développant des technologies de capture directe du CO<sub>2</sub> à partir de l'air existent déjà. Certaines ont répondu au Virgin Earth Challenge, une compétition offrant 25 millions de dollars à celui qui peut démontrer un design commercialement viable pour retirer de façon permanente des gaz à effet de serre de l'atmosphère. Il s'agit à ce stade de projets sur financement capital-risque de l'ordre du million de dollars. Certaines, comme Carbon Engineering ou Global Thermostat, ont montré des prototypes de la taille d'un container développés pour capturer, à terme, une quantité de carbone de l'ordre du kt CO<sub>2</sub> par an. Ces performances sont cependant difficiles à vérifier.

Comme les autres voies de géo-ingénierie de l'environnement, la capture directe à partir de l'air pose la question de l'innovation responsable. Dans l'incertitude vis à vis des coûts et des potentiels à long terme et à l'échelle requise, les ressources nécessaires en énergie et en investissements pour affecter de façon mesurable la composition de l'atmosphère apparaissent cependant grandes devant les flux disponibles.

Ainsi, on jugera de la pertinence de cette technique dans le cadre de la géo-ingénierie climatique, visant à réduire l'effet de serre anthropique, selon deux critères :

- Le flux net de CO<sub>2</sub> capturé annuellement à l'échelle mondiale. Celui-ci doit être de l'ordre de quelques milliards de tonnes par an pour être significatif face aux émissions fossiles. Il faut de plus soustraire au flux brut de capture un éventuel flux dû aux pertes du système « capture + stockage », que ces pertes aient lieu lors du transport ou lors du stockage lui-même. La difficulté, ici, étant la surveillance des fuites éventuelles.
- Le retour sur investissement carbone. Puisque la capture directe demande une grande quantité d'énergie, il faut s'assurer que l'énergie utilisée est majoritairement décarbonée, afin de ne pas émettre plus de CO<sub>2</sub> lors de la production de cette énergie nécessaire à la capture que la quantité de CO<sub>2</sub> effectivement capturé (de Richter *et al.*, 2013).

### 3.3 Capture du dioxyde de carbone par biologie terrestre

#### 3.3.1 Stockage du carbone dans la biomasse continentale

Le principe est d'augmenter la biomasse des écosystèmes et maintenir ce stock dans les écosystèmes. Les écosystèmes concernés sont les forêts, voire les savanes arbustives, car les écosystèmes herbacés n'ont qu'un potentiel négligeable d'augmentation de leur biomasse (mais un potentiel d'augmentation du carbone dans le sol). Comme l'objectif est d'atteindre une séquestration permanente (ou de la plus longue durée possible) du carbone dans la biomasse, le principe est de créer de nouveaux stocks (afforestation, reforestation) ou d'augmenter à grande échelle les stocks de forêts existantes (conservation, foresterie).

Une fois que ces stocks sont créés, l'enjeu est de les maintenir sur le long terme afin d'éviter que le carbone qu'ils contiennent ne soit réémis sous forme de CO<sub>2</sub> atmosphérique (par exemple lors d'incendies, maladies, tempêtes, changement d'usage des sols). En ce sens, ce principe de l'augmentation du carbone de la biomasse à grande échelle est opposé à celui de son utilisation pour la bioénergie, bien qu'une gestion forestière puisse trouver un compromis entre ces deux principes opposés.

Les estimations du potentiel mondial pour augmenter le stock de biomasse sont très incertaines en raison de limitations par les besoins des terres concurrentes (par exemple, l'agriculture, les biocarburants, l'urbanisation et la conservation) et diverses barrières socio-culturelles. Il existe plusieurs programmes 'iconiques' de plantations de forêts dans des zones arides ou semi-arides, en Chine et en Afrique du Nord (projet de barrière verte).

Un ordre de grandeur simple du potentiel maximum de reconstitution des stocks de biomasse peut être trouvé en faisant l'hypothèse d'une restauration de tout le carbone libéré par la déforestation depuis 1750, soit  $180 \pm 80 \text{ GtC}^3$ . Ce potentiel lié à la reforestation pourrait même être supérieur, puisque les forêts nouvellement plantées sont maintenant capables d'absorber plus de CO<sub>2</sub> qu'elles ne l'auraient été en 1750. Ceci reste vrai tant que l'effet potentiellement négatif du réchauffement climatique local sur les stocks de carbone reste inférieur à l'effet positif de fertilisation du CO<sub>2</sub> (Gasser et Ciais, 2013). House *et al.* (2002) ont estimé que la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> d'ici à 2100 serait réduite d'environ 40-70 ppm dans un scénario idéalisé de restauration de tout le carbone perdu par l'action de l'homme sur les écosystèmes (voir l'effet «rebond»). En comparaison, le scénario RCP8.5 du Giec prévoit une augmentation de +540 ppm entre 2000 et 2100 (Meinhausen *et al.*, 2011).

En considérant l'afforestation et la reforestation comme des méthodes de géo-ingénierie, il est important de tenir compte des effets biophysiques sur le climat, en plus de la séquestration du carbone, liés aux modifications de l'albédo, l'évapotranspiration et la rugosité de la surface (Bonan, 2008; Drewry *et al.*, 2014). Ces effets sont locaux et donc dépendants de la région où l'afforestation ou la reforestation est effectuée. Des études de modélisation ont montré que la plantation de forêts boréales va diminuer l'albédo de la surface terrestre et avoir un effet net (biophysique plus biogéochimique) de réchauffement, alors que le boisement dans les basses latitudes est susceptible d'augmenter l'évapotranspiration et avoir un effet de refroidissement net (Bonan *et al.*, 1992 ; Betts, 2000 ; Bala *et al.*, 2007 ; Bathiany *et al.*, 2010). Dans les régions arides et semi-arides qui sont candidates pour le déploiement de vastes programmes d'afforestation, une diminution d'albédo consécutive à la plantation de forêt augmente l'énergie capturée par la surface et réchauffe l'atmosphère localement via une augmentation des flux de chaleur sensible (Teuling *et al.*, 2010 ; Rotenberg *et al.*, 2010). Par conséquent, l'effet climatique net de l'afforestation et la reforestation peut contrecarrer le refroidissement lié à la séquestration du carbone (Bala *et al.*, 2007; Arora et Monténégro, 2011; Pongratz *et al.*, 2011).

En retour, le changement climatique futur, par exemple une augmentation de l'aridité peut causer une mortalité des plantations en zones arides. Ce phénomène est déjà observé en Chine pour des forêts plantées dans des régions de précipitations comprises entre 200 et 400 mm annuels (Liu *et al.*, 2006). Une augmentation des stocks de biomasse à grande échelle peut également exiger plus de nutriments (engrais) qui sont associés à des émissions de CO<sub>2</sub> fossile, et des émissions de N<sub>2</sub>O. L'impact de plantations sur les ressources en eau ne sont pas négligeables, avec en zone tempérée un flux de transpiration 4-5 fois plus élevé pour une plantation qu'une prairie (Jackson *et al.*, 2005).

---

<sup>3</sup> GtC = gigatonne de carbone est équivalent au Pg C = pétagramme de carbone

Les enjeux scientifiques identifiés concernent :

- les effets climatiques nets, incluant les effets biophysiques de la plantation de forêts ;
- la vulnérabilité des stocks de biomasse au changement du climat et aux événements extrêmes (incendies, tempêtes, insectes ...) en particulier en zone aride ;
- les potentiels globaux d'augmentation des stocks de biomasse ;
- les co-bénéfices / arbitrages vis à vis des changements de teneur en carbone du sol ;
- les liens avec les pratiques agricoles et les populations.

### 3.3.2 Bioénergie couplée à la capture du CO<sub>2</sub> émis

Cette variante consiste à récolter la biomasse annuellement, de l'utiliser pour la production d'énergie tout en séquestrant au passage le CO<sub>2</sub> émis, par exemple dans des réservoirs géologiques, voire dans l'océan profond, cette séquestration faisant appel aux mêmes technologies de capture et stockage du carbone (CCS). Par rapport à l'augmentation du stockage dans la biomasse, le principe d'action sur le cycle du carbone de la bio-énergie couplée à la capture et au stockage du carbone (BECCS) est assez différent. L'objectif n'est pas d'augmenter les stocks de carbone des écosystèmes mais d'augmenter la productivité primaire en cultivant des biocarburants qui sont récoltés régulièrement, donc sans effet sur les stocks de carbone. La fraction de la productivité primaire récoltée produit de l'énergie et le CO<sub>2</sub> est séquestré.

La BECCS intervient conceptuellement dans les scénarios RCP4.5 et RCP2.6 comme une technologie d'émission négative dans la seconde moitié du 21<sup>ème</sup> siècle, afin de stabiliser le CO<sub>2</sub> atmosphérique sans faire porter tout l'effort d'atténuation sur la réduction des émissions de carbone fossile (van Vuuren *et al.*, 2007 ; Thomson *et al.*, 2011). La technologie BECCS n'a pas été testée à l'échelle industrielle d'un projet pilote à notre connaissance.

La BECCS est donc associée aux mêmes limitations et incertitudes que celles qui ont alimenté le débat sur les biocarburants : usage des sols et compétition pour les terres arables, déplacement de la déforestation et changement d'usages indirects des terres, « dette carbone », émissions associées de N<sub>2</sub>O (un puissant gaz à effet de serre qui pourrait atténuer les bénéfices du CO<sub>2</sub> non émis), impacts sur les ressources en eau et biodiversité.

Les enjeux scientifiques suivants ont été identifiés :

- toute problématique également liée aux agro-carburants : impacts sur l'usage des terres et la production agricole, et les effets induits (pertes de carbone d'écosystèmes naturels, effet de rétroactions biophysiques (albédo, transpiration), émissions de N<sub>2</sub>O,
- estimation des potentiels globaux d'augmentation de la productivité,
- estimation des capacités de stockage réellement exploitables, c'est-à-dire prenant en compte l'acceptabilité sociale, l'accessibilité technologique et la faisabilité économique.

### 3.3.3 Augmentation du carbone contenu dans le sol

Le sol (entre la surface et 3m de profondeur) contient trois à quatre fois plus de carbone organique que l'atmosphère et des variations des stocks de carbone du sol peuvent impacter significativement la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur des pas de temps courts (de l'ordre de quelques années). La teneur en carbone organique du sol influe de manière importante sur son fonctionnement. En effet, elle va avoir un impact sur la réserve en eau, la sensibilité à l'érosion, l'abondance et la

diversité de la (micro-)faune et la rétention de polluants. Augmenter le stockage du carbone organique dans les sols par des actions de géo-ingénierie est donc potentiellement pertinent mais les effets collatéraux bénéfiques ou désastreux de telles interventions peuvent être majeurs.

### 3.3.3.1 Augmentation du carbone organique des sols en modifiant les pratiques culturales

La capacité pour l'augmentation potentielle du carbone du sol sur les terres agricoles dégradées a été estimée par Lal (2004a) à 42-78 GtC (0-60% du carbone organique du sol perdu depuis 1750 par les pratiques agricoles). Pour augmenter le carbone du sol, il a été proposé l'adoption de pratiques culturales de conservation avec cultures de couverture et paillis avec des résidus de récolte, conversion des terres marginales, apports d'engrais organiques. Des estimations récentes suggèrent un potentiel de 30-60 GtC de stockage supplémentaire sur les 25-50 ans à venir (Lal, 2004b ; Smith *et al.*, 2005). Ces estimations sont très incertaines, et les inventaires existants de carbone sol des régions cultivées montrent tous une perte actuelle de carbone du sol sur les terres arables aux causes incertaines (Bellamy *et al.*, 2005) mais qui pourraient être liées à l'augmentation de la température ou de la fertilisation.

Comme pour les régions agricoles, des modifications des pratiques sylvicoles pourraient permettre des augmentations des stocks de carbone des sols. En effet, plusieurs études et synthèses ont ainsi pointées l'influence du type de peuplement forestiers et du mode de gestion sylvicole sur les stocks de carbone des sols (Jandl *et al.*, 2007 ; Vesterdal *et al.*, 2013). Toutefois, la littérature sur le sujet est moins abondante que pour les sols cultivés, et les discussions lors du récent atelier national REGEFOR (Champenoux, 2013) a montré qu'aucune information fiable n'est disponible sur les potentialités relatives de séquestration de carbone organique du sol des différents modes de gestion sylvicoles.

Les sols cultivés ont des stocks de carbone généralement plus faibles que les sols de forêt ou de prairie. Une conversion des sols agricoles en prairie ou en forêt permettrait donc un stockage de carbone. Cependant, de telles conversions rentrent inévitablement en conflit avec l'utilisation des terres pour la production des denrées alimentaires ou d'agrocarburants.

Les gains en carbone consécutifs aux modifications des pratiques culturales ou d'usage des terres dépendront des contextes pédo-climatiques (Virto *et al.*, 2012 ; Kurganova *et al.*, 2014). Cependant, la réponse des stocks de carbone à une modification des pratiques ou de l'usage est mal connue. Le concept de saturation en carbone du sol pourrait être une piste pour mieux appréhender la réponse des stocks de carbone à une modification des pratiques ou de l'usage. En effet, plusieurs auteurs (Hassink, 1996, 1997 ; développé par Six *et al.*, 2002 ; Stewart *et al.*, 2007, 2008, 2009) ont proposé que la quantité de particules fines d'un sol (argiles ou argiles mélangés à des limons fins) détermine sa capacité à stocker du carbone. Cette capacité pourrait être modulée par la minéralogie du sol (Feng *et al.*, 2013).

Cette idée mérite des investigations plus poussées pour être réellement validée mais elle aurait des implications pour la gestion des stocks de carbone. En effet, il faut déjà connaître la capacité maximale d'un sol à stocker du carbone avant d'adapter les pratiques et stratégies. Il pourrait dans ce cas, exporter sans arrière-pensée le carbone des parcelles dont le sol est sur-saturé (les apports se minéraliseraient rapidement) et au contraire augmenter les apports de carbone dans les sols sous-saturés.

Les enjeux scientifiques identifiés sont les suivants :

- estimation des effets de la gestion sylvicole sur l'évolution des stocks de carbone,
- compréhension de la modulation par le contexte pédo-climatique des effets de modifications des pratiques culturales et d'usage des terres.

### 3.3.3.2 Augmentation du carbone organique des sols par apport de biochars

L'apport de biochars (solide riche en carbone produit par pyrolyse de biomasse) aux sols a été présenté comme une solution gagnant-gagnant (Laird, 2008). En effet, ce procédé permettrait de fournir de l'énergie lors de la combustion permettant d'économiser de l'énergie fossile, d'augmenter le stock de carbone du sol en épandant des résidus dégradés très lentement et d'augmenter la fertilité du sol grâce à l'effet positif du biochar sur la réserve en eau et en nutriments. Woolf *et al.* (2010) ont estimé que l'adoption de politiques volontaristes pour promouvoir la production de biochar pourrait permettre des émissions négatives de 1.8 GtC par an.

Cependant, une bonne partie de la réduction des émissions dans l'étude de Woolf *et al.* (2010) vient du stockage de carbone du biochar dans les sols. L'étude de sensibilité montre que la valeur de réduction des émissions dépend beaucoup du temps de résidence du biochar dans le sol. Ce paramètre est très mal contraint et n'est pas forcément aussi élevé qu'espéré. Ainsi, Singh *et al.* (2012) ont déterminé dans une méta-analyse que le temps de résidence moyen est inférieur à 100 ans et pas de l'ordre de plusieurs centaines d'années comme Woolf *et al.*, (2010) en ont fait l'hypothèse.

D'autre part, Woolf *et al.* (2010) n'ont pas comparé l'hypothèse « biochar » avec une hypothèse qui consisterait à « laisser les résidus de culture ou transférer de la biomasse vers des sols pauvres ». En effet, ceci permettrait également d'augmenter les stocks de carbone et d'améliorer la fertilité des sols. Ceci aurait également de manière plus évidente un effet sur la structure du sol. Les biochars pourraient réduire les émissions de N<sub>2</sub>O, mais augmenter les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> par les sols agricoles (Wang *et al.*, 2012b). Un apport de biochar pourrait également favoriser une perte rapide de l'humus de la forêt et le carbone du sol dans certains écosystèmes durant les premières décennies (Wardle *et al.*, 2008).

Les enjeux scientifiques identifiés sont les suivants :

- estimation du temps de résidence du biochar dans le sol,
- compétition avec des utilisations plus complètes de la biomasse,
- comparaison de la technique de biochar avec d'autres techniques d'apport de biomasse au champ (avec bilan complet de carbone et co-bénéfices ou co-dommages).

### 3.3.3.3 Augmentation du carbone contenu dans les horizons profonds des sols (entre 50 cm et 2 m)

La teneur en carbone organique du sol décroît exponentiellement avec la profondeur et les horizons profonds présentent des teneurs très inférieures aux horizons de surface (Jobaggy et Jackson, 2000). Si on arrive à avoir une teneur dans les horizons profonds (30-100 cm) égale à celle des horizons de surface (0-30 cm) partout, on doit pouvoir théoriquement tripler le stock de carbone organique du sol (stockage de 5000 GtC).

Pour augmenter les stocks de carbone organique profonds, il faut réussir à mettre le carbone en profondeur et à ce qu'il y reste. Plusieurs pistes sont envisageables : 1) promouvoir les plantes annuelles à racines profondes et abondantes ; 2) éventuellement augmenter la profondeur de labour sous certaines conditions. L'augmentation du carbone en profondeur pourrait s'accompagner de bénéfices connexes (augmentation de la capacité de rétention en eau, effet bénéfique sur la faune du sol...) ou d'effets négatifs (augmentation de l'anoxie dans les horizons profonds).

Les enjeux scientifiques identifiés sont les suivants :

- dynamique du carbone organique dans les sols profonds,
- mécanismes d'introduction du carbone organique dans les sols profonds,
- conséquences d'une augmentation massive de carbone organique dans les sols profonds.

#### 3.3.3.4 Augmentation de la masse des bactéries de la biosphère profonde (au-delà de 2 m)

La vie a colonisé les différents compartiments de la Terre dans des environnements parfois « extrêmes » considérés souvent comme des milieux hostiles à toute forme de vie. Elle s'est notamment installée en profondeur dans le sous-sol (jusqu'à plusieurs kilomètres) dans les milieux océaniques, mais aussi terrestres. Sur les continents, des micro-organismes ont été détectés dans le sous-sol jusqu'à de très grandes profondeurs (~5000 m). Seules les bactéries et archées peuvent coloniser les zones profondes (couches perméables formées de sédiments, de roches sédimentaires et aussi de roches ignées fissurées), organisées en colonies ou en biofilms au sein du système poreux ou à la surface des particules des sédiments ou des roches. Leur métabolisme, à de telles profondeurs, semble être très lent en raison de la limitation en éléments constitutifs du vivant (notamment N et P). Whitman *et al.* (1998) estiment qu'à l'échelle terrestre il existe 4 à  $6 \cdot 10^{30}$  cellules procaryotes dont 40 % seraient contenues dans les environnements de sub-surface. Cette biomasse profonde représente 350 à 550 GtC, soit l'équivalent de 60 à 100% de la biomasse végétale. Kallmeyer *et al.* (2012) révisent ces estimations à la baisse avec entre  $\sim 1$  et  $\sim 3 \cdot 10^{30}$  cellules, réduisant la biomasse marine sédimentaire profonde à 1.5–22 GtC par rapport aux 303 GtC de Whitman *et al.* (1998) ce qui doit diviser par 2 l'importance de la biomasse microbienne des 'sols' marins et continentaux par rapport à la biomasse végétale.

Il existe de nouvelles réflexions sur le potentiel de cette géo-biosphère à générer des applications industrielles ou environnementales, comme les traitements de polluants (dégradation, séquestration), l'exploitation des ressources minérales et énergétiques du sous-sol in situ (par ex. biolixiviation, *enhanced biological recovery*) mais également les procédés de chimie traditionnelle qui étaient jusqu'à présent réalisés en surface dans des réacteurs chauffés et sous pression (synthèse organique, fermentation).

Des bactéries chimio-autotrophes sont aptes à croître à partir d'une réduction directe du CO<sub>2</sub> sans recours à la chaîne photosynthétique. Elles tirent leur énergie par oxydation de certaines roches dont la ressource est considérable. Cette chimie fondée sur le soufre est dorénavant mise en jeu industriellement. Une unité industrielle en Ouganda (usine KCC) a permis de résorber très économiquement des résidus miniers historiques polluant les écosystèmes des Grands Lacs en produisant annuellement 5% du cobalt mondial. Actuellement, la technique de lixiviation bactérienne se développe au Chili pour le traitement d'un milliard de tonnes de minerais. Cette technique, comparativement aux procédés hydro-métallurgiques plus classiques, se réalise dans un réacteur susceptible de cultiver une biomasse d'environ 500 000 tonnes de carbone renouvelable en quelques semaines. Un tel puits de carbone tire son énergie de l'oxydation chimique du minerai par l'air atmosphérique dont il réduit le CO<sub>2</sub> pour constituer la matière organique vivante.

Parmi les verrous scientifiques, figurent la méconnaissance de l'importance exacte de la biosphère profonde et des capacités de reminéralisation des microorganismes profonds.

### 3.4 Capture du dioxyde de carbone par la biologie océanique

Le principe est d'augmenter le « rendement » des pompes naturelles de carbone qui transportent le carbone du réservoir de surface de l'océan vers l'océan profond. Ces pompes sont classées schématiquement en deux catégories : 1) La pompe physique ou pompe de solubilité, repose sur la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer et sur la circulation océanique qui entraîne les eaux de surface en profondeur. 2) La pompe biologique est fondée sur la transformation du CO<sub>2</sub> en carbone organique particulaire par les organismes photosynthétiques dans les eaux de surface et sur la sédimentation de ce matériel vers les couches profondes de l'océan, éventuellement jusqu'au sédiment.



La durée du stockage du carbone dans l'océan varie de l'année au millénaire, et dépend au premier ordre de la profondeur atteinte par les particules initialement formées en surface, avant qu'elles ne soient reminéralisées avec libération de CO<sub>2</sub>. Le carbone qui atteint les sédiments est stocké pour des durées beaucoup plus longues. Sa dégradation au cours du temps (et de l'enfouissement en profondeur) suit une loi en puissance, avec des âges de carbone organique allant de 200–300 ans à 10 m de profondeur jusqu'à plusieurs millions d'années à 100 m (Middleburg et Meysman, 2007).

Les manipulations de la pompe biologique de carbone partent de l'ancien paradigme que l'activité photosynthétique des microorganismes est contrôlée par un seul élément nutritif limitant autre que le carbone. L'ajout de cet élément limitant dans les eaux de surface peut donc, en principe, stimuler ces microorganismes photosynthétiques, puis augmenter le transfert de carbone organique en profondeur.

A la fin des années 1980, la découverte du rôle limitant du fer dans de très vastes régions océaniques (Océan Austral, Océan Pacifique Equatorial, Pacifique nord sub-arctique, baptisées zones *HNLC* pour *High Nutrient Low Chlorophyll*) a eu un large impact dans la communauté scientifique. Compte tenu de la très faible concentration en fer dans les océans actuels il est relativement facile d'envisager de multiplier artificiellement cette concentration par 10 ou 100, d'où les propositions de géo-ingénierie résumées sous la formule provocatrice de John Martin « *Give me a half tanker of iron, I will give you an ice age* ».

Parmi les très nombreuses recherches menées sur le rôle du fer dans le contrôle de la pompe biologique figurent les expériences de fertilisations artificielles. Ces expériences au nombre de douze ont toutes été conduites par des équipes de scientifiques qui ont fertilisé des surfaces de l'ordre de 100 à 1000 km<sup>2</sup>. Elles se sont toutes traduites par une augmentation de l'activité photosynthétique et une augmentation du flux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère vers l'océan dans la zone fertilisée. Cependant l'estimation de la quantité de carbone transportée en profondeur est techniquement difficile à réaliser et reste associée à une grande incertitude. Des études menées dans des régions naturellement fertilisées ont démontré que l'augmentation de l'exportation était mesurable mais là aussi de grandes incertitudes subsistent. L'extrapolation des observations faites dans ces deux types d'expériences à des manipulations de type géo-ingénierie reste très difficile et délicate.

L'impact de fertilisations océaniques de type géo-ingénierie sur la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique a été également étudiée au moyen de simulations numériques utilisant différents types de modèles, de scénarios de fertilisation, de scénarii d'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique à différentes échelles de temps. L'ensemble des résultats actuellement disponibles indique un effet sur la diminution du forçage radiatif de quelques dixièmes de Wm<sup>-2</sup>, soit environ un ordre de grandeur de moins que la diminution obtenue par les techniques de gestion du rayonnement solaire (Vaughan et Lenton, 2011).

En conclusion, si la fertilisation en fer de larges régions de l'océan est technologiquement faisable, l'efficacité (quantité de carbone soustrait à l'atmosphère) et la durée du stockage réalisé seront extrêmement difficiles à quantifier.

Par ailleurs la fertilisation à grande échelle pose également un grand nombre de questions non résolues sur les possibles effets secondaires. Ceux-ci peuvent être de différents types : (1) effets locaux affectant directement la zone fertilisée, comme par exemple la stimulation de la croissance de microalgues produisant des toxines (Trainer *et al.*, 2009), (2) effets « aval » : La production de grandes quantités de matière organique supplémentaire nécessitera pour sa dégradation la consommation d'oxygène, créant ainsi de vastes régions anoxiques (seule une très faible fraction du carbone organique entraîné en profondeur étant finalement enfoui dans les sédiments). Une fertilisation efficace des zones *HNLC* consommera également des quantités supplémentaires de sels nutritifs majeurs (nitrate, phosphate) qui ne seraient plus disponibles pour alimenter la production des autres régions. Ces deux effets secondaires pourraient impacter de manière importante le réseau trophique et donc les ressources marines dans des régions éloignées des zones fertilisées

(Matsumoto *et al.*, 2002 ; Sarmiento *et al.*, 2004). Il est également fortement probable que la fertilisation en fer induise des modifications profondes de la structure des écosystèmes HNLC eux-mêmes. Enfin, la fertilisation pourrait entraîner la stimulation de la production de N<sub>2</sub>O (Law, 2008) qui présente un pouvoir radiatif 250 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>.

A ces effets doivent être ajoutés ce que l'on peut appeler les effets inattendus, c'est-à-dire ceux qui ne peuvent être prédits du fait de notre connaissance incomplète de l'écosystème à manipuler, ainsi que du caractère non linéaire des interactions mises en jeu dans cet écosystème.

Malgré cet océan d'incertitudes (Buesseler *et al.*, 2008) une fertilisation « clandestine » de type géo-ingénierie a été réalisée dans le Pacifique nord au large du Canada. Lors de cette opération conduite par un Américain, Russ George, 10 000 km<sup>2</sup> ont été fertilisés. Ceci met évidence la facilité de la mise en œuvre de la phase de fertilisation ainsi que l'insuffisance du cadre légal.

Les enjeux scientifiques identifiés sont les suivants :

- mécanismes de transfert vers l'océan profond et les sédiments du carbone dans les systèmes 'HNLC' fertilisés et échelles de temps de la séquestration,
- conséquences d'une augmentation de la productivité marine sur les réseaux trophiques naturels,
- conséquences sur l'augmentation d'autres gaz à effet de serre (N<sub>2</sub>O) éventuellement liée à des modifications des communautés biologiques.

### 3.5 Permanence / Non-permanence des puits dans les méthodes types CDR

L'évaluation des méthodes de géo-ingénierie CDR doit considérer non seulement la capacité de stockage des différents réservoirs impliqués, mais aussi la durée de vie de ces puits artificiels. Ceux-ci dépendent en particulier de la forme de carbone (organique ou inorganique) et de son lieu de stockage (végétation, océan, sédiments, roches).

Les réservoirs géologiques stockent a priori le carbone pour des périodes très longues, alors que les réservoirs plus superficiels (océan de surface, biomasse continentale) ne le retiennent qu'un temps. A terme, ce carbone séquestré temporairement finira par revenir dans l'atmosphère (ou alors il limitera la quantité de carbone anthropique pouvant être absorbée par le réservoir de façon « naturelle »). On peut définir un « temps retard » qui correspond à l'intervalle de temps au bout duquel le carbone séquestré retourne à l'atmosphère, augmentant ainsi le forçage radiatif (Herzog *et al.*, 2003). Ce « temps retard » dépend de la durée de vie du carbone dans le réservoir considéré, et donc des caractéristiques de chacune des méthodes CDR.

Ce stockage temporaire n'est cependant pas sans intérêt (Dornburg et Marland 2008). Il peut permettre de « gagner du temps » en atténuant le changement climatique à court terme, et ainsi permettre de limiter, par exemple, les températures maximales atteintes.

Un autre facteur important pour apprécier l'efficacité des méthodes de séquestration de carbone (CDR) est lié à ce que l'on peut appeler « l'effet rebond ». Les puits de carbone naturels, océan et biosphère terrestre, absorbent aujourd'hui la moitié des émissions anthropiques de carbone. Et cette absorption dépend au premier ordre du taux de croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Si la mise en place à grande échelle de méthodes CDR permet de limiter l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, l'efficacité des puits naturels sera réduite – cette conséquence collatérale est l'effet « rebond ». Si la mise en place de méthodes CDR permet même de réduire la concentration de CO<sub>2</sub>, les puits naturels de carbone (océan et biosphère continentale) pourraient se transformer en sources de carbone pour l'atmosphère.

L'utilisation de modèles simples du cycle du carbone a montré que lorsque le carbone est éliminé de l'atmosphère et stocké de façon permanente, la diminution du CO<sub>2</sub> atmosphérique est inférieure de 50% à la quantité de carbone piégé (Kirschbaum, 2003).

Au final, pour revenir à des niveaux préindustriels de CO<sub>2</sub>, il faudrait stocker de façon permanente une quantité de carbone égale au total des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> avant la mise en place des méthodes CDR (Cao et Caldeira, 2010, Lenton et Vaughan, 2009). En d'autres termes, si l'objectif est de revenir et de maintenir le CO<sub>2</sub> atmosphérique à des niveaux préindustriels, il faut non seulement piéger le CO<sub>2</sub> anthropique actuellement dans l'atmosphère, mais aussi piéger une partie importante du CO<sub>2</sub> d'origine anthropique actuellement stocké dans les réservoirs de carbone des océans et de la biosphère continentale. Dans le pire des cas, si les rétroactions et non-linéarités naturelles du système Terre, telles que la fonte du permafrost, s'avèrent importantes, il pourrait être nécessaire de retirer de l'atmosphère plus de carbone que l'homme n'en a émis (MacDougall, 2013).

### 3.6 Méthane et chimie atmosphérique

Vitres autonettoyantes et peintures dépolluantes font maintenant partie de la vie courante, tout comme les purificateurs d'air qui permettent de diminuer les polluants chimiques (composés organiques volatils COV...) et biologiques. Ces nombreux revêtements et procédés font appel à la photocatalyse, c'est-à-dire à la catalyse activée par la lumière solaire ou artificielle. Les catalyseurs sont généralement des dérivés d'oxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) un produit abondant et bon marché qui dégrade les molécules organiques et les micro-organismes par oxydoréduction.

Ces photo-catalyseurs ont également des applications dans le domaine environnemental, par exemple pour diminuer la pollution citadine par les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) le long d'autoroutes urbaines embouteillées, afin d'améliorer la qualité de l'air. Certaines études en plein air montrent des réductions jusqu'à 20% de la teneur en NO<sub>x</sub> (Lasek, 2013). Bien que les COV et les NO<sub>x</sub> ne soient pas des gaz à effet de serre, ils sont des précurseurs d'ozone troposphérique (cause de décès et de maladies respiratoires comme l'asthme et gaz à effet de serre) et sont liés à la pollution particulaire (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) et à la chimie atmosphérique du méthane.

Des photo-catalyseurs ont été développés pour des applications industrielles de dépollution, par exemple l'élimination de dérivés organiques halogénés utilisés en blanchisserie. L'élimination « naturelle » de gaz polluants et de méthane dans l'atmosphère par le rayonnement UV solaire peut être lente. Des recherches récentes tendent à montrer que les poussières de l'atmosphère (Sassine, 2010) sont également le siège de nombreuses réactions catalytiques et photo-catalytiques.

De très nombreux essais en laboratoire démontrent la possibilité de transformer un certain nombre de gaz polluants (à fort pouvoir de réchauffement) dont le méthane (de Richter, 2011), en des gaz comme le CO<sub>2</sub> dont le pouvoir radiatif est nettement plus faible. De nombreux travaux sur la photocatalyse (de Richter, 2013) portent également sur la réduction du CO<sub>2</sub> en hydrocarbures (photosynthèse artificielle) mais les rendements sont encore assez faibles et nécessitent plus d'énergie.

Tout comme pour éliminer les NO<sub>x</sub> en milieu urbain, des recherches à plus grande échelle pourraient être intéressantes pour, par exemple, éliminer le méthane par photocatalyse. En effet, bien que présent dans l'atmosphère en moins grandes concentrations, le CH<sub>4</sub> est le deuxième gaz à effet de serre anthropique, après le CO<sub>2</sub>, son pouvoir radiatif étant 25 fois supérieur (PRG par unité de masse) et est également un précurseur de l'ozone troposphérique.

Le méthane présente également un danger encore très mal évalué dans la mesure où le pergélisol des hautes latitudes et les énormes quantités d'hydrates de méthane dans les sédiments marins sont

susceptibles de devenir vulnérables et de devenir des sources importantes de méthane au-delà d'un certain seuil de température (Lenton, 2012).

Des essais d'élimination photocatalytique du CH<sub>4</sub> ont été réalisés à des échelles plus grandes qu'au laboratoire, par exemple à l'intérieur de porcheries et au-dessus de fosse à purin en cours de compostage (Costa, 2012), avec des taux d'élimination avoisinant les 15% à des débits de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/h. Au laboratoire, des transformations de 100% ont été obtenues en vase clos, de même que 50% en flux continu à des débits de 0,5 m<sup>3</sup>/h (Liu, 2006). Cependant, les concentrations en CH<sub>4</sub> étaient plus élevées. On ignore pour l'instant s'il est possible d'oxyder photo-catalytiquement le CH<sub>4</sub> aux concentrations atmosphériques.

Des essais pourraient être initialement conduits au voisinage d'émetteurs connus avant dilution du méthane dans l'atmosphère. Les émetteurs possibles pourraient être des serres de séchage et/ou de compostage des boues des stations d'épuration (non prévues pour collecter le biométhane), d'anciennes décharges urbaines, les puits de ventilation des mines de charbon... A noter que la catalyse thermique est parfois utilisée pour éliminer le CH<sub>4</sub>, lorsqu'il n'est pas assez concentré pour une simple combustion.

Au niveau mondial, les surfaces déjà recouvertes de peintures ou de vitres autonettoyantes sont importantes. Si les photo-catalyseurs qui y sont incorporés étaient efficaces contre les gaz à effet de serre, cela pourrait avoir un impact non négligeable comme moyen supplémentaire de lutte contre le réchauffement climatique, sans en répandre dans l'atmosphère.

### 3.7 Co-bénéfices, climat en deuxième intention, et courts-circuits énergétiques

La géo-ingénierie de l'environnement désigne habituellement un ensemble de techniques ou pratiques, le plus souvent non opérationnelles, dont la première intention est de modifier l'environnement à grande échelle pour corriger ou améliorer l'existant. Il est apparu pendant les discussions des groupes de travail qu'il y avait des cas où la géo-ingénierie pouvait arriver en deuxième intention en bénéficiant à moindre coût de l'activité des secteurs de l'énergie, de l'eau ou de l'industrie ( voir paragraphe l'industrie page 30) .

Les cheminées solaires (Schlaich, 1995) qui forment une voie alternative de recherches en énergies renouvelables, sont naturellement associées à des perspectives de géo-ingénierie puisque l'on cherche à exploiter, sur une hauteur d'au moins 1 km, la force d'Archimède de grandes masses d'air généralement chauffées par le soleil. On peut aussi imaginer utiliser ces cheminées solaires pour favoriser la conversion de méthane en dioxyde de carbone à l'aide de catalyseurs fixés sous la membrane de la cheminée.

D'autres suggestions ont été faites pendant les ateliers, qui méritent d'être examinées plus en avant :

Une variante pourrait consister, au sommet de montagnes riveraines de l'Arctique, à projeter dans l'air (fluide moteur) de l'eau de mer hissée par contrepoids avec le mélange eau plus salée / glace qui résultera de cet échange thermique (Bonnelle et de Richter, 2010). L'ordre de grandeur du nombre de cheminées solaires à construire au sommet de ces montagnes pour produire, surtout en hiver, la quantité d'électricité renouvelable nécessaire au nord de l'Europe, est équivalent de ce qui serait par ailleurs nécessaire de produire pour avoir une action correctrice significative du réchauffement océanique sur un carré de 1000 km de côté.

Un autre exemple, le concept d'AVE, *Atmospheric Vortex Engine* (Michaud et Monrad, 2013) qui vise à copier le phénomène naturel des tornades ou ouragans. Il a, au départ, une finalité de production d'énergie, mais pourrait également être adapté à une action consistant à évacuer préventivement vers la haute atmosphère l'excès de chaleur des océans à l'équateur (là où la faible force de Coriolis ne permet pas la formation d'ouragans naturels), soit pour prévenir la formation de ces ouragans

après migration de ces eaux chaudes vers de plus hautes latitudes, soit dans un but plus ponctuel, comme par exemple une action visant à maintenir une hygrométrie suffisante au-dessus de l'Amazonie si l'évolution du climat risquait de la rendre plus sèche et donc inflammable.

Ces deux derniers exemples sont des représentants d'une troisième famille d'actions de géo-ingénierie, en plus de la réduction du rayonnement solaire arrivant sur la surface de la Terre, et de l'intervention dans le cycle du carbone. Ici, le point commun est de créer des raccourcis thermiques entre le lieu où l'énergie d'origine solaire est absorbée par le système climatique, et la haute atmosphère où cette énergie peut être évacuée vers l'espace par rayonnement infrarouge.

### 3.8 Géo-ingénierie territoriale

Parmi les techniques décrites ci-dessus, on peut différencier les techniques dont l'impact est clairement planétaire et dédié uniquement à un objectif de géo-ingénierie (miroirs dans l'espace, aérosols soufrés dans l'atmosphère...) des techniques dont l'impact est local mais qui peuvent être réalisées sur de larges territoires et/ou qui peuvent avoir d'autres objectifs que la seule géo-ingénierie. On voit ainsi apparaître **la possibilité d'actions locales ou territoriales**<sup>4</sup> qui, si elles sont mises en œuvre de manière systématique et maîtrisée, pourraient avoir, en plus d'un effet local, un effet plus régional voire planétaire sur le climat.

#### Quel territoire pour la géo-ingénierie ?

Il faut élargir la notion de territoire au-delà du territoire physique (région). Avec l'avènement des technologies de l'information et des communications, on pourra parler de « territoire » socioculturel (l'ensemble des personnes concernées par une même culture), ou sectoriel (l'ensemble des gens qui travaillent dans le même secteur). Et le mouvement collectif de ces communautés peut avoir des impacts importants car il peut rapidement prendre une ampleur très large avec un effet boule de neige. C'est pourquoi on pourrait envisager d'utiliser cette dynamique collective pour la géo-ingénierie territoriale.

Nous illustrons ci-dessous des actions possibles de géo-ingénierie territoriales à travers les quatre secteurs que sont l'agriculture, la forêt, la ville, et l'industrie.

#### L'AGRICULTURE

L'agriculture peut devenir un outil ou une technique de géo-ingénierie si elle cherche à corriger certains problèmes environnementaux existants. Les pratiques agricoles ont en effet le potentiel de modifier la réflectivité des sols (par le choix des cultures, la mise en jachères, les techniques de labours), la vitesse du vent au sol (par le maintien de bocages et de haies), la température de surface, la couverture nuageuse ou encore les précipitations à l'échelle régionale (en particulier via l'irrigation). Ces pratiques peuvent aussi avoir un impact sur les stocks de carbone et la biodiversité, mais les conséquences en termes de bilan de GES et de climat local ne sont pour l'instant que très partiellement abordés par la recherche. On peut aussi chercher à diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O par les sols ou celles de CH<sub>4</sub> par les ruminants en agissant sur les pratiques, les micro-organismes du sol ou l'alimentation du bétail. La dimension climatique des pratiques agricoles forme donc une piste de recherche intéressante.

<sup>4</sup> On distingue ici le **local**, qui se réfère essentiellement à l'échelle spatiale, du **territorial**, notion qui renvoie à une unité géopolitique (ville, région ou pays) ou autre (cf. encadré).

## LA FORET

La forêt est source de services écosystémiques (gestion de la ressource en eau, maintien de la biodiversité, régénération des sols, ou encore protection des cultures dans le cas de l'agroforesterie). Cependant, les forêts jouent un rôle important dans le cycle global du carbone et les activités forestières pourraient contribuer à gérer les puits de CO<sub>2</sub> de manière plus active. Les actions massives de reforestation peuvent en effet être considérées comme une forme de géo-ingénierie à condition que le stockage du carbone et la gestion des nutriments soient durables. Une variante consisterait à utiliser la biomasse de la forêt ou des cultures énergétiques comme source d'énergie et de capturer le CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion pour le stocker dans des réservoirs en sous-sol. Cette technique est déjà envisagée dans certains scénarios climatiques ambitieux développés par le GIEC<sup>5</sup>. Cette variante correspond à des éléments maîtrisés individuellement mais les incertitudes sur le rendement réel de la technique et les risques associés restent grandes.

## LA VILLE

La ville est un système complexe qui concentre une part croissante de la population humaine et de la consommation d'énergie. Cela se traduit par une augmentation significative de la température au sein des zones urbaines par rapport aux espaces ruraux, un effet connu sous le nom d'îlot de chaleur. Des actions sont aujourd'hui envisagées comme la modification de l'albédo des toitures ou la multiplication d'espaces verts au sein des villes. En Île-de-France, 10 millions de personnes ont un balcon, une terrasse, un toit ou un petit jardin, qui pourraient être utilisés pour modifier les flux d'énergie (réflexion de l'ensoleillement, diminution des températures par vaporisation d'eau) ou tenter de dépolluer l'atmosphère par exemple par photo catalyse. Il est donc légitime d'examiner dans quelle mesure des actions concertées dans les environnements urbains pourraient influencer de manière positive le climat local et la qualité de vie.

## L'INDUSTRIE

En dehors des réductions potentielles des émissions de CO<sub>2</sub> (qui relèvent de l'atténuation), l'industrie offre des opportunités de géo-ingénierie, souvent en deuxième intention. Il est en effet possible de bénéficier à moindre coût de certaines activités existantes dans les secteurs de l'énergie, de l'eau ou de l'extraction de minerais. On peut citer quelques pistes qui pourraient se transformer en objet d'études :

- Les éoliennes, si elles sont présentes en grande densité, peuvent modifier la structure de l'atmosphère et modifier la température de surface ou la nébulosité. Un optimum combinant la production d'énergie renouvelable et un bénéfice climatique local pourrait donc être recherché.
- Le projet de dissociation de carbonates sous rayonnement solaire concentré peut bénéficier des recherches sur la production d'électricité ou de réducteurs chimiques au sommet d'une tour entourée d'un champ d'héliostats, ou *a contrario* faire bénéficier ce secteur de sa propre dynamique de développement.
- L'attaque acide de roches basiques pourrait être co-développée avec certaines technologies de dessalement d'eau de mer qui, au prix d'une dépense énergétique supplémentaire, sépareraient non seulement le sel de l'eau mais aussi les ions Cl<sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> pour produire de l'acide chlorhydrique et de la soude, cette dernière pouvant facilement capter du CO<sub>2</sub>.

---

<sup>5</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

On note au passage que ces développements pourraient bénéficier à l'économie des énergies renouvelables, en permettant, entre autres, une utilisation de l'énergie excédentaire lors des pics de production de ces énergies.

En conclusion, la géo-ingénierie territoriale telle que nous venons de l'ébaucher pourrait représenter une géo-ingénierie plus « douce » que les techniques extensives de géo-ingénierie globale, avec la possibilité de mettre en œuvre les actions de manière progressive et synergétique. Elle doit néanmoins s'accompagner d'une réflexion systémique et d'une analyse approfondie des bilans et des impacts des différentes actions.

La ressource en eau peut ainsi être un facteur limitant majeur pour certaines de ces actions. Il est de notoriété publique que la disponibilité de l'eau en quantité et en qualité est d'ores et déjà un enjeu majeur du développement, tant des pays "avancés" que des pays "en développement". La littérature nationale et internationale est abondante sur le sujet, tout comme les prospectives, les alertes, les travaux des "think-tanks", etc. avec des stratégies économiques et politiques déjà mises en œuvre pour en sécuriser l'accès à différentes catégories d'acteurs (états, secteurs, filières, voire entreprises privées). L'eau est une ressource stratégique pour nombre d'états, qu'ils en soient bien pourvus ou non, et en projection dans les zones d'intérêt économique pour eux.

Par conséquent, on peut s'attendre à ce que la gestion de l'eau interagisse avec la plupart des projets de géo-ingénierie territoriale. Ainsi, un projet qui modifiera la quantité d'eau dans un compartiment donné (nappe, rivière, lac, zone humide, neige, glaciers), dans sa cyclicité (périodes d'étiage ou de hautes eaux, flux nocturnes et diurnes, temps de séjour), dans ses échanges (transferts géographiques ou d'une ressource à une autre, recharge, stockage), dans sa continuité ou sa qualité (température, présence et concentration de polluants majeurs ou trace, salinité, charge sédimentaire...) va inmanquablement exercer une pression sur les usages actuels, et par conséquent se heurter aux conditions socio-économiques de sa répartition.

Les ouvrages de stockage d'eau ont des impacts sur les continuités biologique et sédimentaire des rivières, sur la qualité de l'eau (turbidité, température, concentration des polluants), sur les régimes hydrologiques (écrêtement des hautes eaux, cycle journalier, étiages, échanges avec les nappes).

En tout cas, cela va interroger la priorisation de l'accès à la ressource, que ce soit en compromettant un usage à haute valeur ajoutée ou en ouvrant des opportunités. Il convient de s'interroger sur les co-bénéfices hydrologiques des projets ainsi qu'à leurs dommages potentiels. L'optimisation intersectorielle est à ce prix, d'un point de vue démultiplicateur des bénéfiques, comme, plus prosaïquement, d'un point de vue de l'acceptabilité sociale d'une mesure, de son intérêt économique global, et tout simplement de sa réussite.

Il est probable que les interactions projets – sphère eau soient plus aisément discernables et envisageables aux échelles régionales qu'à celle du système Terre. Ceci est illustré par quelques exemples de projets de géo-ingénierie, d'échelle spatiale significative, aux conséquences imprévues ou d'importance sociétale. Ces projets n'ont pas nécessairement été envisagés aux fins d'atténuer le changement climatique, mais ils traduisent l'influence d'un projet d'un secteur sur l'autre, et d'un compartiment à l'autre.

On peut identifier dans le passé des actions locales ayant entraîné des modifications importantes des équilibres sur de très grandes surfaces : on peut ainsi citer les grands barrages comme celui d'Assouan en Egypte, le perçage de grands canaux, l'assèchement à grande échelle des marais ou des politiques agricoles comme la révolution verte en Inde. Ces exemples passés peuvent nous renseigner sur les bénéfiques et les problèmes induits par de tels changements.

## 4. Aspects sociétaux

### 4.1 Les risques

#### 4.1.1 Classification des risques

La terminologie relative au risque, à la gestion du risque, à l'incertitude est utilisée avec des sens variés dans les communautés intéressées par l'Atelier de Réflexion Prospective. Cette variété est irréductible dans le cadre d'un domaine de recherche large et interdisciplinaire comme la géo-ingénierie de l'environnement. Plusieurs acceptions du mot « risque » étant possibles, il est prudent d'utiliser ce terme à bon escient (ISO Guide 73, 2009 pour les risques dans la conduite de projet, lignes directrices sur le traitement de l'incertitude du GIEC, etc.). Prendre un parti disciplinaire pourrait conduire à sous-entendre ce qui n'est implicite que pour une partie des lecteurs, et conduire l'autre partie à l'incompréhension, voire au rejet. On peut penser, par exemple, à la distinction risque/incertitude « bien connue » surtout des économistes, ou alors à l'idée que la gestion du risque est un métier qui doit traiter autant la maximisation des opportunités de gain que la minimisation des possibilités de perte. La rigueur s'impose dans le choix des définitions, un certain nombre d'erreurs étant fréquemment propagées.

#### LES APPROCHES D'INGENIEUR

Le risque est traditionnellement formalisé à partir de trois concepts : le facteur de risque (péril, danger, risque d'accident), la criticité et la vulnérabilité. Le facteur de risque est qualifié par domaine humain, culturel, technique... Connaître les facteurs de risque, par exemple, par une analyse préliminaire, c'est déjà identifier des causes. La criticité est la combinaison de l'impact et de la probabilité d'un risque (définition AFNOR). Elle est liée à l'intensité de l'accident (ou gravité, ou sévérité) lorsqu'il se produit. L'accident est le risque réalisé. La criticité est souvent évaluée sur une échelle de 1 à 4 mais il existe également des échelles de 1 à 3 ou 1 à 5. La vulnérabilité se caractérise par la sensibilité à des pertes potentiellement induites par la réalisation d'un événement aléatoire. Définir et quantifier les pertes devient très compliqué pour des événements non prévisibles.

Le risque majeur est la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société. Il se caractérise par une faible fréquence et une très grande gravité. Les risques liés aux conflits sont apparentés, dans nos sociétés, à des risques majeurs. Dans ce sens plus large, le risque ne représente pas uniquement la somme des aléas (risques prévisibles). Il comprend également l'imprévu (risques imprévisibles).

La perception du risque reflète le point de vue d'une partie prenante concernant un risque. La perception d'un risque est colorée par des facteurs subjectifs propres à chaque individu et des facteurs culturels d'ordre collectif. Il existe déjà un certain nombre de référentiels officiels pertinents pour parler de géo-ingénierie de l'environnement. La loi française fournit en particulier des classifications du risque naturel et du risque technologique.

Le risque naturel est une menace découlant de phénomènes géologiques ou atmosphériques aléatoires : inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche... Le risque technologique est engendré par l'activité humaine, il résulte de la manipulation, de la production, du stockage, du conditionnement ou du transport d'un produit dangereux : risque industriel, nucléaire, rupture de barrage... Les deux risques sont cependant largement imbriqués l'un dans l'autre.



Dans de nombreux domaines d'ingénierie comme la construction ou l'urbanisme il existe des codes et règlements formels fixant, implicitement ou explicitement, des niveaux de risques acceptables. L'acceptation du risque conduit à une décision argumentée en faveur de la prise d'un risque particulier. Le risque est accepté ou non en fonction de l'évaluation de la situation.

## LES APPROCHES D'EXPERT

Le risque peut aussi être entendu comme étant la somme des aléas, l'aléa étant le produit de la probabilité de survenance d'un événement et de ses conséquences. Le terme « produit » est ici utilisé informellement, l'analyse des survenances n'ayant rien à voir avec l'analyse des conséquences. Dans cette approche, un risque est souvent exprimé en termes de combinaison des conséquences d'un événement et de sa vraisemblance (occurrence ou probabilité). Lorsqu'il est question d'un système naturel, il est très difficile de chiffrer la probabilité d'une cause d'un événement donné. Sur la question du changement climatique il existe des risques prévisibles et imprévisibles, quantifiables et non quantifiables. Il est recommandé d'attirer l'attention sur la nécessité d'explicitier ce qui est imprévu dans les risques dont on parle (à titre d'exemple, le rapport du GIEC a traité superficiellement la question du risque imprévisible lié à la montée des niveaux marins). Les définitions relatives au risque présentées précédemment sont applicables à des accidents, des chocs, des événements ponctuels. Or, le changement climatique est un phénomène continu, avec des impacts constants et permanents, sans, jusqu'à présent, d'évènement de rupture. On peut s'interroger sur la pertinence de l'emploi de ces définitions pour la géo-ingénierie. Il est conseillé de se focaliser davantage sur le risque lié à l'impact progressif avant qu'il ne soit réalisé.

Le terme de résilience est parfois compris de façon simpliste en supposant qu'on s'intéresse seulement à la capacité de retour vers l'état initial à l'identique. On précise qu'en écologie, la résilience concerne également l'aptitude à revenir à un état proche de l'état initial ou d'un nouvel état stationnaire. Par ailleurs, la notion de réversibilité est incompatible avec le changement climatique. La prégnance de la problématique climatique ne devrait pas écarter des débats d'autres sujets tels que le risque technologique (rupture de barrage, risque nucléaire...).

Bien qu'il ne soit pas normé ni complètement formalisé mathématiquement, un vocabulaire partagé dans la communauté nationale et internationale pose la Prudence, la Prévention et la Précaution comme trois principes fondamentaux pour la décision dans l'incertain, qui se distinguent ainsi. La prudence vise les risques avérés dont la fréquence d'occurrence peut être mesurée. La prévention vise les risques avérés dont la fréquence d'occurrence est difficile à évaluer. La précaution vise les risques potentiels dont ni l'ampleur ni la probabilité d'occurrence ne peuvent être calculées avec certitude, compte tenu des connaissances du moment.

En géo-ingénierie, **on ne peut être que dans le domaine de la précaution** car on ne sait pas si le danger existe réellement, compte tenu des connaissances limitées du moment. Appliquer le principe de précaution reviendrait, dans la plupart des cas, à écarter les mesures de géo-ingénierie considérées. Mettre en place de tels projets place donc la démarche du décideur hors du principe de précaution. Sauf à bouleverser nos pratiques sociales, une option opérationnelle de mise en œuvre d'une méthode de géo-ingénierie aura donc recours, comme toute pratique technologique, au principe de prudence (par opposition à celui de précaution) qui impose une quantification des risques par des démarches scientifiques prévisionnelles bornant alors leurs incertitudes en dangers et occurrences. On peut penser que la mise en œuvre de techniques mobilisant des systèmes de dimension planétaire, dont certains sont des réservoirs très ouverts de biodiversité évoluée, va se heurter à la grande difficulté d'établir une prudence quantifiable. À ce jour, la gestion de la biodiversité relève encore principalement d'une démarche de précaution. Elle est essentiellement instruite de scénarii et d'indicateurs associés, dont la modélisation en prévisions opérationnelles risque de faire défaut en termes de prudence. Les résultats des études sur les éventuelles conséquences et les risques de la géo-ingénierie sont encore hypothétiques du fait de l'absence

d'expérimentation et de tests à grande échelle. La probabilité des risques est donc fondée sur des expériences et sur un raisonnement logique.

#### 4.1.2 Les risques liés à la recherche en géo-ingénierie de l'environnement

On distinguera ici trois niveaux de problématiques concernant les notions de risques au regard de la R&D en « géo-ingénierie environnementale » : le politique induit par l'affichage d'une telle programmation de recherches ; le scientifique par la mauvaise maîtrise des démarches de recherche dans ce domaine ; le sociotechnique par le développement de filières qui, sur le fond, sont dangereuses ou durablement déraisonnables.

##### RISQUE POLITIQUE

La conférence sur l'ingénierie climatique planétaire, tenue le 25 juin 2013 à l'Académie des Sciences, a fait apparaître que même pour un sujet perçu comme moins fantasmagorique, c'est-à-dire le stockage du CO<sub>2</sub>, il n'existe pas d'acceptabilité sociale en France. Il a été dit en conclusion que la communauté scientifique n'avait le choix que de s'y mettre, ne serait-ce que pour éclairer les décideurs sur les risques liés à la géo-ingénierie.

À cette date en France, très peu de travaux scientifiques ont été menés sur la géo-ingénierie climatique. Seules quelques solutions toutes faites sont proposées. L'importance pour la communauté scientifique française de se positionner est renforcée par la perspective des prochaines négociations climatiques internationales, plus précisément la Conférence des Parties 21 qui se tiendra à Paris en 2015. En l'absence de position claire sur le sujet, elle risque de se voir imposer certaines décisions politiques. L'avènement d'une expertise sur la géo-ingénierie en France aussi forte que dans les autres grands pays de la Convention Climat reste donc à nourrir. La construction d'une communauté d'experts est toujours un processus délicat et sur la durée. La géo-ingénierie est un domaine de recherche dans lequel le travail de la communauté scientifique pourrait être influencé par des intérêts financiers, pour ne pas dire instrumentalisés par les politiques. Il paraît fondamental de trouver des solutions déconnectées des filières émettrices et d'ouvrir la recherche à de nouvelles sources de financement.

Néanmoins, engager un programme de R&D en géo-ingénierie environnementale n'est pas qu'une décision de gestion de la recherche car elle peut avoir des retombées politiques. L'un des premiers risques avancés pour ne pas engager une telle initiative est qu'elle puisse être perçue comme une validation a priori de concepts dangereux, déraisonnables ou irrecevables pour et par les populations. Mais à l'inverse, une jachère programmatique pourrait laisser libre-cours à des intentions ou tentatives d'innovations sporadiques mal contrôlées par une contre-expertise peu construite.

La recherche d'une position nuancée doit être particulièrement réfléchie au regard d'un certain nombre de questions auxquelles une recherche plus approfondie, notamment en sciences sociales, pourrait contribuer à répondre aux questions suivantes : au travers de quelles recherches et au profit de quelle autorité une expertise scientifique mérite-t-elle d'être instruite ? Comment concilier recherche publique et innovation technologique à visée applicative ? Comment donner une dimension de recherche participative à des émergences techniques complexes ? Au vu de la large définition de la géo-ingénierie, comment éviter l'amalgame par des jugements trop globalisateurs ; comment construire sereinement un cercle d'analyses techniques discriminantes indispensables à la recherche par ailleurs demandeuse de soutien médiatique ? Comment se prémunir du risque moral d'un discours plus ou moins prometteur de voies technologiques hasardeuses susceptibles, à la fois, de détériorer les efforts de mobilisation sur des politiques plus « durables » sur le moyen terme, et de concurrencer ou discréditer le développement de technologies ou pratiques d'adaptation au changement global plus légitimes ?

La discussion des risques autour de la construction d'une expertise renvoie finalement aux questions de gouvernance (cf. section 4.2). Quelles limites politiques de gouvernance de la recherche doit-on imposer alors au terme de «géo-ingénierie» (dimension des systèmes planétaires concernés en visée ou en mobilisation: systèmes dispersés, reproductibles, suprarégionaux, internationaux, globaux...) et «environnementale» (climat, biodiversité, écosystèmes, hydro-systèmes, polluants persistants, désertification, acidification, imperméabilisation des sols, ...) ?

## RISQUE ET CONDUITE DE LA RECHERCHE

Pour la recherche scientifique autour de la géo-ingénierie de l'environnement, il convient de dissocier deux volets: les risques dans la recherche et la recherche sur les risques.

**Les risques dans la recherche.** – La recherche en géo-ingénierie environnementale s'attaque par définition à de grandes échelles spatio-temporelles peu accessibles à l'expérimentation scientifique. Il s'agirait de manipuler des milieux de dimension planétaire, des systèmes ouverts et/ou extensifs avec des mécanismes d'intégration complexes ou de proposer des innovations technologiques incongrues au regard des processus ou cinétiques naturels ou d'incrémentations anthropiques souvent moins radicale. Donc dès lors que la recherche devient expérimentale, les questions du confinement et de la réversibilité se posent. La stochastique, la modélisation et l'analogie seront fortement sollicitées dans un premier temps. Mais la décantation des approches très systémiques ne sera toutefois favorable qu'aux voies susceptibles d'une démonstration expérimentale fiable tant dans son déroulé que dans ses conclusions. Des innovations abordables par touches incrémentales pourront peut-être mieux se positionner que des systèmes trop radicaux comme ceux déjà souvent avancés sans scrupule et mis en tête au risque de développer des *a priori* globalisants sans imaginer de géo-ingénierie nouvelle.

**La recherche sur les risques en géo-ingénierie.** – Le traitement du sujet est crucial mais il relève, lui aussi, d'une approche systémique et pluridisciplinaire. A titre d'exemple, les principes d'Oxford (voir encadré) prévoient la participation du public dans les processus de décision, mais est-ce praticable dans une démocratie mondiale ? Comment adapter la nature et la quantité d'informations en fonction du niveau stratégique de la décision ? Quelles sont les leçons à tirer de la communication sur le changement climatique, et sont-elles transposables à la communication sur la géo-ingénierie ? Comme autre exemple, on pourrait penser que l'approche des risques soit l'un des points importants de la réflexion déontologique sur un tel sujet de recherche. Outre les différents principes susceptibles d'être préconisés pour l'encadrement d'un programme public de recherche, on pourrait alors imaginer de le consolider par une structure de comités à vocations stratégique, scientifique (et technologique) et déontologique. Il s'agirait de ne pas s'en tenir à un comité stratégique arbitrant les propositions d'un comité scientifique (et technologique) mais bien de décharger ce dernier par l'avis d'un comité éthique s'exprimant plus spécifiquement sur la déontologie et la prise en compte des risques. L'exercice peut être poursuivi pour également introduire une dimension «recherche participative» dans la programmation.

Si chaque projet de recherche doit être soumis à un préalable d'appréciation des risques, on pourrait imaginer aussi un sous-programme spécifiquement dédié aux risques de la géo-ingénierie. Cette dernière approche, bien que stigmatisant l'ensemble de la recherche, pourrait intéresser l'autorité politique en quête d'une expertise de dédouanement précautionneux à bon compte.

Toutefois sur des sujets complexes et sensibles, les experts de l'atelier soulignent le risque d'ériger trop rapidement le chercheur en expert pluriel, voire en consultant qui animerait des interdisciplinarités en s'en remettant trop rapidement à leur intégration superficielle.

### 4.1.3 Risques de la mise en œuvre de la géo-ingénierie

On peut proposer une approche centrée sur les grands compartiments. Cette « approche milieux » constate que les risques ne sont pas les mêmes pour le sous-sol qui est un système confiné et l'océan qui est un système ouvert. Cependant, même cette notion est discutable, un système fermé pouvant néanmoins causer des accidents (par ex. risque de séisme induit par des injections de gaz dans le sous-sol).

Certains risques liés à la géo-ingénierie sont connus et sont rappelés dans les fiches de la section 2. On peut citer quelques exemples dans les différents compartiments terrestres. La **pulvérisation d'eau de mer dans l'atmosphère** a pour but d'augmenter l'albédo océanique des basses couches mais la taille des aérosols n'est pas bien contrôlable et les effets pourraient être variables. L'**injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère** vise à limiter physiquement par des particules la quantité d'énergie solaire absorbée par le système climatique. Cette injection modifie la couche d'ozone et les précipitations régionales. Elle pourrait aussi réduire le rendement photosynthétique. Le **fertilisation des océans** par introduction de macronutriments ou de fer vise à stimuler l'activité du phytoplancton et donc l'absorption de CO<sub>2</sub>. L'impact peut rester très local et incertain. Des toxines peuvent être produites. La chaîne trophique peut être perturbée ailleurs par surconsommation locale de certains nutriments. L'oxygène profond est surconsommé et la production de N<sub>2</sub>O peut être stimulée, etc. Le **stimulation de la production de biomasse** vise à favoriser l'absorption de CO<sub>2</sub> par la biosphère continentale en plantant massivement des arbres. Cette méthode n'a pas un effet certain sur la température : la transpiration augmente, mais l'albédo diminue. La production de biomasse nécessite de très grandes quantités d'eau et de nutriments; ce qui pour certains territoires peut accroître significativement la pression sur ces ressources. Elle peut entrer en compétition pour l'usage des sols et avoir ainsi des répercussions sur la sécurité alimentaire. Enfin la durabilité du système peut être compromise par les incendies et les ravageurs. Le **stockage géologique de CO<sub>2</sub>** en aquifères salins ou en strates charbonnées consiste à soustraire ce gaz à effet de serre du compartiment atmosphérique, sous réserve qu'il reste confiné en profondeur. Les risques peuvent être liés à la présence de failles initiales ou induites et à l'intégrité des puits. Il faut que le réservoir ait les capacités hydrodynamiques adaptées pour accueillir un volume suffisant et ne pas entraîner de problèmes géo-mécaniques en surface.

Des difficultés sont aussi à prévoir dans la gestion du suivi des sites sur le long-terme. Ces quelques exemples « populaires » illustrent des risques d'échec, des effets de bord ou collatéraux, avec une prévisibilité souvent lacunaire, voire des risques d'effets inattendus peu contraints. Les experts de l'atelier recommandent l'analyse des risques avec les méthodes existantes et encouragent aussi le développement de méthodes spécifiques non traitées dans la littérature. L'approche « analogues naturels » est jugée importante de même que les retours d'expérience aussi bien sur les méthodes de géo-ingénierie existantes que sur les méthodes qui permettraient des retours d'expérience dynamiques (voir section 4.2). D'une manière générale, il est nécessaire que l'analyse de chacune des méthodes de géo-ingénierie soit renseignée sur les modalités d'application, e.g. ponctuelle ou diffuse dans l'espace et le temps ; les effets et impacts spatiaux, i.e. homogènes ou hétérogènes, à court ou long termes et du degré d'incertitude ; les risques de compétition ou non avec des ressources limitées. Cependant les échelles spatio-temporelles interagissent entre elles, la géo-ingénierie locale pouvant avoir un impact global et réciproquement.

*- Impacts directs de la géo-ingénierie sur l'environnement local.* – Avant d'avoir un impact global, la géo-ingénierie a un impact local immédiat sur le milieu où elle est appliquée. Les effets peuvent ensuite se propager et atteindre les différents compartiments de la biosphère.

*- Impacts prévisibles et imprévisibles de la géo-ingénierie sur le changement global.* – Le refroidissement recherché peut être accompagné d'impacts non-prévisibles, d'effets externes et d'effets collatéraux. Ils peuvent se traduire par la modification des précipitations, la dégradation des écosystèmes, déclencher des phénomènes climatiques extrêmes ayant des répercussions

sociales, démographiques et économiques. La complexité du système climatique et les incertitudes rendent difficiles toutes prévisions de ces impacts.

- **Conséquences éventuelles de la mise en œuvre de la géo-ingénierie.** – Les activités préparatoires et la mise en œuvre de la géo-ingénierie peuvent absorber des ressources financières et naturelles, augmenter la compétition avec des ressources déjà limitées (par exemple, la biomasse énergie interagit avec la demande alimentaire). La définition, la mesure, la prévision de ces impacts en termes de coûts et d'opportunités sont difficiles.

Le recours à des processus de grandes échelles exacerbe la notion de risque du fait de l'ampleur et de la complexité des systèmes à considérer. À cet égard, le déploiement de la géo-ingénierie pourrait augmenter et rendre encore plus complexe la part d'imprévu du changement climatique. Les modèles climatiques qui ne prennent pas en compte la mise en œuvre de la géo-ingénierie ne seraient alors plus valides.

Il est toutefois à remarquer que dans la relation au « naturel », la complexité « domestiquée » peut jouir d'une image positive. Il y a des exemples domestiques comme les filières « bio » ou le « tout biodégradable ». Il y a aussi des exemples industriels, comme les systèmes épuratoires extensifs avec le recours aux dilutions et transformations en milieux « naturels résilients ». Il y a enfin des exemples réglementaires, comme la gestion environnementale par seuils, l'écotoxicologie et la globalisation européenne de REACH comparant, dans l'environnement, concentrations prévisibles et concentrations admissibles. En conséquence, si certaines solutions techniques de géo-ingénieries relèvent d'un discours de rupture radicale, d'autres pourraient avoir un positionnement de « retour à des pratiques assimilables à certaines supposées avoir déjà existé ».

La notion d'imprévu va, plus que jamais, handicaper les considérations de risques et il est fort probable qu'une exigence de réversibilité s'impose en préalable. On peut alors penser que les techniques traitant les effets au plus proche des causes anthropiques (limitation de la teneur en CO<sub>2</sub>, par exemple) proposeront de se confiner dans un système globalement voisin de l'existant et donc moins imprévu. La réversibilité recherchée est alors proche de celle d'un système décrit en état stationnaire « prévisible à entropie constante ». D'autres solutions plus externes de géo-ingénierie (injections d'intrants, dispositifs particuliers, implication d'un sous-système...) peuvent correspondre à des techniques de « rajout » moins intégrées dans les processus en place tout en modifiant le système initial. Au-delà de la réversibilité de leur propre mise en application, ces solutions auront donc à démontrer que l'entropie du système qu'elles auront complexifié n'est pas établie aux dépens d'une perte d'entropie du système initial alors dérégulé dans ses lois d'équilibres durables. Ces appréciations relèveront d'une gouvernance serrée des risques pour une hiérarchisation des voies potentielles.

Terminons enfin ici avec l'important volet des risques d'ordre humain, comme les technologies et pratiques trop exigeantes en maintenance, les technologies ou pratiques susceptibles de détournement des finalités environnementales, les technologies ou pratiques susceptibles d'iniquités, loin d'être seulement environnementales.

#### **4.1.4 Conclusions**

La question du risque en géo-ingénierie de l'environnement peut sembler inextricable. Pourtant, les risques font partie du quotidien des professionnels et des experts. Il existe des processus de gestion du risque sur lesquels s'appuie la prise de décision. Pour une aide à la décision performante, on applique une méthodologie qui comprend l'état des lieux des connaissances sur le risque, la constitution de groupes de travail et d'échanges diversifiés pour établir des ordres de grandeur cohérents, la définition d'une stratégie et d'un plan d'action. Les experts de l'atelier ne sont pas en mesure de produire des recommandations sur le traitement du risque dans un éventuel appel d'offre ANR, étant donné, en particulier que le format des appels d'offre futurs n'est pas connu à ce jour.

Toutefois, un certain nombre de choix critiques ont été identifiés :

1. Faut-il prévoir un volet risque pour chaque projet, pour chaque thème traité, voire consacrer un appel d'offre au risque ?
2. Doit-il y avoir une analyse préalable du risque dans la présentation du sujet pour orienter le choix, ou l'ANR doit-elle adopter une vision large *a priori*?
3. Comment impliquer le comité de sélection dans l'analyse des risques des projets ?

En conclusion, il apparaît que la géo-ingénierie est un domaine de questionnement intellectuel assez important pour être proposé comme thème de recherche à part entière et qu'un volet « risque » devrait être développé dans la conception de tout projet de géo-ingénierie ou de recherche sur la géo-ingénierie.

## 4.2 Nature et technique

D'un côté il ne nous appartient sans doute pas d'édicter des recommandations d'ordre éthique ou déontologique à l'ANR. De l'autre, « être autrement scientifique », selon la formule d'Alvan Feinstein, « c'est être rigoureusement scientifique, et admettre que la visée scientifique n'est pas détachable de la question : quel genre de monde voulons-nous pour nous-mêmes et nos descendants ? » (Fagot-Largeault).

Si les avancées techniques ont déjà largement transformé la planète, les techniques de géo-ingénierie présentent des caractéristiques particulières, en particulier d'échelle, qui posent des questions inédites. Que signifierait, après la transformation de l'humanité en force géologique, celle de la planète en *artefact* ? Ne faudrait-il pas imposer des limites à notre empire sur le monde ?

Que faire ? Telle est, en deux mots, la question éthique. Est-il bon, est-il mauvais d'entreprendre des recherches ou des actions en géo-ingénierie ? Cette question d'évaluation morale est à bien distinguer de l'acceptabilité sociale. Une technique peut être bien acceptée du public, voire banalisée, tout en étant moralement répréhensible.

La question éthique est particulièrement complexe dans le cas de la géo-ingénierie du fait du régime d'incertitude qui caractérise ces techniques. Comme dans les sciences du climat, on doit faire face à deux types d'incertitude : une incertitude épistémologique, due à un déficit de connaissance et qui peut être réduite, et une incertitude objective, due à la complexité des systèmes en jeu et irréductible par l'augmentation des connaissances. De là découle la nécessité d'arrimer la réflexion éthique sur des analyses épistémologiques préalables.

### 4.2.1 Approche épistémologique

Comme dans les sciences de l'environnement ou du climat, on cherche à mobiliser toutes les ressources possibles pour conjurer l'incertitude et tenter de faire preuve en considérant les observations, la modélisation et la simulation, les expérimentations... Le recours à l'expérimentation est toutefois très limité dans la recherche en géo-ingénierie du fait des échelles, à la fois spatiales et temporelles en jeu.

La géo-ingénierie (du climat) comme d'autres secteurs de recherche « technoscientifiques » (l'écologie industrielle, les nanotechnologies, ...) peut en partie compenser cette difficulté par l'étude d'analogues.

La recherche sur les analogues naturels (volcans, fertilisation naturelle des écosystèmes marins par le fer) ou artificiels (pollutions industrielles, accidents) permet en effet d'éclairer des phénomènes à grande échelle. Mais, **une grande prudence doit présider à l'utilisation d'analogues naturels**. Ces outils permettent de diminuer l'incertitude des modèles, d'imaginer des scénarios pour prévenir des accidents, de formuler des approches nouvelles, mais il faut se garder de l'affirmation : « si la nature l'a fait, alors on peut le faire... ». On ne peut en effet être sûr qu'on le fasse vraiment comme la nature et celle-ci ne saurait être invoquée comme licence morale.

La géo-ingénierie (du climat) comme d'autres secteurs de recherche « technoscientifiques » (l'écologie industrielle, les nanotechnologies) peut compenser cette difficulté par l'étude d'analogues. La recherche sur les analogues naturels (volcans, tsunamis, ...) ou artificiels (pollution, accidents, ...) permet en effet d'éclairer des phénomènes à grande échelle (voir encadrés). Mais quel degré de confiance peut-on accorder aux conclusions tirées d'un analogue naturel ?

Pour le déterminer il faut d'abord préciser ce qu'on peut aller chercher et ce qu'il est légitime d'attendre de l'observation des analogues :

- 1) des présomptions de causalité dans un contexte d'incertitude pour asseoir la robustesse d'un concept ou d'un modèle prédictif ? La validation d'un modèle conceptuel ou calculatoire ? Dans ce cas, l'analogue naturel est une ressource pour gérer (diminuer sensiblement ou contourner) les incertitudes.
- 2) des scénarios plausibles et utiles pour prévenir des accidents ou catastrophes? Un analogue naturel peut par exemple être objectivement incomplet, voire « faux », mais s'avérer utile dans l'appréhension d'un phénomène, surtout aux échelles systémiques ou encore fertiles dans la conception d'applications.
- 3) des hypothèses explicatives ? Comme une simulation informatique un analogue naturel peut susciter des hypothèses ou des approches nouvelles. Dans ce cas l'analogue a une fonction essentiellement heuristique.
- 4) des preuves ? On peut certes identifier des mécanismes fonctionnels (par exemple pour la baisse de la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère) mais pour administrer la preuve, il faut établir la robustesse des résultats.
- 5) une licence morale ? C'est le sens de l'affirmation : « si la nature l'a fait, alors on peut le faire... ». Mais est-on jamais sûr qu'on le fait vraiment comme la nature ?

Ces divers niveaux (présomptions, scénarios plausibles, hypothèses, preuves, valeurs) peuvent fournir une première grille d'analyse à appliquer aux analogues naturels convoqués par la géo-ingénierie pour éviter des usages intempestifs et encourager de bons usages des analogues naturels.

La géo-ingénierie interpelle aussi nos valeurs : pour beaucoup, la géo-ingénierie apparaît comme une transgression de nos limites, une démesure, une ivresse prométhéenne. Enfin, il ne peut y avoir de géo-ingénierie sans une vision à long terme : justifier la géo-ingénierie en évoquant le gain de temps qu'elle nous donne dans la lutte contre le changement climatique est moralement répréhensible dans la mesure où beaucoup de techniques de géo-ingénierie engagent les générations futures et certaines ne peuvent être arrêtées sans un effet boomerang. L'irréversibilité qui caractérise beaucoup de techniques de géo-ingénierie doit être soigneusement évaluée.

### 4.2.2 Problèmes éthiques

La géo-ingénierie exige une attention éthique particulière et ceci à un double titre même si le second résulte en partie du premier. Tout d'abord, l'effet d'échelle potentiel inédit, spatial et temporel, de la géo-ingénierie, requiert un travail préalable approfondi sur les conditions de son acceptabilité. Ensuite, un effort éthique d'une nouvelle dimension devra être développé dans la mesure où ce qui conditionne l'éthique traditionnelle des ingénieurs ne s'applique pas forcément. La responsabilité des ingénieurs repose sur le principe général que l'on comprend et contrôle ce que l'on a conçu et fabriqué. Or, la géo-ingénierie se déploie en régime d'incertitude et déclenche des processus naturels qu'on ne contrôle pas.

Pour entreprendre des recherches et des actions en géo-ingénierie plusieurs considérations sont à prendre en compte :

#### LES BONNES PRATIQUES

Comme dans tout autre domaine de la recherche et de l'ingénierie, il convient d'adopter un code de bonne conduite. Comme partout ailleurs, il importe de ne pas dissimuler des intérêts particuliers ou privés derrière l'intérêt général ou public.

Mais, plus spécifiquement les bonnes pratiques dans la recherche et l'action en géo-ingénierie interdisent de :

- fonder des décisions sur des modèles simplistes. Certes le réductionnisme est une méthode heuristique qui peut faire avancer la connaissance des problèmes. Le passage à l'action exige la prise en compte de la totalité des paramètres et de la complexité de leurs interactions.
- dissimuler ou minimiser des zones d'ignorance en s'appuyant sur quelques données fragmentaires pour inspirer confiance - ou se donner confiance. L'excès de confiance dans ce qu'on sait ou peut savoir est moralement répréhensible. Certes l'incomplétude du savoir n'est pas une raison de ne pas agir, et l'ignorance n'est pas fautive en soi. Mais, elle devient une faute quand elle est non avouée.

#### L'ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES DE L'ACTION

La responsabilité morale d'un chercheur ne repose pas uniquement sur ses intentions, elle engage aussi les conséquences de son action. D'une part, la *prudence* dans la gestion des risques requiert de prendre en compte plusieurs variables :

- l'échelle : bien distinguer les techniques et les impacts (local ou global),
- la durée : effet à court terme ou long terme,
- la réversibilité ou l'irréversibilité de la technique et des impacts,
- la distribution des impacts (régions perdantes et gagnantes) : que signifie perdre ou gagner en matière de climat ? quels critères définissent un climat optimal ?

D'autre part, toute action peut produire des effets non intentionnels, des *conséquences non voulues*. Le jugement moral qui sera porté dépend alors de l'issue heureuse ou malheureuse de l'action, laquelle n'est pas entièrement sous contrôle et dépend de nombreuses circonstances contingentes qui échappent à la maîtrise de celui qui l'engage. La responsabilité morale du scientifique comme de l'industriel s'étend dès lors à ce qui se produit à travers lui, indépendamment de ses intentions, à son insu et sur une longue durée.



## LES VALEURS SENSIBLES

Les recherches et actions en géo-ingénierie ne se déroulent pas dans un vide culturel mais dans des contextes saturés de cultures et religions diverses. Pour chacune, la nature a une signification et des valeurs différentes. Si la géo-ingénierie peut apparaître à certains comme la promesse de maintenir notre confort à peu de frais en « passant la bride à la nature », elle peut aussi être considérée comme une transgression de nos limites, une démesure, une ivresse prométhéenne, ou comme portant atteinte à l'autonomie de la nature fondatrice de sa valeur intrinsèque. Sur ce point, se pose la question du caractère approprié de notre intervention en première intention sur la biosphère à une échelle inédite, par-delà les conséquences (bonnes ou mauvaises) qui pourraient en résulter (par exemple la question de la conception de la planète comme artefact).

## LA RESPONSABILITE INTER-GENERATIONNELLE

Mener des recherches en vue d'actions possibles en géo-ingénierie avec une visée de court ou moyen terme est répréhensible. En effet il ne peut y avoir de géo-ingénierie sans vision à long terme.

- de ce point de vue, l'argument de la philosophie analytique anglo-saxonne qui défend la géo-ingénierie parce qu'elle permettrait de gagner du temps (« *buy time* ») peut sembler insuffisant comme justification morale ;
- c'est plutôt une vision à long terme qui doit s'imposer : si on commence certaines techniques de géo-ingénierie, on ne peut plus s'arrêter ; cela engage les générations à venir à les maintenir. D'autant plus qu'il peut y avoir des effets boomerang en cas d'arrêt, la situation climatique devenant pire que celle à laquelle on cherchait à remédier initialement.

En conclusion, une analyse de l'éthique de la géo-ingénierie pose les questions suivantes, dont certaines se rapportent aux questions de gouvernance discutées dans la section 4.3.

- 1) Question de discernement dans les orientations de politique scientifique : avant d'investir dans les recherches en géo-ingénierie a-t-on considéré les alternatives pour atteindre les mêmes objectifs ? Dans quelle mesure la géo-ingénierie ne décourage-t-elle pas les efforts d'atténuation ? A-t-on pesé les avantages et inconvénients de chaque option ?
- 2) Choix du référentiel pour évaluer la pertinence de géo-ingénierie : les acteurs qui sont contre la technique de gestion du rayonnement solaire peuvent préférer un référentiel absolu préindustriel afin de démontrer l'impossibilité de la géo-ingénierie à annuler tous les impacts du changement climatique, alors que les acteurs qui y sont moins opposés préfèrent évaluer les gains par rapport à une projection climatique future où les efforts d'atténuation auraient échoué.
- 3) Question de justice distributive (relative à la répartition équitable des coûts et des bénéfices) : peut-on par exemple justifier la géo-ingénierie dans la mesure où elle serait un moyen susceptible d'éviter un réchauffement critique pour les générations futures ? Quelle priorité devrait-on lui accorder au regard de l'atténuation et de l'adaptation ? Comment répartir les coûts, plus ou moins prévisibles, du déploiement de ce genre d'option ?
- 4) Question de justice procédurale (relative à la légitimité du processus de décision) : la *juste procédure*, c'est-à-dire la forme légitime des dispositifs de décision. Quels mécanismes (inter) nationaux faut-il prévoir afin de garantir la légitimité d'une décision de mise en œuvre d'un schéma de géo-ingénierie ? Qui devrait donner son consentement préalable avant de recourir à ce type d'approche radicale ? Faut-il admettre la possibilité de déploiements unilatéraux de telles techniques ? Si oui, dans quelles circonstances ?
- 5) Question de démocratie : a-t-on inclus les citoyens et parties prenantes dans les processus de décision ? pris en compte les divergences d'opinion ?

### **Analogues naturels et fertilisation de l'océan**

Dans le cadre de la fertilisation artificielle en fer de l'océan, les analogues naturels peuvent être évoqués à deux niveaux différents. Premièrement, l'idée elle-même repose sur un analogue naturel. Pendant les périodes glaciaires, la fertilisation massive de l'océan austral par des poussières désertiques aurait pour une part conduit aux faibles valeurs de CO<sub>2</sub> atmosphériques observées. Le mécanisme explicatif serait l'augmentation de l'efficacité de la pompe biologique de carbone suite à l'ajout de fer provenant des poussières. Deuxièmement, il existe dans l'océan austral actuel des régions naturellement fertilisées par le fer. La dimension des zones fertilisées (quelques centaines de milliers de km<sup>2</sup>) est pertinente dans le contexte de la géo-ingénierie car elles sont de taille similaire aux zones artificiellement fertilisées dans certaines expériences numériques. Du point de vue épistémologique (méthodes d'investigation (observations, expérimentation, modélisation), utilisation de référence (région non fertilisée), notion de preuve, estimation des incertitudes), l'étude de ces systèmes complexes, où tous les acteurs et processus ne sont pas connus, est très similaire à celle d'expériences grandeurs réelles de géo-ingénierie que l'on peut imaginer. Certaines conclusions établies dans ces « laboratoires » naturels sont directement transférables au cas artificiel. Par exemple, il a été démontré dans un environnement naturel que la vérification du puits de CO<sub>2</sub> créé artificiellement mobiliserait des moyens d'observation considérables qui doivent être pris en compte dans l'évaluation du coût de cette méthode. L'identification et la hiérarchisation des processus, leur paramétrisation, le jeu de données collecté dans les environnements naturels, sont autant d'éléments indispensables au développement et à la validation de modèles numériques robustes seuls capables d'adresser les effets de fertilisation sur des échelles de temps et d'espace plus larges. D'autres questions (quelle est l'efficacité de la fertilisation pour stocker du carbone ? quels sont les effets secondaires observables ?...) peuvent aussi être abordées dans les laboratoires naturels. Toutefois se pose ici une autre question : Quelles sont les limites de l'analogie ? Ceci impose de réfléchir au préalable aux outils (méthodologie et mode de raisonnement) qui vont permettre d'y répondre. Finalement s'intéresser à des analogues naturels dans un contexte de géo-ingénierie climatique amène aussi à réfléchir à la signification et à la portée d'affirmations couramment rencontrées telles que « imiter la nature est sans risque ».

### **Analogues naturels et injection d'aérosols stratosphériques**

L'observation de périodes de refroidissement après les grandes éruptions volcaniques, que ce soit sur la période récente ou dans les archives paléo-climatiques, laisse peu de doute sur le fait qu'une injection artificielle d'aérosols dans la stratosphère contribuerait aussi à refroidir le climat de la planète. Les instruments satellitaires ont permis de bien observer l'éruption du Pinatubo en 1991 mais aussi des éruptions plus petites qui ont eu lieu depuis. Ces observations sont largement utilisées pour évaluer et faire progresser les modèles globaux d'aérosols et de climat, préalable nécessaire à la modélisation des effets des méthodes de géo-ingénierie. Ces analogues naturels ont néanmoins leurs limites. Tout d'abord, les grosses éruptions volcaniques ne sont ni fréquentes ni permanentes, il est donc difficile d'observer avec certitude leurs effets moyens sur le climat à l'échelle régionale, compte tenu de la grande variabilité naturelle du système climatique. Certains effets régionaux « sortent du bruit », comme un effet de réchauffement des hivers au-dessus de l'Europe, alors que d'autres restent incertains, comme la modification des moussons. Par ailleurs, les éruptions volcaniques renseignent peu sur la validité des méthodes d'injection qui ont été proposées en géo-ingénierie. Une injection massive et instantanée d'un précurseur d'aérosol gazeux à plusieurs altitudes, comme c'est le cas pour les volcans, est assez différente d'une injection plus ou moins continue de particules d'aérosols à une altitude donnée. Il reste donc des incertitudes importantes sur l'amplitude du forçage radiatif qu'il serait effectivement possible d'atteindre avec une injection artificielle. Enfin l'analogie naturelle ne dit rien sur les effets d'une éruption volcanique majeure alors qu'une injection artificielle est en cours.

### 4.2.3 Anthropocène et géo-ingénierie

Le terme *Anthropocène* décrit une nouvelle ère ou époque géologique dans l'histoire de la Terre, caractérisée par une influence grandissante de l'homme sur l'environnement à l'échelle globale. Utilisée de plus en plus largement depuis 2000 par la communauté de chercheurs travaillant sur des changements environnementaux planétaires, le terme n'a toutefois jusqu'alors pas encore été reconnu officiellement par les géologues. Les opinions sur le début de l'Anthropocène divergent. Pour certains, l'Anthropocène commence tôt avec l'agriculture (la révolution néolithique), pour d'autres autour de 1800 avec l'arrivée de la machine à vapeur et l'industrialisation. Dans le premier cas, l'Anthropocène couvre une grande partie de l'Holocène (les derniers 12.000 ans, période chaude interglaciaire), dans le deuxième cas, l'Anthropocène serait une sous-époque de l'Holocène, voire même une toute nouvelle époque.

L'Anthropocène marque une situation nouvelle, où l'impact de l'homme sur l'environnement global commence à rivaliser les forces de la nature et à modifier le fonctionnement du système Terre. Selon Steffen *et al.* (2007, 2011), qui privilégient un Anthropocène commençant autour de 1800, on peut distinguer trois périodes : d'abord l'industrialisation avec l'usage croissant des combustibles fossiles depuis 1800, suivie en 1945 par ce que les auteurs appellent la « Grande Accélération » après la deuxième guerre mondiale, qui se manifeste à tous les niveaux (population, pollution, économie, urbanisation, mobilité, l'usage de ressources, etc.), suivie elle-même par la période après 2000, caractérisée par des changements encore plus importants avec une Grande Accélération maintenant à l'œuvre à l'échelle globale dans des pays émergents (Chine, Inde, Brésil, etc.). Finalement, le présent marque un tournant avec le changement climatique qui s'impose dans l'espace public, et a vu la mise en place des premières institutions globales pour gérer la relation entre l'homme et le système terre.

L'apparition du concept de l'Anthropocène va de pair avec l'émergence d'un intérêt renouvelé pour la géo-ingénierie. Ce lien se fait notamment dans la personne de Paul J. Crutzen, chimiste de l'atmosphère et Prix Nobel. Au cours des années 2000, Crutzen a proposé et propagé avec force le concept d'Anthropocène. S'appuyant essentiellement sur des chiffres comme la croissance de la population humaine, ainsi que l'exploitation *per capita* des ressources de la terre, Crutzen souligne la nécessité pour les scientifiques et ingénieurs de guider « l'humanité vers une gestion environnementale globale et durable au cours de l'Anthropocène » Dans ce contexte, Crutzen propose d'envisager des projets de géo-ingénierie de grande échelle comme « l'optimisation » du climat (Crutzen, 2002). En fait, Crutzen lui-même a fait quatre ans plus tard, en 2006, une proposition en ce sens, largement débattue parmi les scientifiques depuis. La solution de géo-ingénierie est présentée comme une solution de remplacement à l'atténuation du changement climatique, qui pourrait s'avérer trop tardive.

Quel est donc le rapport entre l'homme et la nature dans une telle conception de l'Anthropocène ? Si on parle d'optimisation du climat comme Crutzen, on ne laisse guère la place à la nature dans l'avenir. Dans l'Anthropocène de Crutzen, en effet, il n'y a plus ni de climat qui soit exclusivement naturel, ni même de nature. Il n'y a que ce que l'homme modifie ou a modifié et créé : le climat devient simplement le résultat de l'action humaine sur la Terre. L'Anthropocène marque, d'une certaine façon, la mort de la nature conçue comme distincte et/ou indépendante de l'homme. La *nature* est remplacée par l'*environnement*, c'est-à-dire ce dont l'homme s'entoure et souhaite s'entourer. Le concept d'Anthropocène lie donc irrémédiablement l'homme à la Terre, désigne l'homme comme le seul responsable de son avenir, et le pousse vers l'action scientifique et politique.

En se référant à une histoire, en s'inscrivant dans la tradition d'une intervention humaine dans la nature, engagée depuis plus que deux siècles, le concept d'Anthropocène contribue à 'normaliser' les interventions humaines sur le climat ouvrant ainsi le chemin à la géo-ingénierie, qui apparaît comme un remède aux excès de nos interventions antérieures sur la nature.

L'accélération généralisée de la transformation de la Terre, mesurée par toute une série de paramètres, exige également une accélération des mesures visant à freiner les évolutions néfastes et dangereuses pour l'espèce humaine. C'est cette accélération qui justifie la géo-ingénierie comme solution *ad hoc*. Le recours à la géo-ingénierie est donc présenté comme une conséquence quasi-automatique de l'histoire des hommes sur la Terre.

L'approche de Crutzen soulève néanmoins toute une série de questions :

- Le terme « Anthropocène » donne à penser que c'est l'espèce humaine entière qui est responsable des changements climatiques sans désigner les pays qui ont le plus contribué par leur mode de vie et de consommation à provoquer ces changements.
- L'usage du terme de système Terre par Crutzen peut sembler paradoxal. Il suppose qu'on peut vivre sur la terre et en même temps l'analyser en prenant distance. Mais est-il encore justifié de parler d'un système terre dans l'Anthropocène si c'est l'homme qui construit et transforme la terre en permanence ?
- Quels sont les paramètres pertinents (choisis par qui ?), qui doivent compter quand il s'agit de constater et de rendre compte d'une transformation profonde de la Terre ? Et pour qui ? Est-ce qu'une approche quantitative seule permet de saisir les véritables enjeux qui se posent pour l'avenir ?
- Est-ce que la Grande Accélération constatée par Crutzen justifie vraiment une (ré)action elle-même accélérée ? De ce point de vue, la juxtaposition de l'échelle géologique à celle de la durée d'une vie de chercheur est problématique.

Finalement, ne pourrait-on penser un Anthropocène différent de celui développé par Crutzen ?

A cette vision de l'homme seul maître de la nature, s'oppose la vision de nombreux experts des milieux naturels, qui plaident pour une solidarité écologique de l'homme avec les milieux dans lesquels il vit et une éthique de la biosphère. Comme le dit Patrick Blandin, « *au « je pense, donc je suis » de Descartes, proposition étriquée et égocentrique, Albert Schweitzer opposait une conviction fondatrice de ce qu'il appelait une éthique de la révérence pour la vie : « je suis vie qui veut vivre, entouré de vie qui veut vivre » ...*

On est là dans une conception beaucoup plus humble de l'homme face à la nature, un homme conscient du besoin vital qu'il a de maintenir à la Biosphère sa capacité d'évolution propre, et qui sait qu'il ne peut ni tout faire ni tout contrôler. Patrick Blandin appelle ainsi de ses vœux non pas un *Homo sapiens*, mais « *un Homo ethicus, voulant pour compagne une nature la plus diverse possible, afin d'exister longtemps dans une biosphère toujours bien vivante, donc toujours capable d'évoluer* »

Dans cette vision, si une géo-ingénierie « douce » ou territoriale peut être envisagée, il est clair que les techniques de géo-ingénierie « dure » ou extensive ne sont qu'une manifestation de plus de l'incapacité de l'homme à réaliser qu'il a une destinée commune avec la biosphère (dans laquelle il vit et sans laquelle il ne peut vivre).

En résumé, s'il ne fait aucun doute que l'activité humaine est devenue une force géophysique très significative qui a une action croissante sur la planète, le fait de continuer dans cette voie en mettant en œuvre des techniques ayant elles-mêmes un impact géophysique majeur s'oppose à une éthique de la vie sur la Terre que l'homme serait bien avisé de développer s'il veut pouvoir y vivre longtemps.

## 4.3 Gouvernance de la géo-ingénierie

### 4.3.1 Problèmes de la gouvernance

Le problème de la gouvernance de la géo-ingénierie se pose de manière assez abrupte et urgente dans la mesure où le sujet a fait irruption sur la scène publique et fait l'objet de controverses. Il requiert de plus une attention toute particulière liée à l'effet d'échelle globale, spatiale et temporelle, des projets que la géo-ingénierie se propose de mettre en œuvre. Et à cette échelle la géo-ingénierie touche les biens communs (atmosphère, océans, biodiversité), certains acteurs ont des positions très fortes et il y a déjà eu quelques essais contestés. Pour ces raisons et comme le suggère Gardiner (2013), le débat reste bien ouvert sur l'opportunité du recours à la géo-ingénierie, entre le risque d'un rejet prématuré de certains projets susceptible d'être déclenché par un moratoire (Bodansky, 2011) et la probabilité avancée d'une prohibition par la communauté internationale.

La géo-ingénierie se trouve en effet, dans un vide juridique quasi-total et ce, d'autant plus qu'elle reste mal définie. Cette absence de régulation, ne va pas sans préoccupations. Le recours aux cadres existants est un pis-aller très vacillant et il est légitime de se demander si un ou des textes spécifiques ne seraient pas nécessaires pour encadrer ou interdire les activités de recherche sur l'ingénierie climatique. La *Royal Society* britannique a conclu qu'un des grands défis qui se posait en la matière serait celui de la régulation. La conclusion de la *House of Commons* sur ce point a été qu'il était plus qu'improbable que l'on trouve un même cadre susceptible d'abriter ensemble, les différentes techniques de géo-ingénierie explorées et leurs degrés d'avancement (i.e. la recherche, l'expérimentation et le déploiement). Ici aussi, la conclusion a été de souligner un besoin d'approfondissement de la recherche en ce domaine.

Il existe bien quelques traités internationaux dont on peut se poser la question de savoir s'ils englobent ou pourraient englober la géo-ingénierie.

- La **Convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles (ou convention ENMOD)** rassemble 74 pays signataires depuis 1978. Mais l'ingénierie climatique ne rentre pas directement dans le cadre de cette convention puisque son but n'est pas hostile. La convention autorise d'ailleurs explicitement les recherches et les expériences sur la modification du temps.
- Les pays de l'**Organisation Maritime Internationale (OMI de 1972)** ont voté une interdiction de la fertilisation des océans (dans les eaux internationales) à l'exception de « recherches scientifiques « légitimes » et de « petite échelle » (IMO, 2008) dans le cadre du **Protocole de Londres** de 1996. Rien n'interdit cependant aux Etats de faire ce que bon leur semble à l'intérieur de leur périmètres maritime.
- Le **Convention sur la Diversité Biologique** est un autre traité international qui a été adopté lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 et qui vise à préserver la biodiversité. Sa conférence des parties a approuvé un texte interdisant le déploiement de techniques d'ingénierie climatique en 2010 (CBD, 2010). Toutefois, ce texte n'est pas contraignant, et autorise les expériences justifiées par les besoins de la recherche.
- La **Convention Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC de 1992)** énonce dans ses objectifs qu'elle vise à prévenir toute interférence anthropique dangereuse avec le climat (art 2). A priori, elle aurait vocation à couvrir le cadre de la géo-ingénierie. Cette approche suggérée par les uns (Lin 2009) est considérée avec le plus grand scepticisme par beaucoup d'autres, principalement pour des raisons politiques et de la faiblesse juridique de l'instrument (Bodansky 2011).

Au plan juridique aussi, la position, en l'état a ses faiblesses : l'article 4 (référence aux puits de carbone et aux émissions de gaz à effets de serre) et le protocole de Kyoto de 1996 viennent considérablement limiter le champ d'application du traité et son intérêt pour les techniques de géo-ingénierie dans la mesure où l'objectif des technologies en rapport avec la gestion du rayonnement solaire n'est ni d'augmenter les puits de carbone, ni de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Sous cet angle, la capture du CO<sub>2</sub> pourrait entrer dans le champ de la convention et les techniques de gestion du rayonnement de l'atmosphère (*Solar Radiation Management*) serait en dehors.

- Enfin la technique d'injection stratosphérique serait en contradiction avec le **Protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone**.

Ces embryons de règles posent la question de savoir si la gouvernance autour de la géo-ingénierie sera réactive (les gouvernements réglementant au fur et à mesure des scandales) ou anticipative (les gouvernements réglementant d'emblée). La doctrine est très divisée. Davies plaide pour une régulation stricte (Davies, 2011). Barrett (2006, 2009) considère que la régulation internationale est tout simplement impossible. D'autres, au contraire, en appellent à une intervention urgente de la gouvernance pour réguler, sous une forme ou une autre (Parson, Keith 2013), soit sur des points particuliers (par ex. sur l'expérimentation en milieux non confinés), soit sur l'éthique de la recherche en général, quitte à en passer par l'autorégulation (Asilomar 2010) puis les Principes d'Oxford (Rayner 2009, 2010). Ceci s'explique souvent par la volonté de ne pas définir de limites extérieures à la recherche. Si pendant de nombreuses années, la question de savoir si le domaine devait être réglementé n'a pas été ouvertement posée, c'est qu'elle était considérée, officiellement du moins, comme « tabou ». Fleming (2008) explique assez bien comment, au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la question a été largement laissée de côté dans son descriptif des grandes phases de la géo-ingénierie.

La question du choix des cadres de gouvernance pour la recherche sur la géo-ingénierie est souvent bien plus politique et économique que juridique. De fait, la question des stratégies en matière de positionnement des états au regard des accords internationaux, comme en matière d'économie, peut être considérée comme une variante de la théorie des jeux (Nash).

Toute législation d'encadrement de la recherche fait appel à des principes fondamentaux qui s'opposent souvent, sont compris et appliqués différemment d'un pays à l'autre et d'un texte de convention à un autre (par ex. le principe de précaution dont le sens est différent – plus de 14 sens différents lui sont donnés dans les traités internationaux). Le cadre envisagé, quel qu'il soit, doit a priori inclure le principe de la liberté de la recherche qui se rattache à la liberté de parole et se trouve de ce fait lié à tous les principes constitutionnels nationaux ou universels s'y référant (Déclaration Universelle des Droits de l'Homme, Charte Européenne des droits fondamentaux, Déclaration Universelle des Nations Unies sur les droits Humains etc.).

Les limites à ce principe doivent être motivées par les atteintes à la liberté ou à la sécurité des autres et elles sont, en principe, d'interprétation stricte (pratiques abusives, contraires à l'éthique, etc.). On retrouve de nombreux textes juridiques qui apportent des limites au droit à la recherche en se fondant sur ces raisons (Armes bactériologiques et chimiques ; Déclaration d'Helsinki 75, déclaration de l'Unesco sur le Génome Humain 77 etc.).

Par nature l'encadrement éventuel de la recherche en matière de géo-ingénierie va contraindre le régulateur à faire des arbitrages entre risques et intérêt général supérieur. Un problème de définition assez fondamental pour le législateur sera de déterminer le champ de la recherche et où placer le curseur au plan de la technique entre ce qui restera de l'ordre de l'expérimentation autorisée par la recherche et le déploiement.

## Les principes d'Oxford

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», désormais connu sous le nom de principes d'Oxford comprend cinq principes :

- **réglementation de la géo-ingénierie 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 ;
- **divulgation et publication ouverte des résultats de la recherche.** 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 que si des structures robustes de gouvernance existent au préalable, utilisant autant que possible des règles et institutions déjà existantes.

Mais il est difficile de tracer une ligne claire entre expérimentations aux fins de recherche non confinée et déploiement à petite échelle (« *from research to large scale deployment, it's a slippery slope* » selon l'expression de Caldeira), l'arbitrage risques/bénéfices est compliqué, voire même impossible si des intérêts matériels entrent en jeu. Il y a plusieurs autres cas épineux où ce type de problèmes se pose, comme ceux de la recherche médicale, des OGM etc., avec comme différence principale cependant celle de l'échelle des impacts en jeu. A la définition des seuils de taille et de mesures des risques, viendra s'ajouter, en corollaire, la question de déterminer qui sera « légitime » pour définir ce qui peut et ne peut pas être autorisé. Cette question n'est toujours pas tranchée. Les interrogations se cristallisent donc surtout autour du niveau de régulation plus ou moins élevé à la sortie du laboratoire et des conditions à apporter aux sources de financement qui rendraient ces expérimentations possibles. Ceci n'empêche pas que quelles que soient les règles adoptées, la créativité pour s'en affranchir est élevée pour autant qu'un intérêt économique suffisant puisse être identifié.

Un autre problème juridique, qui a aussi été soulevé par l'expérimentation animale ou les tests nucléaires est celui de l'exposition d'êtres vivants ou d'humains non consentants et de leur environnement, fut-ce dans un cadre restreint ou confiné, à des risques au profit d'un intérêt général à déterminer. Les opposants les plus extrêmes à l'expérimentation animale et à la géo-ingénierie même dans des cadres confinés, partent de cet argument. Ils s'appuient aussi sur un argument plus moral que juridique et qui est de considérer que les dérogations s'apparentent à des reconnaissances tacites de la légitimité ou de la pertinence d'une orientation de recherche.

De toute façon, quelles que soient les positions, il faut bien admettre que le droit international, quel que soit sa forme (accords volontaires, traités plus ou moins contraignants) aura toutes les peines du monde à prendre en compte tous les concepts que soulève la gouvernance de la recherche en géo-ingénierie, celui de l'aléa moral en particulier.

Il faudrait également déterminer quel cadre envisager pour une ou des hypothétiques législations. Un des talons d'Achille du législateur, c'est qu'on a jamais vu à ce jour de traité ou de mécanisme

collectif conçu par l'Homme qui ait su fonctionner dans la très longue durée et encore moins, « pour l'éternité ». Il s'agit d'un domaine où l'évaluation du risque se pose en termes de risques comparés pas de risques bénéfiques. Dans ce contexte, l'application des principes (ou approches) dits de précaution à ce type de recherche, quels que soient leur définition devient très peu rigoureuse. A l'origine (droit romain), l'absence de certitude n'entraîne pas en ligne de compte. Maintenant le principe se décline essentiellement de deux manières : l'existence de l'incertitude suffit à justifier la régulation (ou l'inaction) même si les risques ne sont pas démontrés (par ex. Charte des nations unies pour la Nature). A l'inverse, dans l'approche de précaution, l'incertitude ne doit pas bloquer l'action si les motifs sont jugés suffisants au regard de l'intérêt général. Dans ce cas la régulation est possible mais pas obligatoire et la question des coûts doit entrer en ligne de compte (Principe 15 déclaration de Rio 1992). Les différentes attitudes des sociétés au regard de l'interprétation de ce principe sont considérées par certains comme la ligne qui sera la leur pour la recherche, les « précautionneux » s'opposant aux « proactifs » (Fuller, 2013).

Intégrer la recherche sur la géo-ingénierie dans des accords ou des traités internationaux à large spectre permettrait de défendre certains intérêts fondamentaux et notamment les principes d'égalité (géographique, générationnel) ou de légitimité, d'équilibrer les effets des risques environnementaux, d'affirmer ou de prendre des résolutions en matière de pratiques éthiques dans les protocoles de recherche. Il permettrait aussi d'intégrer à l'amont, dès la conception, des contraintes ou risques politiques (Frankel 2008), ou encore de proposer une approche stratégique des financements collectifs de la R&D qui faciliterait à l'autorégulation et encouragerait l'innovation technologique (Barrett 2008). En théorie, plus les conventions sont conçues à l'amont moins les tensions sur des perspectives d'application des enjeux technologiques sont susceptibles de peser sur les négociations et de compromettre les chances d'accord (Rayner). Ceci fait que certains continuent de plaider pour des cadres unifiés intégrant très à l'amont de la recherche, les expérimentations et le déploiement en les appuyant le plus souvent sur des principes « éthiques ». Le fait que la géo-ingénierie présente des similitudes avec les technologies duales, où le risque d'utilisation unilatérale est élevé positionne a priori, son encadrement dans un type de schéma où le consensus international sur ce qui devrait être autorisé et interdit devrait être fort. L'irréversibilité des initiatives et le degré élevé d'incertitude sur les implications socio-économiques des techniques de gestion du rayonnement solaire en particulier, commanderaient en principe, des accords internationaux à fort pouvoir contraignant (Barrett 2008), ce qui est évidemment, une contradiction dans les termes.

Ces recherches peuvent avoir davantage de chances de trouver leur place dans des conventions ayant des champs d'application plus ciblés soit par technologie et/ou des cadres régionaux circonscrits (ex *UE pour le stockage du carbone*). En tout état de cause, il faudra bien distinguer les différentes techniques et différencier la gouvernance souhaitée selon le type d'activités (simulation numérique, recherche en laboratoire, expérience de terrain de petite échelle, expérience de terrain de grande échelle, implémentation locale, régionale ou transnationale ...).

En matière de gouvernance de la géo-ingénierie, le rapport de la *Royal Society* offre quelques pistes intéressantes. Selon lui, il faut se méfier des développements de technologies irréversibles, notamment lorsque ceux-ci ont pour origine un effet de mode relatif à la performance et aux bénéfices, à la mise en œuvre de moyens financiers importants ou à d'autres facteurs techniques ou politiques qui mènent à une situation de « verrouillage » (Shepherd *et al.*, 2009). Il faut en outre observer que les évaluations de la géo-ingénierie sont très sensibles aux contextes précédant les choix politiques (Bellamy *et al.*, 2012), et que dans le passé, le potentiel de la géo-ingénierie a été surestimé, alors que les risques ont été sous-estimés (Fleming 2010). Même l'approche prudente qui consiste à caractériser les conséquences négatives potentielles par une évaluation des risques ne sera pas possible pour la géo-ingénierie, dans la mesure où celle-ci se déploie dans des conditions d'ignorance et d'indétermination fortes (Shepherd *et al.*, 2009). Les approches contemporaines pour l'innovation et la recherche responsable demandent avant tout de la délibération sociétale sur les fins, objectifs et motivations de la recherche (Callon *et al.*, 2001; Owen, Macnaghten et Stilgoe 2012).



Pour ces raisons, l'engagement public dans la géo-ingénierie – convié ou bien non-convié – devrait être une dimension intégrale de la gouvernance de la géo-ingénierie, et ce concernant aussi la recherche. Les principes d'Oxford pour la gouvernance de la recherche sur la géo-ingénierie, qui soulignent que le contrôle social sera clé (Rayner *et al.*, 2013), constituent un effort important à cet égard. Cependant, ces derniers ne prennent pas suffisamment en compte le processus politique d'articulation des enjeux (Kwa et Van Hemert 2011 ; Macnaghten et Szerszynski 2013). L'engagement politique du public inclut aussi bien des réflexions sur la façon dont les technologies imaginées se développeront dans les conditions du monde réel que des propositions pour des mondes alternatifs. Afin de minimiser le risque de situation de verrouillage, il est en outre essentiel que ce type de recherche soit complètement transparente, ouverte et sans préjugé relatif à l'adoption de la géo-ingénierie, et préférablement menée à un niveau international – sans pour autant que les applications ou les solutions soient « globales », comme nous le verrons (CDB, 2012).

Bodansky (2011) établit trois possibles qui s'ouvrent pour le futur de la gouvernance de la géo-ingénierie. Premièrement, il est probable que la communauté internationale adopte simplement une prohibition à moyen terme, plutôt qu'un système de prise de décision multilatéral, très lourd à mettre en œuvre. Deuxièmement, la gouvernance de la géo-ingénierie va probablement continuer sur les bases déjà existantes comme la Convention de Londres sur la fertilisation des océans ou le Protocole de Montréal sur les injections d'aérosols stratosphériques ; en d'autres termes, il y a peu de chances pour qu'il y ait une seule gouvernance de la géo-ingénierie. Un régime pour la géo-ingénierie a peu de chance d'être adopté sous la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique, étant donné le discrédit qui frappe cette institution depuis plusieurs années maintenant. On aborde ci-dessous les enjeux liés à la gouvernance de la géo-ingénierie biologique pour trois des méthodes présentées ci-dessus.

#### 4.3.2 Le cas de l'océan

Deux traités internationaux concernent l'océan et l'éventuel déploiement de techniques de géo-ingénierie :

(1) La Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM, ou *UNCLOS* pour *United Nations Convention on the Law Of the Sea*), signée et ratifiée par la France, impose aux parties de "[prendre] séparément ou conjointement [...] toutes les mesures compatibles avec la Convention nécessaires pour prévenir, réduire et maîtriser la pollution du milieu marin, quelle qu'en soit la source [...]." Cependant, la CNUDM comporte également des articles spécifiques aux cas de la recherche scientifique qui pourraient permettre d'autoriser l'étude sans autoriser la mise en œuvre générale d'une technique de géo-ingénierie.

(2) Le Protocole de 1996 à la Convention de 1972 sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets (dit Protocole de Londres) ne traitant pas initialement de la géo-ingénierie, a été amendé à deux reprises : en 2006, pour définir les conditions de non-violation du protocole lors du stockage de CO<sub>2</sub> en réservoir géologique sous-marin ; et en 2008, pour agréer que la fertilisation océanique ne constitue pas une violation du protocole dans le cadre d'études scientifiques.

En 2012, l'organisation maritime internationale (*IMO*) a également adopté un cadre de réglementation pour l'évaluation des propositions d'expérience à petite échelle sur l'océan. En 2008, les parties de la Convention de la Biodiversité (CBD) ont statué sur un moratoire sur la fertilisation des océans, excluant néanmoins les expériences scientifiques à petite échelle en milieu côtier. Ce moratoire a été réaffirmé par les parties de la CBD en 2010. Les efforts visant à élaborer une réglementation juridiquement contraignante pour la protection de l'espace marin international se poursuivent (Williamson *et al.*, 2012). Les océanographes ont continué à débattre de la poursuite et de l'extension des expériences sur l'océan, des problèmes relatifs à la mesure quantitative de la

séquestration du carbone et de l'efficacité, des risques et des inconnues de la fertilisation des océans. D'un point de vue éthique, il a été avancé que la fertilisation des océans est inadmissible pour plusieurs raisons. Les deux principales étant d'une part que cela ne résout en rien l'acte de pollution qui continue, et d'autre part que l'obtention du consensus au sein des parties concernées serait irréalisable en pratique (Hale et Dilling 2011).

#### 4.3.3 Le cas de l'afforestation

Les propositions d'afforestation à grande échelle pour lutter contre le réchauffement climatique datent des années 1970s, voire avant. Le *Clean Development Mechanism (CDM)*, dans le protocole de Kyoto (1997), a introduit des incitations financières pour la création de puits de carbone dans les pays en développement, y compris pour l'afforestation. Le problème majeur de l'afforestation est qu'elle peut rivaliser avec d'autres priorités environnementales et sociales, comme la biodiversité et la nourriture (Shepherd *et al.*, 2009). Il y a des enjeux de justice (quelles priorités comptent, qui profite ?) qui doivent être pris en compte et traités. Les approches fondées dans les communautés locales seraient plus appropriées que le cadre Kyoto, d'autant plus qu'il y a une forte tendance à la planification au niveau global, renvoyant à des logiques descendantes (top-down), scientifiques et gestionnaires (Boyd 2009).

#### 4.3.4 Le cas du biochar

Le biochar a été promu comme une technologie à « gains multiples » procurant à la fois une augmentation de la fertilité des sols et la séquestration du carbone, avec possibilité d'amélioration du revenu des paysans. Pour d'autres, le biochar menace de se traduire par une exploitation accrue des terres et des ressources et par une discipline des pratiques agricoles menant à de nouvelles formes d'aliénation des paysans (Leach *et al.*, 2012). Cependant, il existe un vide de gouvernance et de politique grâce auxquels les entreprises et les ONGs poursuivent leurs intérêts. Les inquiétudes exprimées par Shepherd *et al.* (2009) apparaissent alors justifiées. Les logiques technologiques et de marché minent les pratiques locales et peu d'efforts ont été produits pour garantir les revenus du biochar aux paysans. Pour être durable, les projets de biochar devraient être adaptés aux sociétés locales avec leurs écologies politiques et historiques diversifiées. Une telle approche contraste fortement avec la standardisation et la marchandisation du marché émergent du carbone biochar (Leach *et al.*, 2012).

### 4.4 Aspects financiers

On peut s'interroger sur l'intérêt économique et financier pour la sphère privée à promouvoir la géo-ingénierie, que ce soit en termes d'effort de recherche ou de déploiement. La nature même de la géo-ingénierie comme solution au problème du changement climatique fait qu'il est probable que les clés d'un modèle économique viable seront *in fine* entre les mains des États que ce soit par l'intermédiaire de financements directs ou via l'accès de la géo-ingénierie à un marché carbone et/ou de température. La question du modèle économique se pose différemment pour les différents types de géo-ingénierie. Au final, l'incitation à la géo-ingénierie fait face à deux difficultés importantes : la question de la quantification, et celle de la responsabilité.

**Quantification.** Pour qu'une technique de géo-ingénierie soit intégrée à un accord international contraignant, il est nécessaire de pouvoir en quantifier les effets dans une grandeur comparable aux autres techniques, et aux méthodes de mitigation. Si dans certains cas cela semble possible (par

exemple, pour la capture de CO<sub>2</sub>), la quantification des effets de certaines techniques (telles que la modification de l'albédo des nuages) se heurte aux faiblesses scientifiques actuelles. De manière intéressante, la majeure partie des incertitudes liées à la géo-ingénierie sont les mêmes que celles liées au changement climatique, qui sont présentées dans les rapports du GIEC. Ces incertitudes peuvent soit se superposer à celles du changement climatique (incertitudes sur les précipitations en réponse à des forçages différents), soit se neutraliser (incertitude sur la sensibilité climatique). Ainsi, la première étape, dans l'optique de développer la géo-ingénierie à grande échelle, est-elle tout simplement d'étudier et de comprendre le système Terre dans son ensemble. Et donc, il semble qu'il soit inutile de chercher à déployer une technique dont les effets ne sont pas quantifiables et comparables à d'autres techniques.

**Responsabilité.** Enfin, la question de la gouvernance, et de l'incitation, renvoie à celle de la responsabilité. Dans le cadre d'un accord comptable permettant de financer le déploiement de techniques de géo-ingénierie, la question de savoir qui est responsable des effets secondaires est fondamentale. En particulier, il faut bien distinguer les effets secondaires diffus (tels que les fuites de gaz lors du transport et du stockage du CO<sub>2</sub>, ou bien l'éventuelle diminution des rendements agricoles causée par les aérosols troposphériques) et les risques à proprement parler (comme le dégazage complet d'un réservoir de stockage géologique, ou la modification/destruction de réseaux trophiques océaniques). Dans le premier cas, les effets diffus seront vraisemblablement connus lors du déploiement à grande échelle, et ils auront sûrement été quantifiés afin de s'intégrer au dispositif quantitatif mis en place avec la convention sur la géo-ingénierie. Les risques ponctuels, quant à eux, même s'ils peuvent avoir été évalués, ne sont pas nécessairement intégrables à cette convention. Par exemple, concernant le stockage géologique de CO<sub>2</sub>, l'entité responsable du transport et de l'enfouissement est-elle également responsable d'un dégazage soudain ? Si les raisons en sont une faiblesse structurelle du réservoir ? Un tremblement de terre ? Jusqu'à quel degré un acteur privé peut être jugé responsable des effets secondaires est déterminant dans le développement économique de la géo-ingénierie, puisque cela peut devenir une barrière infranchissable pour les investisseurs (barrière qu'il est possible de faire disparaître avec un système d'assurance et de réassurance, comme c'est le cas actuellement pour les catastrophes naturelles, mais ne serions-nous pas plutôt face à des catastrophes industrielles ?).

Une analyse des aspects économiques de la géo-ingénierie, en complément des autres aspects scientifiques, politiques et éthiques, peut renseigner sur la nature des débats à venir et le positionnement futur des différents lobbys, qu'ils relèvent de l'industrie, de la société civile ou autres. Ainsi on peut imaginer que si la géo-ingénierie apparaît comme peu chère, qu'elle peut facilement générer des profits et/ou qu'un modèle économique relativement simple se dégage, la pression des lobbys sera forte. Si, au contraire, la géo-ingénierie apparaît comme chère et/ou que le modèle économique lointain et compliqué, il est plus probable que l'on reste dans le domaine de la théorie, du débat académique et que la pression des lobbys reste faible. Là encore, la question se pose différemment pour différents types de géo-ingénierie.

Un intérêt premier de la recherche en géo-ingénierie est peut-être de fournir un coût technique des solutions envisagées. Il est alors à confronter à celui du service rendu notamment en termes environnementaux ou pour le moins peut servir à mieux cerner ce dernier. Il peut aussi se comparer à celui des solutions alternatives : notamment les solutions de géo-ingénierie peuvent se regarder en considération de certaines solutions d'adaptation traitant la chaîne des impacts à un autre niveau. La deuxième question du qui finance et comment relève de la problématique des biens communs de l'humanité et de leur gouvernance : taxation, permis d'émission, accord volontaire, responsabilité sociales des entreprises, ... Il importe sans doute alors de distinguer dans la géo-ingénierie les techniques apportant des résultats incrémentaux dont l'intensité pourra être proportionnelle à l'effort contributif consenti, par opposition à des dispositifs plus radicaux soumis à des lois de seuils tant dans leur dimension capitaliste que dans les paramètres (plus difficilement comptables) de performances techniques (par exemples grandeurs extensives comme la température par opposition

à des concentrations molaires ou quantités de chaleur). Par exemple, les puits de CO<sub>2</sub> atmosphérique ou les transformations moléculaires répondent aisément à la loi d'additivité tant entre eux qu'avec les solutions d'atténuation et donc peuvent relever de lois de marché communes. La distribution en sites unitaires de petites tailles, outre la réversibilité présente donc l'attrait de la progressivité qui rend plus réalistes les potentialités de développement dans un secteur où, plus que tout autre, la réalité économique doit concilier aventure technologique et gouvernance fantomatique.

Le modèle économique des méthodes de capture du dioxyde de carbone pourraient reposer sur 1) la vente du CO<sub>2</sub> comme composé chimique, 2) l'utilisation du CO<sub>2</sub> pour la fabrication puis la vente de composés organiques réduits ou de carburants, 3) la vente de crédits d'émission auxquels la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> pourrait donner droit. Certaines méthodes de capture directe du CO<sub>2</sub> atmosphérique sont en effet motivées par la nécessité de produire de l'air sans CO<sub>2</sub> ou au contraire du CO<sub>2</sub> pur qui pourrait être utilisé dans certaines applications industrielles (comme l'injection de CO<sub>2</sub> dans les puits pétroliers pour augmenter les rendements). Le CO<sub>2</sub> en tant que composé chimique coûtant peu cher, et les besoins en CO<sub>2</sub> n'étant pas énormes, il ne peut s'agir là que d'une utilisation occasionnelle dans des niches industrielles. Si le CO<sub>2</sub> est utilisé pour fabriquer des composés organiques ou des carburants (par exemple par photosynthèse artificielle ou avec des microalgues), le prix de vente des composés chimiques produits ou des carburants rentre logiquement dans le modèle économique. Le modèle économique n'est rentable que si le coût de production du carburant est inférieur ou égal à celui de carburants équivalents traditionnels. On pense bien sûr ici à la production de carburants liquides, dont les ressources naturelles s'épuisent, et pour lesquels il existe des possibilités de production à partir du CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'intérêt des carburants liquides étant d'être facilement transportables et utilisables par des sources mobiles, leur combustion est plus difficilement associable à des techniques de captage et de stockage. On parle là donc de recyclage du CO<sub>2</sub> atmosphérique, et non pas de capture. Seule la capture du CO<sub>2</sub> atmosphérique (par une technique de capture directe suivie d'un stockage, par production de biomasse associée au captage et au stockage du CO<sub>2</sub> lors de la combustion- BECCS, ou par d'autres méthodes) permet donc de réduire les concentrations atmosphériques. Ces émissions négatives pourraient donner lieu à des crédits d'émissions qui pourraient être valorisés sur le marché du carbone. Cela nécessiterait que i) les cours du carbone soient suffisamment élevés, ii) qu'il y ait possibilité de vérifier la réalité de la capture et du stockage, et iii) que le stockage soit suffisamment durable.

Le premier critère implique que la capture directe du CO<sub>2</sub> par des méthodes chimiques, dont le coût est souvent estimé entre 100 et 200 \$ la tonne de CO<sub>2</sub>, reste chère et d'une perspective lointaine compte-tenu de la valeur actuelle du CO<sub>2</sub> sur les bourses d'échanges.

Le second critère rend difficilement crédibles certaines méthodes proposées comme la fertilisation des océans tant le processus de vérification apparaît complexe. Le troisième critère apparaît problématique pour certaines méthodes de stockage dans les sols et/ou la biomasse. Il pourrait être solutionné par la mise en place d'une décote pour la tonne de CO<sub>2</sub> stockée de manière moins durable.

En conclusion, la contribution des méthodes de capture du CO<sub>2</sub> atmosphérique aux politiques du climat ne se conçoit sérieusement que dans le cadre d'un marché fluide du carbone, avec un cours du CO<sub>2</sub> beaucoup plus élevé que le cours actuel, et dans un cadre légal qui prend en compte les aspects de vérification. Il n'est pas exclu toutefois qu'un lobbying se crée pour reconnaître le droit à certaines méthodes d'extraction du CO<sub>2</sub> à donner lieu à des crédits d'émission dans le cadre existant.

Les méthodes de gestion du rayonnement solaire impliqueraient un modèle économique assez différent. Un éventuel rattachement aux marchés du carbone obligerait de définir une équivalence entre une perturbation climatique causée par un forçage radiatif de courte durée (comme une injection instantanée d'aérosols stratosphériques) et une perturbation climatique causée par un forçage radiatif de longue durée (comme l'émission d'une quantité de gaz à effet de serre de longue durée de vie).

Ce problème rejoint celui des métriques du changement climatique qui cherchent à comparer les effets relatifs de réductions d'émissions d'espèces à courte durée de vie (comme le carbone-suie), moyenne durée de vie (comme le méthane), et longue durée de vie (comme le dioxyde de carbone). Ces métriques impliquent des jugements de valeur sur la gravité et l'urgence du changement climatique, ou encore le niveau souhaitable de solidarité intergénérationnelle, et restent l'objet d'âpres discussions au niveau même de la CCNUCC. Même si quelques articles scientifiques ont essayé de convertir des surfaces de toits blanchis en tonnes équivalent CO<sub>2</sub>, ces estimations ne font pas consensus et il y a là un problème conceptuel à ne pas négliger. L'hypothèse d'un couplage des méthodes de gestion du rayonnement solaire aux marchés du carbone est donc peu probable, et il est plus facile conceptuellement d'imaginer un financement direct de ces méthodes par les gouvernements. C'est pourquoi on peut penser que le débat sur ces méthodes se situera au niveau macroéconomique, où le coût pour l'économie (à l'échelle nationale, régionale ou mondiale) des politiques d'atténuation et/ou d'adaptation sera comparé à celui des méthodes de gestion du rayonnement solaire. On se situera donc plutôt à court terme dans un lobbying de "think-tanks", financés plus ou moins ouvertement par des acteurs industriels, comme c'est déjà le cas sur les politiques de changement climatique, que dans un cadre économique existant.

## 5. Conclusions

En conclusion de ces quinze mois de travaux, on voit clairement apparaître des besoins de recherche et d'expertise en matière de géo-ingénierie au-delà de l'évaluation préliminaire qui en a été faite dans l'atelier REAGIR. Cela nécessite des financements de la part des acteurs soutenant la recherche, soit dans leurs orientations générales, soit sous forme d'appel d'offre dédié. Ces financements ne doivent pas venir diminuer les financements sur les énergies propres, les recherches sur le climat ou l'environnement.

Etant donné les incertitudes importantes sur certaines techniques de gestion du rayonnement solaire, la recherche technologique dans ce domaine n'est pas apparue comme une priorité par le groupe de travail. Toute recherche dans ce domaine doit adopter une approche systémique très marquée dans laquelle l'évaluation de l'efficacité et des risques, les considérations éthiques et les dimensions politiques et économiques sont au moins aussi importantes que les aspects technologiques. Il pourrait aussi être intéressant de lancer quelques études pour établir si certaines propositions ne peuvent pas être écartées d'emblée en raison de leur faible efficacité ou parce qu'elles nécessiteraient des développements technologiques trop longs au regard du problème climatique ou une maintenance trop coûteuse.

En matière de capture et de stockage du CO<sub>2</sub>, on voit apparaître deux classes de techniques selon qu'elles restent confinées ou territoriales, ou qu'elles sont au contraire trans-territoriales et utilisent les biens communs comme l'océan. Il semble intéressant de diriger une partie de la recherche vers des techniques et technologies territoriales permettant des émissions négatives, avec l'avantage qu'elles peuvent être appliquées localement dans un premier temps, avant d'être élargies pour conduire à des impacts plus importants. Comme pour la gestion du rayonnement solaire, le besoin de recherche doit être systémique, et intégrer des aspects technologiques, une évaluation des risques, les enjeux de gouvernance, et les aspects économiques.

On voit aussi apparaître des techniques, où l'activité de géo-ingénierie arrive en seconde intention ; il s'agit par exemple d'un refroidissement localisé greffé à la production d'énergie renouvelable, de la capture du CO<sub>2</sub> associée à un dessalement de l'eau de mer, etc. Ces techniques, généralement confinées ou relevant de la géo-ingénierie territoriale, pourraient être plus facilement acceptées et bénéficier d'un modèle économique plus favorable dès lors que la composante climatique pourrait être valorisée.

Dans toutes ces recherches, il doit être gardé à l'esprit l'impact potentiel de la mise en œuvre de méthodes de géo-ingénierie sur les ressources nécessaires à d'autres activités humaines : on pense ainsi à l'énergie, mais aussi à l'eau qui peut devenir un facteur limitant pour la géo-ingénierie territoriale.

Enfin toute recherche dans ce domaine doit s'accompagner d'un engagement du public avec information sur les limites et les risques de ces technologies afin d'éviter qu'elles ne soient perçues comme des solutions miracles, prétexte à ne rien faire en matière d'atténuation et d'adaptation. La réflexion sur la géo-ingénierie ne doit en effet pas faire oublier que le meilleur moyen de lutter contre le changement climatique reste de réduire nos émissions à la source en réduisant nos consommations d'énergie et en développant des énergies décarbonées.

## 6. Postface : la géo-ingénierie vis-à-vis des politiques climatiques actuelles

Les politiques de lutte contre le changement climatique peuvent aujourd'hui être classées en deux catégories d'actions : l'atténuation qui consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter l'ampleur du changement climatique ; l'adaptation qui doit permettre à nos sociétés et leur environnement de s'adapter aux conditions climatiques futures en essayant de limiter les effets du climat voire de tirer parti des potentiels bénéfiques.

L'atténuation est la plus ancienne des politiques et elle constitue aujourd'hui l'axe majeur des principaux textes réglementaires que ce soit au niveau local (PCET), régional (SRCAE), national (facteur 4, Grenelle, PNAEE), européen (directive EED, 3x20) ou international (Kyoto). Pour autant il est maintenant admis par le monde scientifique et politique, quel que soit l'ampleur de notre effort de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, le changement climatique est en route et le climat du milieu ou fin du 21<sup>ème</sup> siècle ne sera pas celui d'aujourd'hui. D'où la mise en œuvre progressive ces dernières années de politiques et mesures pour promouvoir l'adaptation au changement climatique (stratégie nationale en 2007, PNACC en 2011, obligation d'un volet adaptation dans les SRCAE et PCET).

Ces deux politiques sont complémentaires dans leur mise en œuvre car sans atténuation il n'y aura pas d'adaptation possible et sans adaptation les conditions de vie dans nos sociétés de demain seront certainement trop difficiles ou conduiront à des actions spontanées en totale contradiction avec les politiques d'atténuation (par exemple le développement de la climatisation « énergivore » en réponse à un épisode de canicule). L'objectif est donc aujourd'hui pour les territoires de veiller à la cohérence de ces politiques et des actions qui en découlent. Par exemple, on privilégiera les mesures d'adaptation dites « sans regret » qui se révéleront bénéfiques quel que soit l'ampleur du changement climatique ou les mesures dites « gagnant-gagnant » qui présentent des co-bénéfices environnementaux, économiques ou sociaux.

C'est ce même principe qui doit guider la faisabilité des politiques de géo-ingénierie. Une politique de « géo-ingénierie », si le concept est jugé pertinent et si elle devait être mise en œuvre, doit absolument répondre à ces mêmes critères de complémentarité avec les politiques d'atténuation et d'adaptation, c'est-à-dire :

- ne pas être un moyen détourné pour renoncer ou représenter un obstacle pour mener nos politiques d'atténuation pour réduire nos consommations d'énergie et nos émissions de gaz à effet de serre qui restent une priorité absolue pour lutter contre le changement climatique ;
- ne pas être une contrainte ou un frein pour mettre en œuvre des mesures et politiques d'adaptation au changement climatique ;

- et de la même manière ne pas présenter de dommages collatéraux négatifs, ne pas être un frein vis-à-vis des autres politiques environnementales (qualité de l'air, protection de la couche d'ozone par exemple), ne pas rentrer en conflit avec les politiques économiques et sociales.

Ces exigences s'appliquent aussi bien au niveau des politiques internationales, européennes, nationales, régionales que locales. Cela peut dépendre bien évidemment de la nature et de la temporalité des mesures de géo-ingénierie qui pourraient être mises en œuvre (réversibilité, irréversibilité), mais le principe de complémentarité et de synergie entre politiques doit être un critère de pertinence des politiques qui sont menées pour lutter contre le changement climatique. Les politiques climatiques et environnementales sont un puzzle dont les pièces doivent s'imbriquer les unes dans les autres.

## 7. Références

- Arora VK, Montenegro A. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nature Geoscience* 2011, 4:514–518. doi:10.1038/ngeo1182
- Asilomar Scientific Organizing Committee (ASOC). 2010. « The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques ». Washington, D.C., Climate Institute.  
<http://www.climateresponsefund.org/images/Conference/finalfinalreport.pdf>
- Bala G, *et al.* Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proc. National Acad. Sci.* 2007, 104:6550-6555. doi:10.1073/pnas.0608998104
- Barrett S. Climate treaties and "breakthrough" technologies. *The American Economic Review* 2006, 96:22-25. Article URL: <http://www.jstor.org/stable/30034607>
- Barrett S. The incredible economics of geoengineering. *Environmental and Resource Economics* 2008, 39:45-54. doi:10.1007/s10640-007-9174-8
- Barrett S. The coming global climate - Technology revolution. *Journal of Economic Perspectives* 2009. 23:53-75. doi:10.1257/089533009788430634
- Bathiany S, Claussen M, Brovkin V, Raddatz T, Gayler V. Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. *Biogeosciences* 2010, 7:387-428. doi:10.5194/bgd-7-387-2010
- Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk JD. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 2005, 437:245-248. doi:10.1038/nature04038
- Bellamy R, Chilvers J, Vaughan NE, Lenton TM. A review of climate geoengineering appraisals. *WIREs Climate Change* 2012, 3: 597-615. doi:10.1002/wcc.197
- Belter CW, Seidel DJ. A bibliometric analysis of climate engineering research. *WIREs Climate Change* 2013, 4:417–427. doi:10.1002/wcc.229
- Bengtsson L. Geo-engineering to confine climate change: Is it at all feasible? *Climatic Change* 2006, 77: 229-234. doi:10.1007/s10584-006-9133-3
- Betts RA. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 2000, 408:187-190. doi:10.1038/35041545
- Blandin P. Biodiversité : l'avenir du vivant. Albin Michel, 2010, 264 pp.
- Bodansky D. Governing climate engineering scenarios for analysis: Discussion Paper. *Harvard Project on Climate Agreements* 2011, 11: 11-47
- Bodansky D. The who, what, and wherefore of geoengineering governance ». *Climatic Change* 2013, 121:539-551. doi:10.1007/s10584-013-0759-7
- Bonan GB. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 2008, 320:1444-1449. doi:10.1126/science.1155121
- Bonan GB, Pollard D, Thompson SL. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature* 1992, 359:716-718. doi:10.1038/359716a0
- Bonnelle D, de Richter R. 21 énergies renouvelables insolites pour le 21e siècle. Edition Ellipses 2010, 19: 128-134. ISBN :978-2-7298-5407-2.
- Bonneuil C, Fressoz JB. L'événement anthropocène, la Terre, l'histoire et nous. Paris Seuil 2013, 320 pp.



- Boucher O, Forster PM, Gruber N, Ha-Duong M, Lawrence M, Lenton TM, Maas A, Vaughan N, Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation, *WIREs Climate Change* 2014, 5:23-35, doi:10.1002/wcc.261
- Boyd E. Governing the clean development mechanism: Global rhetoric versus local realities in carbon sequestration projects. *Environment and Planning A* 2009, 41: 2380-2395. doi:10.1068/a41341
- Boyd PW *et al.* Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future directions. *Science* 2007, 315:612-617. doi:10.1126/science.1131669
- Boyd PW. Geopolitics of geoengineering. *Nature Geoscience* 2009. 2:812. doi:10.1038/ngeo710
- Brahic C. Earth's Plan B. *New Scientist* 2009, 2697:8-10. doi:10.1016/S0262-4079(09)60548-0
- Brantley SL, Goldhaber MB, Ragnarsdottir KV. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements* 2007, 3-5: 307-314. doi:10.2113/gselements.3.5.307
- Bronson D, Mooney P, Wetter K.J. Retooling the Planet? Climate chaos in a geoengineering age, Report prepared by members of the ETC Group (<http://www.etcgroup.org>) for the Swedish Society for Nature Conservation. 2009.
- Buesseler KO *et al.*, 2008. Ocean iron fertilization - moving forward in a sea of uncertainty. *Science* 2008, 319:162. doi:10.1126/science.1154305
- Caldeira K. Interview of Ken Caldeira by Jeff Goodell. Geoengineering the planet the possibilities and the pitfalls. *Yale Environment* 360, 21 October 2009.  
[http://e360.yale.edu/feature/geoengineering\\_the\\_planet\\_the\\_possibilities\\_and\\_the\\_pitfalls/2201/](http://e360.yale.edu/feature/geoengineering_the_planet_the_possibilities_and_the_pitfalls/2201/)
- Callon M, Lascoumes P, Barthe Y. *Agir dans un monde incertain, essai sur la démocratie technique.* Paris Seuil, 2001, 358 p.
- Cao L, Caldeira K. Atmospheric carbon dioxide removal: Long-term consequences and commitment. *Environmental Research Letters* 2010, 5:024011, 6p. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024011
- Chen C, Tavoni M. Direct air capture of CO<sub>2</sub> and climate stabilization: A model based assessment. *Climatic Change* 2013, 118:59-72. doi:10.1007/s10584-013-0714-7
- Chisholm SW, Morel FMM. What controls phytoplankton production in nutrient-rich areas of the open sea. *Limnology and Oceanography* 1991, 36:U1507-U1511
- Convention on Biological Diversity, 2008. COP 9 Décision IX/16 Biodiversity and climate change. Disponible à l'adresse <http://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=11659>.
- Convention on Biological Diversity, 2009. *Scientific Synthesis of the Impacts of Ocean Fertilization on Marine Biodiversity*, Montreal. Disponible à l'adresse <http://www.cbd.int>
- Convention on Biological Diversity, 2010. COP 10 Décision X/33 Biodiversity and climate change. Disponible à l'adresse <https://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=12299>
- Convention on Biological Diversity, Climate-related geoengineering and biodiversity, 2012, Disponible à l'adresse <http://www.cbd.int/climate/geoengineering/>
- Costa A, Chiarello GL, Selli E, Guarino M. Effects of TiO<sub>2</sub> based photocatalytic paint on concentrations and emissions of pollutants and on animal performance in a swine weaning unit. *Journal of Environmental Management* 2012, 96:86-90. doi:10.1016/j.jenvman.2011.08.025
- Courtland R. Planktos dead in the water. *Nature* 2008, 451:879. <http://www.nature.com/news/2008/080215/full/news.2008.604.html>
- Crutzen PJ. Geology of mankind, *Nature* 2002, 415: 23. doi:10.1038/415023a
- Crutzen PJ. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* 2006, 77: 211-220. doi:10.1007/s10584-006-9101-y

- Davies G. Framing the social, political and environmental risks and benefits of geo-engineering: balancing the hard to imagine against the hard to measure. *Tulsa Law Review*, May 26, 2011. <http://ssrn.com/abstract=1926137>
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Schwerpunktprogramm, Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities? (SPP 1689). *Information für die Wissenschaft 2012*. Disponible à l'adresse [http://www.dfg.de/foerderung/info\\_wissenschaft/archiv/2012/info\\_wissenschaft\\_12\\_22/index.html](http://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/archiv/2012/info_wissenschaft_12_22/index.html) [Consulté le 3 décembre 2013]
- Dornburg V, Marland G. Temporary storage of carbon in the biosphere does have value for climate change mitigation: A response to the paper by Miko Kirschbaum. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2008, 13:211-217. doi:10.1007/s11027-007-9113-6
- Dörries M. In the public eye: Volcanology and climate change studies in the 20th century. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 2006, 37:87-125
- Dörries M. The Politics of Atmospheric Sciences: 'Nuclear Winter' and Global Climate Change. *Osirisi* 2011, 26: 198–223.
- Drewry, D. T., Kumar, P. and Long, S. P. Simultaneous improvement in productivity, water use, and albedo through crop structural modification. *Global Change Biology*, 2014. doi:10.1111/gcb.12567
- Edenhofer, O. et al. 2011. *IPCC Expert Meeting on Geoengineering. Meeting report*. Lima, Peru: IPCC Working Group III Technical Support Unit.
- ETC Group. Geopiracy: The case against geoengineering. ETC Group Communiqué 103, First published October 2010. Second edition November 2010, 53 p. [http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf\\_file/ETC\\_geopiracy\\_4web.pdf](http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/ETC_geopiracy_4web.pdf)
- Feichter J, Leisner T. Climate engineering: A critical review of approaches to modify the global energy balance. *European Physical J. Special Topics* 2009, 176:81-92. doi:10.1140/epjst/e2009-01149-8
- Feng W, Plante AF, Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 2013, 12:81-93. doi:10.1007/s10533-011-9679-7
- Fleming JR. The pathological history of weather and climate modification: Three cycles of promise and hype. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 2006. 37:3-25. doi:10.1525/hsp.2006.37.1.3
- Fleming JR. Fixing the sky: The checkered history of weather and climate control. New York: Columbia University Press 2010, 344 p.
- Frankel J. An elaborated proposal for global climate policy architecture: specific formulas and emission targets for all countries in all decades. *Harvard Project on International Climate Agreements*. Working paper 2008, October, 20.
- Fuller S. The proactionary principle: between no caution and precaution. *The Breakthrough Journal* 08/08/2013. Disponible à <http://thebreakthrough.org/index.php/programs/economic-growth/the-proactionary-principle/>
- Fuller S. Beyond the precautionary principle. *The Guardian* 10/07/2013. <http://www.theguardian.com/science/political-science/2013/jul/10/beyond-precautionary-principle>
- Gardiner SM. The desperation argument for geoengineering. *Political Science & Politics* 2013. 46: 28-33. doi:10.1017/S1049096512001424
- Gasser T, Ciais P. A theoretical framework for the net land-to-atmosphere CO<sub>2</sub> flux and its implications in the definition of "emissions from land-use change". *Earth System Dynamics*. 2013, 4:171-186, doi:10.5194/esd-4-171-2013.

- Goes, M., Tuana, N. & Keller, K., 2011. The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering. *Climatic Change* 2011, 109:719-744. doi:10.1007/s10584-010-9961-z
- Gordon B. 2010. *Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination*, U.S. house of representatives one hundred eleventh congress, Committee on Science Space and Technology. Disponible à l'adresse <http://democrats.science.house.gov/committee-report/engineering-climate-research-needs-and-strategies-international-coordination> [Consulté le 3 décembre 2013].
- Govindasamy B, Caldeira K. Geoengineering earth's radiation balance to mitigate CO<sub>2</sub>-induced climate change. *Geophysical Research Letters* 2012, 27:2141-2144. doi:10.1029/1999GL006086
- Guillaume, B., Laramée, V. Scénarios d'avenir: Futurs possibles du climat et de la technologie. Armand Colin, Paris, 2012.
- Gunter M. Kilimanjaro Energy - Fortune Tech: Technology blogs, news and analysis from Fortune Magazine. *Fortune* 2011. Disponible à l'adresse <http://tech.fortune.cnn.com/tag/kilimanjaro-energy/> [Consulté le 3 décembre 2013].
- Hale B, Dilling L. Geoengineering, ocean fertilization, and the problem of permissible pollution. *Science, Technology and Human Values* 2011, 36: 190-212. doi:10.1177/0162243910366150
- Hamblin, JD, *Arming Mother Nature. The Birth of Catastrophic Environmentalism*. Oxford University Press 2013. 298 p.
- Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity. *Soil Science Society of America Journal* 1996, 60:487-491. doi:10.2136/sssaj1996.03615995006000020021x
- Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 1997, 191:77-87. doi:10.1023/A:1004213929699
- Hegerl GC, Solomon S. Risks of climate engineering *Science* 2009, 325:955-956. doi:10.1126/science.1178530
- Herzog H, Caldeira K, Reilly J. An issue of permanence: Assessing the effectiveness of temporary carbon storage. *Climatic Change* 2003, 59:293-310. doi:10.1023/A:1024801618900
- Heyward C. Situating and abandoning geoengineering: A typology of five responses to dangerous climate change. *Political Science and Politics* 2013, 46: 23-27. doi:10.1017/S1049096512001436
- House JI, Prentice IC, Le Queré C. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 2002, 8:1047-1052. doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00536.x
- House KZ *et al.*, Economic and energetic analysis of capturing CO<sub>2</sub> from ambient air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2011, 108:20428-20433. doi:10.1073/pnas.1012253108
- Hulme M. Climate change: Climate engineering through stratospheric aerosol injection. *Progress in Physical Geography* 2012, 36:694-705. doi:10.1177/0309133312456414
- IPCC. Climate change 2007. Synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core writing team: Pachauri RK, Reisinger A (eds). IPCC Geneva 2007, 104 p.
- IPCC. Expert meeting report on geoengineering, Lima June 2011, Edenhofer O, Field C, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Stocker T, Barros V, Dahe Q, Minx J, Mach K, Plattner GK, Schlomer S, Hansen G, Mastrandrea M (eds.). IPCC Working Group III Technical support unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research Germany, 2011.
- ISO Guide 73, 2009. Management du risque - Vocabulaire. Disponible à [http://www.iso.org/iso/fr/catalogue\\_detail?csnumber=4465](http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=4465)

- Izrael YA, Zakharov VM, Petrov NN, Ryaboshapko AG, Ivanov VN, Savchenko AV, Andreev YV, Puzov YA, Danilyan BG, Kulapin VP. Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russian Meteorology and Hydrology* 2009a, 34:265-273. doi:10.3103/S106837390905001X
- Izrael YA, Zakharov VM, Petrov NN, Ryaboshapko AG, Ivanov VN, Savchenko AV, Andreev YV, Eran'kov VG, Puzov YA, Danilyan BG, Kulyapin VP, Gulevskii VA. Field studies of a geo-engineering method of maintaining a modern climate with aerosol particles. *Russian Meteorology and Hydrology* 2009b, 34:635-638. doi:10.3103/S106837390910001X
- Izrael YA, Ryaboshapko AG, Petrov NN. Comparative analysis of geo-engineering approaches to climate stabilization. *Russian Meteorology and Hydrology* 2009c, 34:335-347. doi:10.3103/S1068373909060016
- Izrael YA, Zakharov VM, Ivanov VN, Petrov NN, Andreev YV, Gulevskii VA, Danilyan BG, Erankov VG, Kirin DV, Kulyapin VP, Rusakov YS, Savchenko PN, Svirkunov PN, Severov DA, Folomeev VV. A field experiment on modeling the impact of aerosol layers on the variability of solar insolation and meteorological characteristics of the surface layer. *Russian Meteorology and Hydrology* 2011, 36:705-711. doi:10.3103/S106837391111001X
- Jackson RB, Jobbágy EG, Avissar R, Roy SB, Barrett DJ *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 2005, 310:1944-1947. doi:10.1126/science.1119282
- Jandl R, Lindner M, Vesterdal L. *et al.* How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 2007, 137:253-268. doi:10.1016/j.geoderma.2006.09.003
- Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 2000, 10:423-436. doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2
- Kallmeyer R, Pockalny R, Adhikari RR, Smith DC, D'Hondt S. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2012, 109:16213-16216. doi:10.1073/pnas.1203849109
- Keith DW. Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review Energy Environment* 2000, 25:245-284.
- Keith DW, DeCarolis JF, Denkenberger DC, Lenschow DH, Malyshev SL, Pacala S, Rasch PJ. The influence of large-scale wind power on global climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2004. 101:16115-16120. doi:10.1073/pnas.0406930101
- Keith D, Ha-Duong M, Stolaroff J. Climate strategy with CO<sub>2</sub> capture from the air. *Climatic Change* 2006, 74:17-45. doi:10.1007/s10584-005-9026-x
- Keith DW, *et al.* Research on global sun block needed now. *Nature* 2010. 463:426-427. doi:10.1038/463426a
- Keith DW. Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2010, 107:16428-16431. doi:10.1073/pnas.1009519107
- Kellogg WW, Schneider SH. Climate stabilization: For better or for worse? *Science* 1974, 186:1163-1172. doi:10.1126/science.186.4170.1163
- Kirschbaum MUF. Can trees buy time? An assessment of the role of vegetation sinks as part of the global carbon cycle. *Climatic Change* 2003, 58:47-71. doi:10.1023/A:1023447504860
- Kiss AC. Les modifications artificielles du temps. *Annuaire français de droit international* 1975, 21, 792-800
- Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. *Physics of Life Reviews* 2010, 7:424-460. doi:10.1016/j.plrev.2010.10.002

- Kravitz B, Robock A, Boucher O, Schmidt H, Taylor KE, Stenchikov G, Schulz M. The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters* 2011, 12:162-167. doi:10.1002/asl.316
- Kravitz B, Caldeira K, Boucher O, Robock A, Rasch PJ, Alterskjaer K *et al.* Climate model response from the geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). *Journal Geophysical Research Atmospheres* 2013, 118:1-13. doi:10.1002/jgrd.50646
- Kuebbeler M, Lohmann U, Feichter J. Effects of stratospheric sulfate aerosol geo-engineering on cirrus clouds. *Geophysical Research Letters* 2012, 39. L23803, doi:10.1029/2012GL053797
- Kueppers LM, Snyder MA, Sloan LC. Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters* 2007, 34:L03703. doi:10.1029/2006GL028679
- Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Six J, Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia. *Global Change Biology* 2014, 20:938-947. doi:10.1111/gcb.12379
- Kwa C. The rise and fall of weather modification: Changes in American attitude toward technology, nature and society. In: Miller CA, Edwards PE. *Changing the atmosphere: expert knowledge and environmental governance*. MIT Press 2001, pp. 135-165.
- Laird DA. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal* 2008, 100:178-181. doi:10.2134/agronj2007.0161
- Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 2004, 304:1623-1627. doi:10.1126/science.1097396
- Lal R. Carbon sequestration in soils of central Asia. *Land Degrad. Develop* 2004, 15:563-572. doi:10.1002/ldr.624
- Lasek J, Yu YH, Wu J. Removal of NO<sub>x</sub> by photocatalytic processes. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 2013, 14:29-52. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2012.08.002
- Latham J, Bower K, Choullarton T, Coe H, Connolly P *et al.* Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2012, 370:4217-4262. doi:10.1098/rsta.2012.0086
- Law CS. Predicting and monitoring the effects of large-scale ocean iron fertilization on marine trace gas emissions. *Marine Ecology Progress Series* 2008, 364:283-288. doi:10.3354/meps07549
- Leach M, Fairhead J, Fraser J. Green grabs and biochar: revaluing African soils and farming in the new carbon economy. *The Journal of Peasant Studies* 2012, 39:285-307. doi:10.1080/03066150.2012.658042
- Lempert RJ, Prosnitz D. Governing geoengineering research. A political and technical vulnerability analysis of potential near-term options. 2011. Disponible à l'adresse [http://www.rand.org/pubs/technical\\_reports/TR846.html](http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR846.html) [Consulté le 4 décembre 2013].
- Lenton TM, Vaughan NE. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2009, 9:5539-5561. doi:10.5194/acp-9-5539-2009
- Lenton TM. Arctic climate tipping points. *Ambio* 2012, 41:10-22. doi:10.1007/s13280-011-0221-x
- Liu D, Zhang PY, Wang JW. Photocatalytic degradation of methane under irradiation of vacuum ultraviolet light. *China Environmental Science* 2006, 26:653-656.
- Lobell DB, Bonfils CJ, Kueppers LM, Snyder MA. Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophysical Research Letters* 2008, 35:L09705. doi:10.1029/2008GL034145
- Long J, Rademaker S. The bipartisan policy center's Task Force on Climate Remediation Research, 2011. *Geoengineering: A national strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility,*

and consequences of climate remediation technologies, Bipartisan Policy Center (BPC). Disponible à l'adresse <http://bipartisanpolicy.org/library/report/task-force-climate-remediation-research> [Consulté le 4 décembre 2013].

Lovelock J. A geophysicist's thoughts on geoengineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2008, 366:3883–3890. doi:10.1098/rsta.2008.0135

Lovelock JE, Margulis L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaïa hypothesis. *Tellus* 1974, 26(1-2):2-10. doi:10.1111/j.2153-3490.1974.tb01946.x

Lukacs M. World's biggest geoengineering experiment « violates » UN rules. *The Guardian* 2012. Disponible à l'adresse <http://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering> [Consulté le 4 décembre 2013].

MacCracken MC. Geoengineering the climate. In UCRL-JC-108014. Paper prepared for submittal to Workshop on the engineering response to global climate change for Chapter 8: Control of greenhouse gas sinks and of climate. Palm Coast Florida, June 1-6, 1991, LLNL. Disponible à <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/218065.pdf>

MacCracken MC. Geoengineering: Worthy of cautious evaluation? *Climatic Change* 2006, 77:235-243. doi:10.1007/s10584-006-9130-6

MacDougall AH. Reversing climate warming by artificial atmospheric carbon-dioxide removal: Can a Holocene-like climate be restored? *Geophysical Research Letters* 2013, 40:5480–5485. doi:10.1002/2013GL057467

MacMartin DG, Keith DW, Kravitz B, Caldeira K. Management of trade-offs in geoengineering through optimal choice of non-uniform radiative forcing. *Nature Climate Change* 2013, 3:365-368. doi:10.1038/nclimate1722

Macnaghten P, Szerszynski B. Living the global social experiment: An analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance. *Global Environmental Change* 2013, 23:465-474. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.12.008

Mandel GN, Gathii JT. Cost-benefit analysis versus the precautionary principle: beyond Cass Sunstein's laws of fear. *University of Illinois Law Review* 2006. 2006:1037-1080.

Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner GK, Edenhofer O, Stocker TF, Field CB, Elbi KL, Matschoss PR. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. *Climatic Change* 2011, 108:675-691. doi:10.1007/s10584-011-0178-6

Matsumoto K, Sarmiento JL, Brzezinski MA. Silicic acid leakage from the Southern Ocean: a possible explanation for glacial atmospheric  $p\text{CO}_2$ . *Global biogeochemical cycles* 2002, 16(3), doi:10.1029/2001GB001442

Meinhausen M, *et al.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 2011, 109:213-241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z

Mercer AM, Keith DW, Sharp JD. Public understanding of solar radiation management. *Environmental Research Letters* 2011, 6:044006. doi:10.1088/1748-9326/6/4/044006

Michaud L, Monrad B. Energy from convective vortices. *Applied Mechanics and Materials* 2013, 283: 73-86. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.283.73

Michaelson J. Geoengineering: a climate change Manhattan project. *Stanford Environmental Law Journal* 1998, 73, Disponible à l'adresse <http://www.metatronics.net/lit/geo2.html>.

Middelburg JJ, Meysman FJR. Burial at sea. *Science* 2007, 316:1294-1295. doi:10.1126/science.1144001

- Millard-Ball A. The Tuvalu syndrome Can geoengineering solve climate's collective action problem? *Climatic Change* 2012, 110:1047-1066. Disponible à l'adresse <http://ssrn.com/abstract=2028166>
- Ming T, de Richter R, Liu W, Caillol S. Fighting global warming by climate engineering: is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014, 31:792-834. doi:10.1016/j.rser.2013.12.032
- Mooney C. Copenhagen: Geoengineering's big break? *Mother Jones* 2009, Disponible à l'adresse <http://www.motherjones.com/environment/2009/12/copenhagen-geoengineerings-big-break> [Consulté le 4 décembre 2013].
- Moore JC, Jevrejeva S, Grinsted A. Efficacy of geoengineering to limit 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2010, 107:15699-15703. doi:10.1073/pnas.1008153107
- Moreno-Cruz JB, Keith DW. Climate policy under uncertainty: a case for solar geoengineering. *Climatic Change* 2013, 121:431-444. doi:10.1007/s10584-012-0487-4
- Niemeier U, Schmidt H, Timmreck C. The dependency of geoengineered sulfate aerosol on the emission strategy. *Atmospheric Science Letters* 2011, 12: 189-194. doi:10.1002/asl.304
- Owen R, Macnaghten P, Stilgoe J. Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Science and public policy* 2012, 39:751-760. doi:10.1093/scipol/scs093
- Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 1992. 28. Geoengineering. In *Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base*. Washington, DC, États-Unis: National Academy Press, p. 433-464. Disponible à l'adresse [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=1605](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=1605) [Consulté le 4 décembre 2013].
- Parson EA, Keith DW. End the deadlock on governance of geoengineering research. *Science* 2013, 339:1278-1279. <http://www.sciencemag.org/content/339/6125/1278.full.pdf>
- Persons TM. *Technology Assessment: Climate Engineering: Technical Status, Future Directions, and Potential Responses*, Washington, DC: General Accounting Office (GAO) 2011:135p. Disponible à l'adresse <http://www.gao.gov/products/GAO-11-71> [Consulté le 4 décembre 2013].
- Pidgeon N, Parkhill K, Corner A, Vaughan N. Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project. *Nature Climate Change* 2013, 3:451-457. doi:10.1038/nclimate1807
- Pielke R.A. An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. *Environmental Science & Policy* 2009, 12:216-225. doi:10.1016/j.envsci.2009.01.002
- Pongratz J, Lobell DB, Cao L, Caldeira K. Crop yields in a geoengineered climate. *Nature Climate Change* 2012, 2:101-105. doi:10.1038/nclimate1373
- Pongratz J, Reick CH, Raddatz T, Caldeira K, Claussen M. Past land use decisions have increased mitigation potential of reforestation. *Geophysical Research Letters* 2011, 38:L15701. doi:10.1029/2011GL047848
- Rasch PJ, Crutzen PJ, Coleman DB. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. *Geophysical Research Letters* 2008, 35:L02809. doi:10.1029/2007GL032179
- Rayner S. The geoengineering paradox. *The Geoengineering Quarterly* March, 20, 2010.

Rayner S, Redgwell C, Savulescu J, Pidgeon N, Kruger T. Memorandum on draft principles for the conduct of geoengineering research. *House of Commons Science and Technology Committee, The Regulation of Geoengineering*. [Consulté le 19 mars 2013]

Rayner S. *et al.* The Oxford principles *Climatic Change* 2013, 121:499-512. doi:10.1007/s10584-012-0675-2

de Richter R, Caillol S. Fighting global warming: The potential of photocatalysis against CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs, tropospheric O<sub>3</sub>, BC and other major contributors to climate change. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 2011, 12:1-19. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2011.05.002

de Richter RK, Ming T, Caillol S. Fighting global warming by photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> using giant photocatalytic reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 19:82-106. doi:10.1016/j.rser.2012.10.026

Ricke KL, Morgan MG, Allen MR. Regional climate response to solar-radiation management. *Nature Geoscience* 2010, 3:537-541. doi:10.1038/ngeo915

Robock A, Oman L, Stenchikov GL. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO<sub>2</sub> injections. *Journal of Geophysical Research* 2008, 113, D16101, doi:10.1029/2008JD010050

Robock A. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bulletin of the Atomic Scientists* 2008, 64:14-18. doi:10.2968/064002006

Robock, A, Marquardt AB, Kravitz B, Stenchikov G. The benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters* 2009, 36:L19703. doi:10.1029/2009GL039209

Rotenberg E, Yakir D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* 2010, 327:451-454. doi:10.1126/science.1179998

Roy SB, Traiteur JJ. Impacts of wind farms on surface air temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2010, 107:17899-17904. doi:10.1073/pnas.1000493107

Sarmiento JL, Gruber N, Brzezinski MA, Dunne JP. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature* 2004, 427:56-60. doi:10.1038/nature10605

Sassine M, Burel L, D'Anna B, George C. Kinetics of the tropospheric formaldehyde loss onto mineral dust and urban surfaces. *Atmospheric Environment* 2010, 44:5468-5475. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.044

Schlaich J. The solar chimney: electricity from the sun. 1995. Edition Axel Menges. Stuttgart. ISBN 3-930698-69-2.

Shepherd J. Geoengineering the Climate: Science, governance and uncertainty. *The Royal Society* 2009, 98 p. [http://eprints.soton.ac.uk/156647/1/Geoengineering\\_the\\_climate.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/156647/1/Geoengineering_the_climate.pdf)

Singh N, Abiven S, Torn MS, Schmidt MWI. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale. *Biogeosciences* 2012, 9:2847-2857. doi:10.5194/bg-9-2847-2012

Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 2002, 241:155-176. doi:10.1023/A:1016125726789

Smith J, Smith P, Wattenbach M, Zaehle S, Hiederer R. and al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology* 2005, 11:2141-2152. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x

Socolow R, Desmond M, Aines R, Blackstock J. *Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with chemicals, a technology assessment for the APS panel on public affairs*, 2011. American Physical Society.

SRMGI Solar Radiation Management Governance Initiative, *Solar radiation management: the governance of research*, 2011, Disponible à l'adresse <http://www.srmgi.org/report/>.



- Steffen W, Crutzen PJ, McNeill JR. The Anthropocene: Are Humans now overwhelming the great forces of nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 2007, 36:614-621.
- Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, McNeill J. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical transactions of the Royal Society* 2011, 369:842-867. doi:10.1098/rsta.2010.0327
- Stephens JC, Keith DW. Assessing geochemical carbon management. *Climatic Change* 2008, 90:217-242. doi:10.1007/s10584-008-9440-y
- Stewart CE, Paustian K, Conant RT, Plante AF and Six J (2007) Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry* 2007, 86:19-31. doi:10.1007/s10533-007-9140-0
- Stewart CE, Plante AF, Paustian K, Conant RT and Six J. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools. *Soil Science Society of America Journal* 2008, 72:379-392. doi:10.2136/sssaj2007.0104
- Stewart CE, Paustian K, Conant RT, Plante AF and Six J. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry* 2009, 41:357-366. doi:10.1016/j.soilbio.2008.11.011
- Tahir M, Amin NS. Recycling of carbon dioxide to renewable fuels by photocatalysis: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 25:560-579. doi:10.1016/j.rser.2013.05.027
- Teller E, Hyde R, Wood L. Global warming and ice-ages: I. Prospects for physics-based modulation of global change. *Paper prepared for submittal to the 22<sup>nd</sup> International Seminar on Planetary Emergencies*, Erice (Sicily) Italy, August 20-23 1997, Lawrence Livermore National Laboratory. Disponible à l'adresse [http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti\\_id=611779](http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=611779)
- Temple J. Looking to sky to fight climate change. *SFGate*. January 12 2013, Disponible à l'adresse <http://www.sfgate.com/science/article/Looking-to-sky-to-fight-climate-change-4170475.php#src=fb> [Consulté le 4 décembre 2013]
- Teuling AJ, *et al.* Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience* 2010, 3:722-727. doi:10.1038/ngeo950
- Thomson A. *et al.* RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 2011, 109:77-94. doi: 10.1007/s10584-011-0151-4
- Tilmes S, Garcia RR, Kinnison DE, Gettelman A, Rasch PJ. Impact of geoengineered aerosols on the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research* 2009, 114, D12305. doi:10.1029/2008JD011420
- Tollefson J. Geoengineering faces ban. *Nature* 2010, 468:13-14. doi:10.1038/468013a.
- Trainer VL, Wells ML, Cochlan WP, Trick CG, Baugh KA, Beall BF, Herndon J, Lundholm N. An ecological study of a massive bloom of toxigenic *Pseudo-nitzschia cuspidata* off the Washington State coast. *Limnology and Oceanography* 2009, 54:1461-1474
- Trenberth KE, Dai A. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters* 2007, 34:L15702. doi:10.1029/2007GL030524
- Van Vuuren D, den Elzen M, Lucas P, Eickhout B, Strengers B, van Ruijven B, Wonink S, van Houdt R. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change* 2007, 81:119-159. doi:10.1007/s10584-006-9172-9
- Vaughan NE, Lenton TM. A review of climate geoengineering proposals. *Climatic Change* 2011, 109:745-790. doi:10.1007/s10584-011-0027-7

- Vesterdal L, Clarke N, *et al.* 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management* 2013, 309:4-8. doi:10.1016/j.foreco.2013.01.017
- Virto I, Barré P, Burlot A, Chenu C. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry* 2012. 108:17-26. doi:10.1007/s10533-011-9600-4
- Wang C, Prinn RG. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2010, 10:2053-2061. doi:10.5194/acp-10-2053-2010
- Wang J, Pan X, Liu Y, Zhang X, Xiong Z. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant and Soil* 2012, 360:287-298. doi:10.1007/s11104-012-1250-3
- Wardle DA, Nilsson MC, Zackrisson O. Response to Comment on "Fire-Derived Charcoal Causes Loss of Forest Humus". *Science* 2008, 321:1295. doi:10.1126/science.1160750
- Whitman WB, Coleman DC, Wiebe WJ. Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 1998, 95:6578-6583.
- Williamson P, Wallace DWR, Law SC *et al.* Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection* 2012, 90:475-488. doi:10.1016/j.psep.2012.10.007
- Woolf D, Amonette JE, Street-Perrott FA, Lehmann J, Joseph S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 2010, 1: 1-9. doi:10.1038/ncomms1053

## 8. Annexes

### Annexe A: Deux concepts en rupture radicale pour épurer le CO<sub>2</sub> de l'environnement global

Le présent propos tend à stimuler une recherche technologique en gestion des concentrations de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère selon des voies d'innovation particulièrement radicale parce que reposant sur deux concepts en rupture assez forte avec le discours commun.

Le premier concept consiste à proposer la résorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique comme une prestation technique de dépollution globale indépendante des filières industrielles, notamment celles dépendant des énergies carbonées, offrant à la gouvernance internationale un référentiel financier physiquement objectif au travers de solutions pratiquement accessibles. De plus, les opportunités de sites de capture délocalisée et de séquestration ultime du CO<sub>2</sub> en seraient très fortement multipliées et optimisées.

Le second concept, consiste, dans ces opérations, à combiner la production, notamment grâce à des énergies décarbonées, de flux chimiques de bases fortes réactives avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique à une gestion dissociée des flux acides correspondants (CO<sub>2</sub> d'origine minérale ou autres acides minéraux plus forts). Ces pratiques sont alors proches des industries minérales (eau, minerais) susceptibles de les accompagner, quand elles ne les ont pas déjà intégrées dans leurs projets innovants notamment en hydrométallurgie.

La gouvernance globale des émissions de CO<sub>2</sub> rencontre actuellement des difficultés et pourrait bénéficier d'une offre d'innovation technologique plus dissociée des activités économiques émettrices. Les approches par grandes filières ont le mérite de rechercher des solutions intégrées à leur développement mais la contrepartie en est une certaine propension à des évolutions plus incrémentales que radicales.

Des offres par des écotecnologies additives et externes aux filières émettrices de rejets permettent à l'action publique de situer son intervention à un coût et selon des performances indépendants des outils et pratiques non collectifs des secteurs d'activités et en meilleure équité compétitive.

Même si elle n'est pas parfaite, considérons l'analogie avec la gestion technologique des déchets telle qu'elle s'est déroulée à partir du vingtième siècle. C'est la prise en charge par le service public local du traitement des ordures ménagères qui a permis d'élever le niveau de technicité de cette prestation. Ce n'est pas avec comme référence l'abandon en décharges sauvages sans l'offre d'alternatives techniques viables qu'une implication industrielle plus globale se serait initiée.

Ce n'est qu'une fois cette démarche stabilisée sur des pratiques établies que les discours sur la réduction à la source des déchets de la part des producteurs ont pu être tenus, avec les difficultés, lenteurs et artifices que l'on constate dans les approches filières par filières de produits de consommation. On conçoit alors qu'il pourrait en être quelque peu de même pour les émissions de CO<sub>2</sub>. La gouvernance mondiale de l'environnement mériterait de disposer de références technologiques de résorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique indépendantes et en aval des filières émettrices.

Par exemple, le dogme selon lequel le CO<sub>2</sub> doit être nécessairement capté là où il est émis parce que concentré est contestable i) parce que l'atout de génie de procédé de la concentration gazeuse industrielle en CO<sub>2</sub> est vite pénalisé par la brièveté des durées des échanges gazeux pour une capture lors de l'émission rapide ainsi que par des présences de produits indésirables lors de celle-ci, ii) parce que l'opération, consommatrice d'énergie, s'effectue souvent sur des sites où, par construction,

l'énergie, notamment fossile, a une très forte valeur puisque intensivement utilisée ou distribuée, et iii) parce qu'inapplicable aux sources diffuses.

On peut notamment concevoir, en fait de dispositifs de capture directe du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, une mise en contact beaucoup plus longue avec des surfaces d'échange gazeux plus pérennes que les gouttelettes d'un absorbeur industriel confiné. Le CO<sub>2</sub>, dont la diffusion gazeuse atmosphérique est très rapide, est alors captable en tout point de l'atmosphère, en proximité des sites requis pour sa gestion ultime (énergies renouvelables, stockage en sites alors plus nombreux, hors conflits d'usage...).

Une première rupture est donc de chercher à offrir à la gouvernance globale de l'environnement une offre éco-technologique viable et chiffrée en aval des filières émettrices, notamment apte à établir physiquement un coût collectif de la résorption du CO<sub>2</sub> indépendante de celles-ci et calibrant ainsi leur responsabilité mieux qu'un marché théorique et spéculatif de droits d'émissions.

Une seconde rupture concerne la dé-intensification, notamment énergétique, des procédés de captage et séquestration du CO<sub>2</sub>, justement dans le développement de ces écotecnologies de l'aval de son cycle. Il relève d'une approche de « géo-ingénierie raisonnable » parce qu'associant séquestration géologique ou minérale du carbone à une absorption du CO<sub>2</sub> à la concentration de l'atmosphère et en n'importe lequel de ses points par des systèmes utilisateurs d'énergies nouvelles ou dégradées en forte économie de ressources fossiles.

Là encore, on peut évoquer une analogie historique du vingtième siècle qui a vu apparaître la révolution de l'hydrométallurgie concurrençant la pyrométallurgie intensive en énergie thermique par le jeu de formes adoucies de l'énergie chimique en milieu aqueux. Cette énergie chimique est d'une gestion environnementale plus souple et peut bénéficier de formes d'énergies primaires localement diversifiées (décarbonées, renouvelables, bio-réactions,...) et se combiner avec des processus physico- et électrochimiques très sélectifs.

Le second concept alors avancé est de stimuler les fonctions d'acide faible et de dissolution aqueuse rapide du CO<sub>2</sub> : il s'agit de conjuguer des phases de production de bases fortes grâce à des énergies décarbonées avec celles de leur re-carbonatation avec une cinétique qui permet de travailler aux concentrations atmosphériques. En effet, si les temps géologiques permettent un rééquilibrage de l'acidification du CO<sub>2</sub> par l'altération de roches riches en alcalins et alcalinoterreux, sa cinétique pour le développement durable de l'humanité mérite d'être fortement améliorée.

On perçoit des opportunités de niches technologiques à faire réagir directement le CO<sub>2</sub> lors de l'échauffement de certains éléments de roches au cours de traitements des minerais métalliques mais plus globalement les processus thermiques vont énergétiquement souffrir de la faiblesse d'attaque de l'acide carbonique.

Les roches naturelles susceptibles de fournir des éléments de neutralisation du CO<sub>2</sub> sans en réémettre sont de fait assimilables à des bases très faibles réagissant très peu avec l'acide faible CO<sub>2</sub>. Le défi revient alors de fournir, au CO<sub>2</sub> atmosphérique, des milieux hydro-chimiques fortement basiques qui produiront une carbonatation rapide et des précipitations associées dont les cinétiques contrastent fortement avec la passivité des roches et des solides vis-à-vis du CO<sub>2</sub>. La production de ces milieux basiques forts s'équilibrera avec des flux d'acides faibles sous forme de CO<sub>2</sub>, ou d'acides minéraux plus forts. Il importera d'optimiser les recours énergétiques de ces produits. Comme vu pour l'hydrométallurgie, ces recours sont diversifiables (sources décarbonées), dissociables et objectivement chiffrables. Si l'on s'en tient à la production industrielle de milieux basiques forts, avec production de CO<sub>2</sub> (acide faible), ce dernier devra *in fine* être stocké physiquement. Par contre, si la production de milieux basiques forts est compensée par la production de flux acides minéraux forts, alors on pourra envisager de les neutraliser à partir de l'attaque de minéraux solides. Deux exemples de procédés relevant de brevets en cours de dépôts par le BRGM illustrent peu ou prou ces concepts.

Le premier (figure A.1) correspond à produire à partir d'un hydro-système salé des flux d'acides et de base fortes grâce à une électrodialyse, notamment alimentée en électricité photovoltaïque ou géothermique, pour répondre au cycle géochimique précédemment décrit d'attaque acide et de carbonatation basique. Une telle technique peut notamment se co-développer à la faveur de projets de dessalement ou encore d'attaque hydro-métallurgique acide de minerais (par exemple, la production *in situ* d'acide par énergie décarbonée produira par ailleurs les flux basiques de neutralisation de fin de processus sans recours à des carbonates naturels alors sources d'émissions de CO<sub>2</sub>).

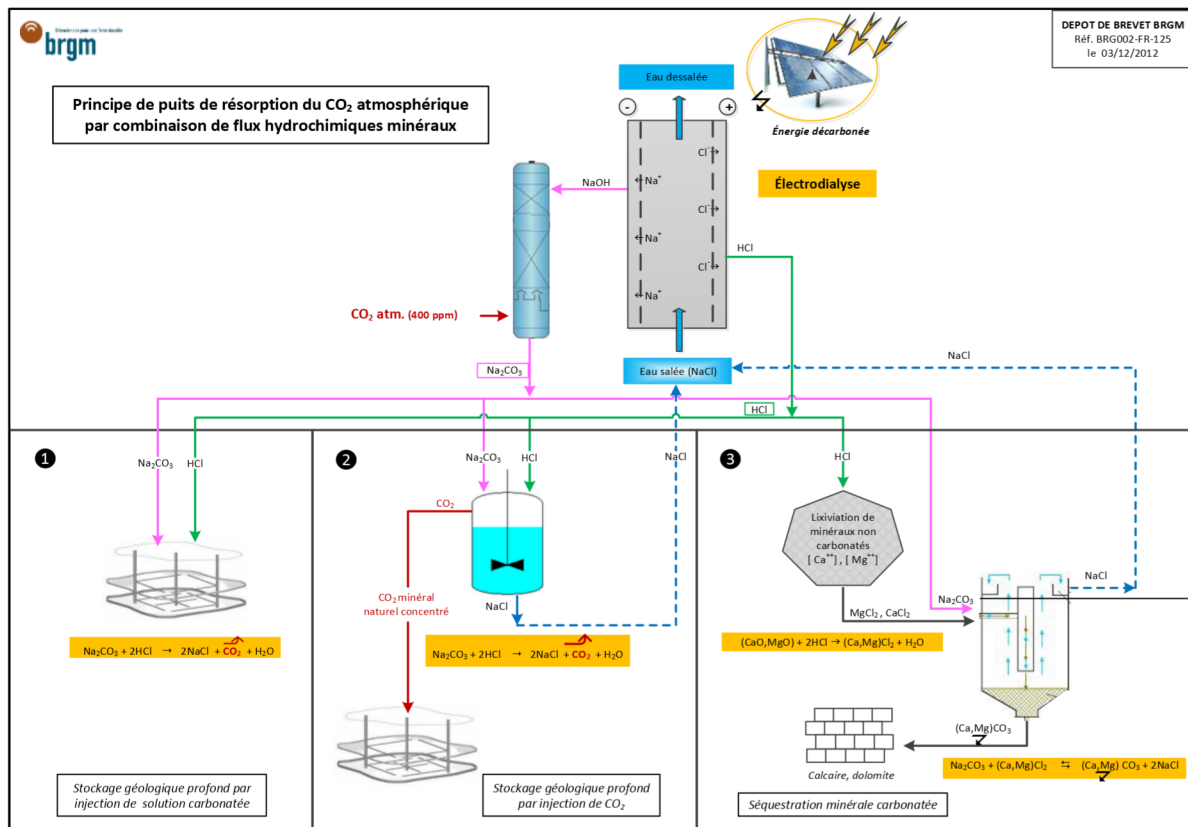
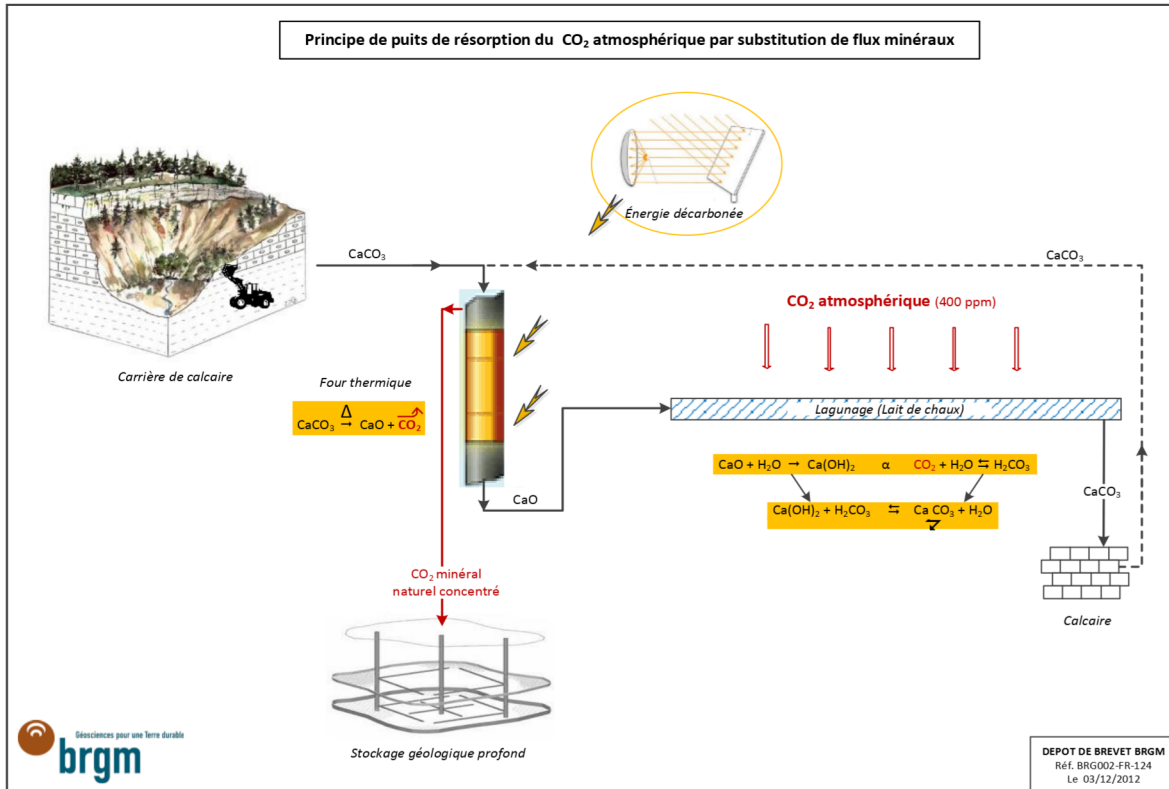


Figure A.1

Le second (figure A.2) se limite à un dispositif d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans un lagunage de lait de chaux. La chaux est initialement fournie par la calcination de roches calcaires abondamment distribuées à la surface du globe en four par exemple solaire, produisant un CO<sub>2</sub> naturel alors directement concentré (non dilué dans d'autres gaz) et propre, apte à être re-stocké profondément en site géologique confiné. Le bilan global est équivalent à une absorption en site industriel mais de fait sur un site optimisé au regard de ses ressources énergétiques notamment décarbonées et des proximités de stockage, gérant du CO<sub>2</sub> atmosphérique et du CO<sub>2</sub> naturel des roches, indépendamment des types et lieux d'émissions primaires.



**Figure A.2**

On perçoit que ces types de procédés sont très proches de la démonstration industrielle car enchaînant des opérations unitaires assez connues et ne nécessitant essentiellement qu'une ingénierie de calibrage. Ils ouvrent par contre des champs prospectifs importants pour sélectionner aussi bien les faciès pétrographiques naturels optimaux vis-à-vis des attaques acides que les sites géologiques favorables au stockage géologique profond potentiellement beaucoup plus nombreux, notamment en régions moins anthropisées, qu'en zones d'industries émettrices.

Ces procédés présentent de faibles emprises au sol (quelques hectares par million de tonnes de CO<sub>2</sub> annuellement absorbées) et correspondent à des confinements continentaux dont les aléas environnementaux apparaissent maîtrisables, les flux minéraux à gérer n'ayant rien d'extraordinaire en quantité et en qualité au regard des activités conventionnelles des industries extractives qui d'ailleurs pourraient les associer. Ils contrastent sur ce point avec d'autres concepts de « géo-ingénierie » spéculant sur des recours à des systèmes écologiques beaucoup plus ouverts et biodiversifiés (océans, atmosphères,...). Ils correspondent alors à un axe de recherche et développement se différenciant donc des programmes plus que prospectifs du mouvement dit de « géo- ingénierie » et d'autre part de ceux visant la valorisation industrielle du CO<sub>2</sub> comme voie de résorption.

En conclusion, nous retiendrons des premiers le concept d'une prestation de décarbonation de l'atmosphère globale techniquement indépendante des sources et filières émettrices et des seconds la proximité des pratiques et technologies innovantes. Face aux éclatements des divers lobbies énergétiques, face aux atouts de compétitivité procurés aux états par les énergies fossiles, la gouvernance globale du CO<sub>2</sub> mériterait de convertir un peu de ses efforts très en parole dans la recherche et développement d'outils physiquement techniques et raisonnablement accessibles sur le moyen terme dont l'offre collective concrète serait un fort dispositif de régulation. L'approfondissement de ces pistes technologiques devrait confirmer tout l'intérêt qu'il y a à considérer la gestion du CO<sub>2</sub> en regard de la dualité de son comportement gazeux et de son activité d'acidification. Au plan des opérations techniques de sa résorption, cette dualité peut être

séquencée puis recombinaison. Par contre, au regard des enjeux d'environnement, la dualité de l'effet de serre et l'acidification des milieux est à considérer en bilans globalisés et difficiles à dissocier.

## **Annexe B: Communication / Information / Débat public**

Les principes d'Oxford sont un code de conduite qui propose cinq principes destinés à guider la recherche en matière de géo-ingénierie. Les principes 2 et 3 font explicitement référence à la communication vers le public :

- 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 (deuxième principe);
- divulgation de la recherche et publication ouverte des résultats. Il est essentiel que tous les résultats de toute recherche, incluant des résultats négatifs, soient rendus publics (troisième principe).

On a pu constater que, dans de nombreux cas (OGM, nanotechnologies...), il n'est pas facile de communiquer pour que le grand public s'approprie le sujet dans toute sa complexité. Ceci est d'autant plus vrai qu'en matière de changement climatique il existe des incertitudes importantes.

### **Les risques de la communication**

Les risques de la communication sur la géo-ingénierie sont de deux types :

D'abord, il est toujours difficile de communiquer sur un sujet sur lequel il n'y a pas de documents de synthèse scientifiquement robustes. En matière de communication sur l'évolution future du climat, le fait de pouvoir s'appuyer sur des textes de référence (comme les rapports d'évaluation successifs du Giec, écrits et validés par des experts) est un atout énorme. Pour ce qui concerne la géo-ingénierie, nous ne pouvons actuellement nous appuyer que sur un nombre assez limité de travaux. La communication est donc plus risquée en l'absence d'un document (de synthèse) de référence émanant de la communauté scientifique, du type de ceux du Giec. Cependant par définition, ce type de document s'appuie sur de la littérature publiée, décrivant des résultats de travaux de recherche. Cette vision implique donc d'effectuer des recherches avant de communiquer. Mais, on peut aussi ouvrir le débat sur la nécessité de communiquer avant de procéder à des recherches, mêmes limitées au seul champ de la modélisation.

Ensuite, on peut toujours se poser la question du fait que la communication puisse légitimer la géo-ingénierie. Parler au public de géo-ingénierie, c'est en effet rendre la chose plus acceptable. D'une situation où le public ignorait que l'on puisse agir sur le climat, on passe à une situation où le grand public découvre des solutions qui peuvent passer comme des solutions miracle. Cela implique un risque de démobilisation par rapport à la lutte contre le changement climatique.

La communication sur la géo-ingénierie doit donc être un message d'information sur les options et sur les recherches en cours et possibles et non un message de promotion de technologies. Les dimensions philosophiques et éthiques doivent faire complètement partie de la communication sur la géo-ingénierie.

## Le besoin de communication

Au niveau international, des réunions et des auditions sont en cours aussi bien aux Etats-Unis, en Australie, en Allemagne qu'au Royaume-Uni. Par ailleurs, de plus en plus de personnes ont lu des articles de presse sur le sujet et savent maintenant ce qu'est la géo-ingénierie. Il est donc indispensable d'ouvrir un débat en France. D'autant qu'il y a un risque important pour la France de se trouver dans une position de réagir à un chantage du type « Si tu n'y vas pas, les autres iront à ta place ».

L'expérience des débats sur d'autres sujets technologiques sensibles doit être intégrée pour éviter les écueils rencontrés alors : en particulier le risque que le débat public échoue comme celui consacré aux nanotechnologies, et le risque de blocage comme sur le débat sur les OGM qui est resté très longtemps confiné au trio : gouvernants, scientifiques et industriels. Avant de communiquer, il faut se préparer et construire une expertise sachant que le sujet est polymorphe et nécessite d'évaluer l'ensemble des techniques présentées comme des solutions (choses monstrueuses, utopiques, faisables...). La communication nécessite qu'on parle de tous les problèmes et également des incertitudes. Elle ne prépare pas forcément à l'acceptabilité. La communication sur l'état de la recherche est différente de la communication pour promouvoir la géo-ingénierie.

Il est rappelé que lors de la conférence débat à l'Académie des Sciences du 25 juin 2013, la communication des incertitudes a été bien comprise. Il est possible de faire passer un message mesuré et axé sur l'information plutôt que la promotion. Le débat doit aussi insister sur la valeur éthique et la communication politique pour ne pas décourager les efforts d'atténuation.

## La communication des incertitudes

La communication nécessite qu'on parle de tous les problèmes et également des incertitudes, non seulement auprès du grand public, mais aussi auprès de tous les décideurs politiques qui vont être au contact de problématiques liées à la géo-ingénierie. Si les incertitudes ont fait l'objet de travaux très précis en ce qui concerne le changement climatique, ce qui n'est pas encore le cas des travaux sur la géo-ingénierie. A la fin du 21ème siècle, les scénarios d'émission ou de concentration en gaz à effet de serre et aérosols diffèrent suffisamment les uns des autres pour qu'un modèle particulier fournisse des projections climatiques significativement différentes selon le scénario choisi. Il s'agit là du premier type d'incertitude, celle liée au scénario socio-économique envisagé pour le futur. Cette incertitude est a priori « incompressible ». Le second type d'incertitude est lié au choix du modèle climatique : différents modèles prenant en compte le même scénario d'émission ou de concentration donne un ensemble de projections climatiques, ce qui donne une mesure de l'incertitude liée à la modélisation. Cette incertitude est « compressible », mais non-réductible à zéro. Dans le cas de la géo-ingénierie, il est possible de se livrer à des exercices similaires. Par exemple, Kravitz *et al.* (2013) ont estimé l'incertitude de la réponse climatique obtenue par un ensemble de modèles (GeoMIP) lorsque l'on procède à une réduction uniforme de la constante solaire visant à compenser l'impact d'un quadruplement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. En principe, il faudrait cependant reproduire l'exercice pour plusieurs techniques de géo-ingénierie. Il serait souhaitable de se limiter aux quelques techniques « acceptables », d'une part pour des questions (très pratiques) de coûts des simulations informatiques, d'autre part afin de fournir un message suffisamment clair. Cela n'est envisageable que dans le cadre d'une coordination très poussée des efforts de recherche au plan international (du type CMIP ou Giec). Il serait nécessaire de s'inspirer de la communication sur les incertitudes liées aux scénarios climatiques du Giec qui présente ses conclusions en précisant les points où il y a accord et les points où il y a désaccord. La solution serait de séparer les techniques mais avec le risque d'une multiplication de régulations contradictoires.



## Annexe C: Les recherches en géo-ingénierie dans le monde

L'ARP REAGIR s'est aussi intéressé à l'état des recherches en géo-ingénierie à l'international. Comment d'autres pays abordent-ils la recherche en géo-ingénierie, face à l'ambiguïté du sens de ce mot, à son image d'hubris inadmissible, et au risque moral associé (puisqu'on saura remédier demain, ne faisons rien aujourd'hui pour le climat) ? Cette description est motivée par deux questions sous-jacentes : Quelle est la place des recherches menées en France par rapport à celles conduites dans les autres pays, est-on « en retard » ? Quelles voies pourraient ou devraient être soutenues en France, dans un contexte où une stratégie tous azimuts est difficilement compatible avec une stratégie d'excellence ?

### Progression des publications sur l'ingénierie climatique

Les publications scientifiques concernant l'ingénierie climatique ne représentent qu'une petite fraction des publications en sciences du climat mais leur nombre progresse beaucoup plus vite que le nombre total de publications scientifiques dans la base Web of Science, depuis les années 2000 (Belter and Seidel 2012). La figure C.1 tirée de Belter et Seidel (2012) montre que la littérature sur l'ingénierie climatique s'organise en cinq thèmes : la fertilisation des océans ; la capture du dioxyde de carbone à partir de l'air ; l'amélioration ou la restauration des sols avec du charbon de bois pilé (biochar) ; les autres méthodes de séquestration du carbone dans les sols ; et enfin la gestion du rayonnement solaire. La majorité des recherches portent sur la capture et la séquestration du dioxyde de carbone, puisque les quatre premiers thèmes représentent 68 % des articles analysés. La gestion du rayonnement solaire représente seulement 13 % des articles. Cette orientation n'est pas toujours perçue dans la compréhension du terme « ingénierie climatique ». Pour beaucoup d'auditeurs, ce terme renvoie d'abord à la gestion du rayonnement solaire. L'effet de primauté, c'est-à-dire le fait qu'on accorde une attention plus grande à l'option à laquelle on a été exposé en premier, explique en partie ce biais.

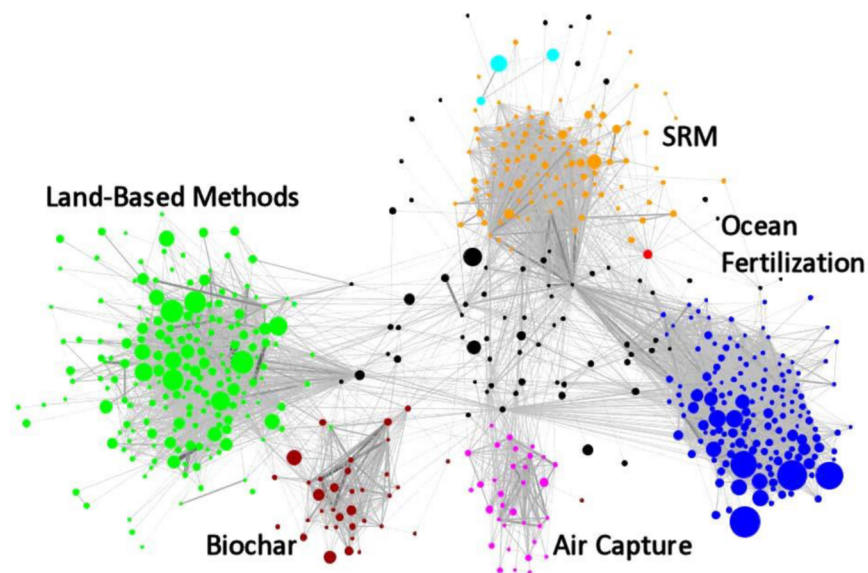


Figure C.1 : Organisation de la littérature scientifique sur l'ingénierie climatique. SRM = Solar Radiation Management (gestion du rayonnement solaire). Les nœuds colorés en noir représentent soit des articles généraux, soit des méthodes trop peu représentées dans la littérature pour constituer un groupe thématique visible. (Belter and Seidel 2012).

## La géo-ingénierie de l'environnement théorique

### Les thèmes de recherche scientifiques

Au-delà des sciences du climat, l'ingénierie climatique mobilise déjà des recherches en sciences économiques, politiques et sociales.

Les modèles de simulation numérique sont une catégorie importante d'instruments de recherche sur le système Terre. Govindasamy et Caldeira (2000) ont été parmi les premiers à utiliser cette approche pour étudier les effets de la gestion du rayonnement solaire. C'est aujourd'hui une voie de recherche en géo-ingénierie de l'environnement qui reste très active. Ainsi, le Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP, Kravitz *et al.*, 2011) se propose de comparer les résultats de différents modèles pour quatre expériences idéalisées ou d'émission d'aérosols de sulfate dans la stratosphère.

Au-delà des effets directs sur le bilan énergétique, les résultats obtenus par recherche sur la gestion du rayonnement solaire portent sur divers compartiments du système terre comme : l'élévation du niveau de la mer (Moore *et al.*, 2010) ; les rendements agricoles (Pongratz *et al.*, 2012) ; les réponses climatiques régionales (Ricke *et al.*, 2010; Robock *et al.*, 2008) ; ou encore les impacts sur les couches supérieures de l'atmosphère (Tilmes *et al.*, 2009).

A côté des modèles, voire avant eux, il existe une tradition de recherche plus globale du système Terre, qui s'intéresse aux bilans thermodynamiques globaux (Lovelock and Margulis 1974; Kleidon 2010). Lovelock (2008) compare l'état actuel de l'ingénierie du système Terre à la médecine du 19<sup>ème</sup> siècle, et rappelle à juste titre que la simulation numérique n'est pas un substitut acceptable pour l'expérimentation et l'observation. Un apport important de ces approches est d'accorder une grande attention au rôle de la vie dans l'homéostasie, ce que les modèles prennent difficilement en compte.

La perspective de coûts modérés par rapport à d'autres réponses possibles au changement climatique est l'une des justifications principales de l'intérêt pour la géo-ingénierie de l'environnement (Pielke Jr. 2009). Cet argument relève d'un bon sens certain : il est toujours utile d'avoir plus d'options à disposition pour répondre à un problème. Toutefois, il soulève aussi de nombreuses questions de recherche.

Les modèles technico-économiques servant à évaluer les coûts de la géo-ingénierie comportent de nombreuses hypothèses techniques idéalisées qui résistent rarement aux contingences matérielles de la construction d'un prototype, puis d'un pilote. Les évaluations de coûts pour les technologies futures sont biaisées puisqu'il n'existe pas de marché observable et seuls les promoteurs de la technologie, qui ont un intérêt à l'affaire, portent l'information. De plus, les coûts qui importent sont les coûts à long terme, après les effets d'apprentissage et d'échelle, et ceux-ci sont difficilement prévisibles. Le coût de la capture du dioxyde de carbone à partir de l'air est un exemple de telles controverses (House *et al.*, 2011)

À l'autre bout de l'échelle, l'analyse économique utilise aussi des modèles intégrés d'évaluation des stratégies optimales des politiques climatiques à l'échelle globale, à l'aide du paradigme du décideur bienveillant. Cette classe de modèles a d'abord été appliquée à l'étude de la politique climatique optimale compte tenu de la possibilité de capture directe à partir de l'air (Chen and Tavoni 2013; Keith *et al.*, 2006). L'analyse des réponses optimales face aux risques et aux incertitudes liées à la gestion du rayonnement solaire est aussi un thème récurrent dans ces recherches (Goes *et al.*, 2011; Moreno-Cruz and Keith 2012).

Les recherches sur la géo-ingénierie s'intéressent aussi aux implications juridiques, éthiques et de gouvernance (Hale and Dilling 2011; Michaelson 1998). Hulme (2012) attire l'attention sur le risque moral : si la gestion du rayonnement solaire est considérée comme « abordable » et « efficace », cela peut-il être un argument contre l'urgence de limiter la pollution aujourd'hui ? La possibilité de mise en œuvre unilatérale de certaines technologies pourrait changer les conditions de la négociation

climat (Barrett 2008). Un point de vue plus appliqué consiste à analyser les différentes attitudes que le gouvernement pourrait adopter vis-à-vis de la recherche sur la géo-ingénierie – du moratoire au laisser-faire. Lempert et Prosnitz (2011) comparent les conséquences de ces diverses options notamment en termes de sécurité nationale pour les Etats-Unis, alors que Bodansky (2013) adopte un point de vue plus global.

Les recherches en sociologie sur la connaissance et la perception de l'ingénierie climatique par le grand public sont encore rares et l'étude de Mercer *et al.* (2011) constitue l'un des premiers articles publiés sur le sujet. Les recherches analogues sur le stockage du CO<sub>2</sub> montrent qu'il convient d'utiliser avec prudence la notion « d'opinion publique » pour une technologie qui n'existe pas et qui est donc peu connue. Ce point est d'autant plus important que le sens du mot « géo-ingénierie » est ambigu voire manipulé.

Les recherches sur la géo-ingénierie comme « science en société » sont plus nombreuses et mieux fondées. La France est bien placée avec les travaux de Régis Briday et Mieke van Hemert sous la direction de Amy Dahan au centre A. Koyré. A l'étranger, Bellamy *et al.* (2012) ont examiné sous quel angle la géo-ingénierie était abordée dans les rapports d'évaluation sur cette technologie. Les auteurs ont montré que la technologie était en général considérée isolément des autres options de lutte contre le changement climatique, et plutôt sous un angle d'expertise technique. Ils en concluent que la fermeture des débats serait prématurée à ce stade.

## La place du Giec

Signe de l'intérêt que les politiques et les scientifiques portent à l'ingénierie climatique, le thème occupe une place croissante dans les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Giec), L'idée n'est pas encore mûre au point d'avoir suscité un rapport spécial du Giec sur la question, mais le thème a fait l'objet d'un séminaire de travail entre experts des trois groupes de travail à Lima en 2011 (Edenhofer *et al.*, 2011). L'ingénierie climatique est évoquée comme suit dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5). Le groupe de travail I examine les effets de la capture du CO<sub>2</sub> au chapitre 6, dans la section « Geoengineering involving the carbon cycle ». Il examine la gestion du rayonnement solaire et les cirrus au chapitre 7, dans la section « Geoengineering involving clouds and aerosols ». Enfin le chapitre 11 comporte une section sur les conséquences intitulée « Possible effects of geoengineering ». Le terme n'est pas employé dans le plan de travail du groupe II. Le plan de travail donné au groupe III prévoyait que le chapitre 5 traite de la géo-ingénierie avec une section « Carbon and radiation management and other geoengineering options including environmental risks ». Un tel mandat est toutefois difficile à porter dans un chapitre essentiellement consacré à l'analyse rétrospective. En effet, le chapitre 5 « Drivers, Trends and Mitigation » s'intéresse aux tendances lourdes concernant l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. De fait la section est échue au chapitre 6, qui traite d'évaluation intégrée des trajectoires de transformation. Dans la contribution du groupe III, la géo-ingénierie est aussi présente dans d'autres chapitres. Le chapitre 3 traite d'éthique et de justice, il discute les arguments moraux pour et contre ces technologies. Le chapitre 13 sur la coopération internationale examine « The special case of international cooperation regarding carbon dioxide removal (CDR) and solar radiation management (SRM) ». Cette présence se sent dans le chapitre 1 introductif qui évoque largement l'ingénierie climatique. Dans un entretien accordé à Tollefson (2010), Ottmar Edenhofer, économiste en chef au Potsdam Institute for Climate Impact Research in Germany et co-chairman du groupe III du Giec, remarque que les engagements de réduction d'émissions de gaz à effet de serre ne seront probablement pas suffisants pour atteindre les objectifs communément évoqués de limitation du changement climatique, comme un réchauffement inférieur à 1.5–2 °C à la fin du siècle.

*"Geoengineering is one option, and it should be included in a portfolio of other options" says Edenhofer.*

En clarification, le Giec a toutefois précisé ultérieurement qu'il ne recommandait aucune stratégie d'atténuation ou politique climatique, et qu'il ne recommandait pas la géo-ingénierie comme une façon de limiter le réchauffement global à 1.5-2 °C à la fin du siècle.

### La place dans les médias

Episode	Sujet	Note sur les résultats
<b>Wrapping Greenland</b>	Seeing if glacier melting on Greenland can be prevented by wrapping them in blankets. White tarps, held in place by bamboo, were used on two acres.	Test results better than expected. Material saved and compressed ice by two feet, saved 5000 tons of ice from melting. Ramping up to full scale to cover all of Greenland would cost \$400 billion for 771 million blankets, plus delivery and wages.
<b>Raining Forests</b>	Led by scientist Mark Hodges, they attempt to reforest areas of bare Earth from helicopters using canisters holding a tree seedling.	Fail: The propagules were unable to take root after three months.
<b>Brighter Earth</b>	Led by atmospheric physicist John Latham and engineer Stephen Salter, the team attempted a cloud reflectivity enhancement experiment. Geoengineer regular clouds. Use sea water to redistribute the molecules of water in clouds to redirect more sunlight back into space.	Water jet: fail. Particles created averaged 14 microns, the goal was about 1 micron.  Salt flares: success. 300 flares set off simultaneously off the back of a boat. Particles were carried up in thermals into the condensing layer. Created cloud about 100 feet wide by about 4 miles long, volume about six million cubic meters.
<b>Infinite Winds</b>	Testing of a revolutionary wind turbine led by engineer Fred Ferguson in an attempt to harness the energy of high-altitude winds.	200W produced. Not geoengineering by most definitions.
<b>Hungry Oceans</b>	Dr. Brian von Herzen and the Discovery team join Professors David M Karl (University of Hawaii) and Ricardo M Letelier (Oregon State University) to test wave powered pumps in an effort to bring nutrients from the depths of the oceans to the surface.	Mixed results. First pump failed completely, second pump worked for half a day.
<b>Space Sunshield</b>	Attempting to create a 100,000-square-mile (260,000 km <sup>2</sup> ) sunshade by placing trillions of lenses in space, led by astronomer and professor Roger Angel.	Fail. Rocket crashed, everything destroyed.
<b>Orbital Power Plant</b>	Former NASA physicist John Mankins's vision of launching thousands of satellites into space, gathering solar energy from the Sun and beaming it down to Earth as microwave energy.	Not geoengineering by most definitions.
<b>Fixing Carbon</b>	Testing to see if the air can be scrubbed clean of its carbon dioxide. David Keith builds a machine prototype that sucks air into one end and sprays with a sodium hydroxide solution, then expelling clean air out.	Capture work, but there was no storage.

Tableau C.1 : Programme des épisodes de la série documentaire « Project Earth ».

Le sujet de la géo-ingénierie a déjà trouvé une petite place dans les pages à vocation scientifique et technique des médias grand public (voir par exemple Science et Vie hors série n°240 « Le climat » pages 158 à 162 ; Science et Vie n° 1071, pages 56 à 67 ; Libération du 8 avril 2013 ; Le Monde du 30 septembre 2006 ; épisode de X:enius du 15 février 2013 sur Arte ; La Tribune du 18 juin 2012 ; La Recherche du 19 juin 2012).

À l'étranger, l'émission Project Earth, une série diffusée sur Discovery Channel aux Etats-Unis en 2008, constitue l'un des documentaires les plus volumineux autour de la géo-ingénierie. En effet, chacun des huit épisodes de cette série examinait un groupe de scientifiques qui étudient une approche radicale pour lutter contre le changement climatique. Le tableau ci-dessous donne le programme, où l'on constate que la bonne télévision et la bonne science sont deux univers bien différents.

### **La recherche de terrain**

Parallèlement à la recherche théorique examinée plus haut, nombre de projets et expériences prennent déjà place sur le terrain. Cette section en examine trois catégories : les expériences de capture directe du CO<sub>2</sub> à partir de l'air ; les expériences de fertilisation océanique ; et les expériences de modification du temps même si ce dernier point ne relève pas de la géo-ingénierie du climat.

### **La capture directe structurée par le mécénat privé**

La recherche sur la capture directe se caractérise par un soutien privé certes limité mais important au regard de la faiblesse des financements publics. Les deux programmes privés majeurs dans le champ sont le Virgin Earth Challenge et le Fund for Innovative Climate and Energy Research (FICER).

Le Fund for Innovative Climate and Energy Research (FICER) est un programme de subvention directe à la recherche. Abondé par Bill Gates sur fonds personnels, il est géré à l'université de Calgary par D. Keith et K. Caldeira. Depuis 2007, il a supporté treize projets de recherche et des conférences, pour un montant total de 4,6 millions de dollars. Différents aspects de l'ingénierie climatique ont été supportés, en particulier le développement de technologie de capture du CO<sub>2</sub> à partir de l'air et des analyses des technologies et politique climat avec modélisation du système climatique.

Le Virgin Earth Challenge est une compétition visant à récompenser l'invention d'une technologie économiquement viable et écologiquement durable pour retirer les gaz à effet de serre de l'atmosphère. Le prix est de 25 millions de dollars américains. Le jury se compose de James E. Hansen, Tim Flannery, James Lovelock, Crispin Tickell, Al Gore et Richard Branson qui est à l'initiative du prix.

Il s'agit là d'une opération de structuration de l'innovation privée. Cette méthode s'inscrit dans une tradition établie de stimulation de la recherche en ingénierie. Cette tradition a connu un certain renouveau depuis le milieu des années 1990, avec le DARPA, la NASA ou encore le X prize, lancé en 1996 pour promouvoir l'accès à l'espace. Ce dernier s'appuyait sur le modèle du Orteig prize pour le vol transatlantique, gagné en 1927 par Lindbergh. La tradition remonte même à 1714, année où le gouvernement anglais a lancé un prix pour une invention permettant de déterminer la longitude.

Tout en reconnaissant que le prix ne saurait être décerné avant de nombreuses années, le jury a retenu les onze finalistes représentés. Ces onze finalistes représentent cinq voies de capture différentes.

Trois compagnies sont sur le biochar (Woolf *et al.*, 2010) :

- **Biochar Solutions** produit et installe des équipements industriels de pyrolyse contrôlée de résidus forestiers. Leur B-1000 peut coproduire par heure environ 60 kilos de charbon de bois et de la chaleur.
- **Black Carbon** produit et installe des équipements industriels de pyrolyse contrôlée de résidus forestiers avec cogénération. Leur BC300 peut coproduire par heure 35 kW d'électricité tout en générant 25 kg de charbon de bois et 110 kW d'eau chaude pour le chauffage urbain.
- **Full Circle** a développé des technologies de pyrolyse et viserait les grands marchés agricoles, sans référence précise toutefois.

Cinq finalistes proposent des technologies de capture directe du CO<sub>2</sub> à partir de l'air par des solvants chimiques (Stephens and Keith, 2008) :



Figure C.2 : Finalistes du Virgin Earth Challenge

- **Carbon Engineering** développe sur la base de technologies industrielles existantes. Leur prototype a la taille d'un conteneur de 40 pieds environ. Durant l'été et l'automne 2012, il a capturé 2 tonnes de CO<sub>2</sub>. Leur programme pour 2013-2015 est de construire un pilote intégré de bout en bout. Leur stratégie est d'insérer la capture directe dans le cycle de production de carburants liquides : production de CO<sub>2</sub> pour la récupération assistée du pétrole, pour la culture des algues, ou pour la synthèse directe de carburants.
- **Climeworks** développe une technologie dont le cycle de régénération utilise de l'énergie de basse qualité : de la chaleur à moins de 100°C. Ils opèrent un démonstrateur mobile de capacité d'une tonne de CO<sub>2</sub> par an (4 kg par jour) et prévoient la disponibilité à l'échelle industrielle pour 2015.
- **COAWAY** se propose d'utiliser les tours de refroidissement existantes pour la séparation multiphasique et la régénération à basse température également.
- **Global Thermostat's** utilise la chaleur résiduelle des procédés industriels pour leur process. Le pilote opérationnel est sis à SRI International, Menlo Park, CA.
- **Kilimanjaro Energy** utilise un adsorbant qui capte le CO<sub>2</sub> quand il est sec mais le relâche quand il est humide (Gunter 2011).

Enfin trois compagnies explorent d'autres voies :

- **Biorecro** est une société de services spécialisée dans l'énergie de la biomasse avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (BECCS). La compagnie a par exemple participé au panel d'experts pour le projet d'Archer Daniels Midlan à Decatur, Illinois, projet de captage et injection du CO<sub>2</sub> sur une unité de production de méthanol biocarburant.
- Le **Savory Institute** promeut un modèle d'exploitation agricole qui permet une utilisation durable des savanes et prairies : la gestion holistique des troupeaux. Le système est basé sur la compréhension de la dynamique naturelle entre les troupeaux de grands herbivores sauvages, leurs prédateurs et le milieu. Il permet de restaurer la qualité des sols, donc leur contenu en carbone.
- **Smart Stones** étudie la minéralisation du CO<sub>2</sub> ex-situ par réaction avec les olivines, un minéral silicaté abondant dans la croûte terrestre. Ils proposent de co-produire les olivines lors de l'extraction de minerais dans de grandes mines à ciel ouvert -de nickel par exemple-, de les broyer très finement (100 microns) et de les répartir quelques centaines de kilomètres à la ronde.

### La fertilisation des océans en posture de précaution

La fertilisation des océans se caractérise par une recherche académique expérimentale internationale d'intérêt écologique et océanographique bien encadré, mais à l'image troublée par l'action de quelques francs-tireurs entrepreneurs.

Boyd *et al.* (2007) font la synthèse de 12 expériences de fertilisation des océans par ajout de fer, entre 1993 et 2005. Ces expériences montrent sans équivoque que le fer est facteur limitant dans un tiers des surfaces de l'océan. Elles montrent que la disponibilité en fer contrôle la dynamique des efflorescences algales (plankton bloom), qui affectent les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore, du silicium et du soufre, qui eux-mêmes influencent le climat.

Stimuler une floraison algale n'implique pas que du carbone soit transféré dans les couches profondes de l'océan. L'expérience LOHAFEX (Indian and German Iron Fertilization Experiment) en 2009 le montre. L'épandage de sels ferriques sur quelques 900 kilomètres carrés dans l'Atlantique sud a bien conduit à une efflorescence de phytoplancton. Mais ce plancton ne contenait pas de diatomées, auxquelles il manquait un autre nutriment essentiel. En leur absence, la séquestration de carbone a été faible car les autres phytoplanctons sont vulnérables à la prédation par le zooplancton et ne coulent pas rapidement après leur mort. L'expérience a donc montré que le choix du lieu de fertilisation était crucial pour l'efficacité de la séquestration.

Ces résultats impliquent aussi que le système n'est pas assez connu pour être un levier de géo-ingénierie. La science devrait comprendre l'ensemble des facteurs biogéochimiques comme les dérivés azotés, les phosphates, le rôle des cendres volcaniques, valider les simulations numériques, être capable de connaître l'état de base, le fonctionnement des écosystèmes. Il serait aussi nécessaire de disposer de moyens fiables pour observer les changements induits notamment le transfert du carbone vers les couches profondes qu'on cherche à provoquer. Dans l'ensemble, les chercheurs concluent que la science ne permet pas aujourd'hui d'évaluer les risques et les bénéfices de la fertilisation de l'océan (Buesseler *et al.*, 2008; Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2009).

Cette position n'empêche pas quelques entrepreneurs d'envisager la fertilisation de l'océan sur une base commerciale.

- La société **Ocean Nourishment Corporation** (ONC) créée en 2004 est positionnée sur l'expertise technique dans le domaine de la fertilisation des océans. Ses deux axes stratégiques sont la durabilité des systèmes alimentaires et la séquestration biologique du carbone. Elle propose de la recherche académique et des études de faisabilité.

- La société **Climos** se proposait de commercialiser des services de fertilisation des océans par le fer pour capter le CO<sub>2</sub>. Dan Whaley a annoncé la cessation d'activité en février 2011, lorsqu'il a rejoint le consortium ISIS (*in situ iron studies*).

- En 2008 la compagnie Planktos de Russ George a été conduite à abandonner un projet de fertilisation des océans par le fer et de vente de certificats de réduction volontaire pour ne pas avoir pu lever les fonds nécessaires et suite à une controverse sur le bien-fondé de la mission (Courtland 2008). En 2012, la compagnie Haida Salmon Restoration Corporation du même Russ George (illustration ci-dessus) a épandu 100 tonnes de sulfate de fer dans l'océan Pacifique, 200 miles à l'ouest des îles Haida Gwaii, archipel canadien au large de la Colombie Britannique. Une efflorescence algale a bien été observée, ce qui pourrait en faire l'acte de géo-ingénierie le plus étendu à ce jour (Lukacs 2012). Les critiques accusent l'opération de violer le droit international, plus précisément la Convention de Londres et la Convention sur la Biodiversité (voir ci-dessous).

Enfin, sans que cela soit de la fertilisation, Cquestrate (Tim Kruger) propose de capturer le dioxyde de carbone atmosphérique par épandage de chaux dans l'océan, avec le co-bénéfice de lutter contre l'acidification. La chaux serait produite par calcination du calcaire, et le CO<sub>2</sub> dégagé à ce stade pourrait servir à fertiliser des algues pour produire des biocarburants. Subventionné initialement par deux bourses de Shell, le projet adopte aujourd'hui une posture « open source » innovante dans le champ.



Figure C.3 : Navire de Planktos en opération.

### L'injection de particules atmosphériques

Cette section montre que les recherches à l'international sur la gestion du rayonnement solaire se déroulent dans des contextes divers, et que ce qui peut être inacceptable dans un pays peut très bien être pratiqué sans problème ailleurs.

Le Marine Clouds Brightening (MCB) consiste à injecter de l'eau dans l'atmosphère au-dessus des océans afin d'augmenter la réflectivité des nuages marins (Latham *et al.*, 2012). Le projet **Silver Lining**, par exemple, examine l'idée d'une flotte de navires injecteurs. FICER a financé une partie des recherches sur la faisabilité sans aller jusqu'à l'expérimentation de terrain qui exigerait des développements technologiques en particulier au niveau des dispositifs d'injection (Temple 2013).

Le Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) est un projet de recherche britannique, dont le but est d'étudier la possibilité d'injecter des particules dans la stratosphère afin de réfléchir les rayons du soleil et d'ainsi modifier le climat rapidement. Il est financé publiquement par l'EPSRC/NERC à la suite d'un «sandpit» qui a sélectionné deux projets (SPICE et IAGP) et se



déroule d'octobre 2010 à mars 2014. Le projet prévoyait un volet expérimental à petite échelle en extérieur. Il consistait à nébuliser 30 g d'eau par seconde à une hauteur de 1 km. Suite à des controverses sur la géo-ingénierie, ce volet a été différé de six mois en octobre 2011, avant d'être purement annulé en mai 2012. Le coordinateur a cité deux raisons pour cette annulation : premièrement certains participants avaient pris des brevets sur la technologie étudiée, ce qui générait des conflits d'intérêt potentiel ; et deuxièmement on ne disposait pas du cadre réglementaire pour ce type de projet sur la géo-ingénierie (Pidgeon *et al.*, 2013).

Le blocage du projet SPICE contraste avec la situation ailleurs dans le monde. En Russie par exemple, l'académicien réputé Yuri A. Izrael (2009a; 2009b; 2011) et son équipe pratiquent une recherche de terrain en géo-ingénierie sur la gestion du rayonnement solaire. L'injection d'aérosols s'est faite à partir d'hélicoptères à 200 m d'altitude (Mooney, 2009).

Les techniques de gestion du rayonnement solaire se rapprochent –ne serait-ce que dans l'esprit des gens– des techniques de modification du temps, dont la pratique est acceptée et continue dans de nombreux pays, malgré une efficacité qui est loin d'être établie. La technique d'ensemencement des nuages a été lancée en France dans les années 50 pour lutter contre les ravages de la grêle sur les cultures, qui s'élèvent à plusieurs centaines de millions d'euros par an d'après l'ANELFA (Association nationale d'études et de lutte contre les fléaux atmosphériques).

La modification du temps peut viser à faire pleuvoir pour lutter contre la sécheresse, à des fins agricoles ou pour améliorer la qualité de l'air. La Chine a probablement le plus important programme au monde. Le Beijing Municipal Meteorological Bureau aurait ainsi tiré plus de mille fusées pour garantir contre la pluie la cérémonie d'ouverture des jeux olympiques en 2008.

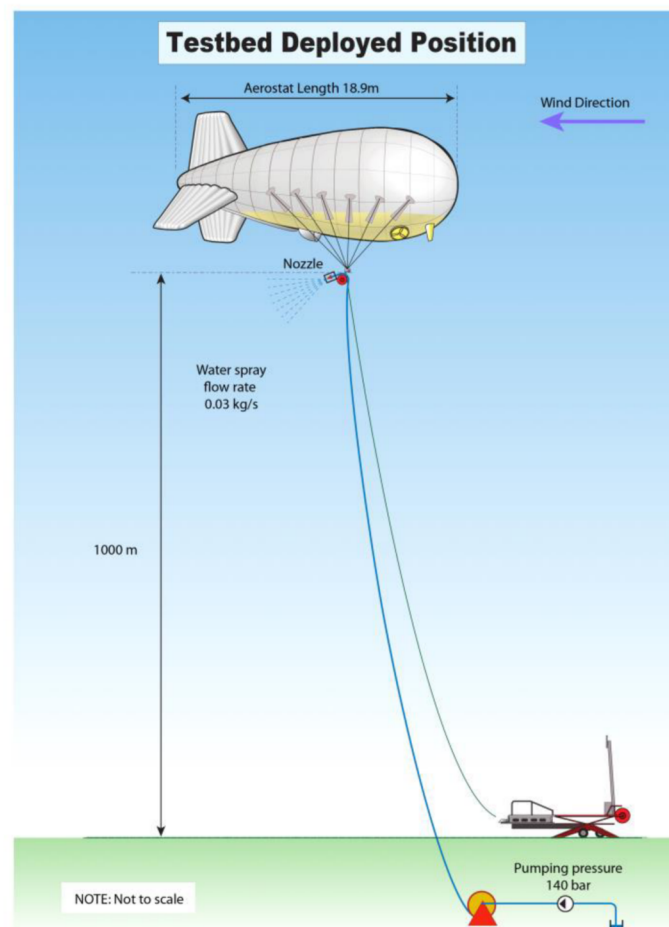


Figure C.4 : Dispositif expérimental du projet SPICE.

## Principes, politiques et programmes

La géo-ingénierie de l'environnement est une technologie duale (civile et militaire), dont les risques potentiels pour l'environnement sont d'une échelle extrême, et qui intervient en réponse à un problème de risque lui-même controversé. La conduite de la recherche dans ce domaine s'accompagne d'une approche réflexive sur les principes et les raisons qui sous-tendent cette recherche. Ces réflexions prennent place dans des instances politiques (comme la convention sur la biodiversité), académiques (Oxford), ou parfois les deux.

### La convention sur la diversité biologique

La Convention sur la Diversité Biologique (CDB) est un traité international signé au sommet de la Terre de Rio en 1992. Cette convention est ratifiée à ce jour par environ 190 pays, dont la France le 1<sup>er</sup> juillet 1994. Cette convention vise trois objectifs : la conservation de la biodiversité ; l'utilisation durable des espèces et des milieux naturels ; et le partage juste et équitable des bénéfices issus de l'utilisation des ressources génétiques. Comme tous les traités internationaux, la CDB est n'engage que les États qui l'ont ratifiée. De plus la Conférence des Parties à la CDB jouit d'une légitimité pour se prononcer sur la géo-ingénierie de l'environnement. Elle l'a fait à deux reprises, en 2008 et en 2010.

En mai 2008 à Bonn, la Conférence des Parties à la CDB a demandé un moratoire sur la fertilisation des océans par le fer (Convention sur la Diversité Biologique 2008 alinéa C.4) :

*Compte tenu de l'analyse scientifique et juridique en cours menée en vertu de la Convention de Londres (1972) et du Protocole de Londres de 1996, prie les Parties et exhorte les autres gouvernements, en application des principes de précaution, de s'assurer qu'il n'y aura pas d'activités de fertilisation des océans tant qu'il n'existera pas de fondement scientifique qui justifie de telles activités, y compris l'évaluation des risques associés, et qu'un mécanisme de réglementation et de contrôle efficace, mondial et transparent ne sera pas en place pour ces activités, sauf pour les recherches scientifiques de petite échelle menées dans des eaux côtières. Ces études ne devraient être autorisées que lorsque la nécessité de recueillir des données scientifiques la justifie. Elles doivent faire l'objet d'une évaluation préalable approfondie des risques potentiels des études de recherche sur l'environnement marin, et être strictement contrôlées. Elles ne doivent pas être utilisées pour produire et vendre des contreparties d'émissions de la fixation de carbone ou à toute autre fin commerciale.*

Ce moratoire entravait en particulier les plans d'entreprises comme Planktos à l'époque. Il a conduit le gouvernement allemand à reporter mais non à annuler la mission LOHAFEX (voir section ci-dessus).

En juin 2010 à Nagoya, la Conférence des Parties à la CDB a étendu cette demande de moratoire à l'ensemble des activités de géo-ingénierie (Convention sur la Diversité Biologique 2010 alinéa 8.w et note 3)

*S'assurer, conformément à la décision IX/16 C sur la fertilisation des océans, la diversité biologique et les changements climatiques, et en l'absence de mécanisme réglementaire, de contrôle efficace, transparent, global et à base scientifique pour la géo-ingénierie, et conformément à l'approche de précaution et à l'article 14 de la Convention, qu'aucune activité de géo-ingénierie liée aux changements climatiques n'est entreprise, qui pourrait avoir un impact sur la diversité biologique, tant qu'il n'existe pas de base scientifique adéquate permettant de justifier de telles activités et d'examen approprié des risques associés pour l'environnement et la diversité biologique ainsi que des impacts sociaux, économiques et culturels associés, à l'exception des études de recherches scientifiques à petit échelle qui pourraient être menées dans un environnement contrôlé, conformément à l'article 3 de la Convention, et seulement si elles sont justifiées par le besoin de rassembler des données*

scientifiques et sont sujettes à une évaluation préalable approfondie des impacts potentiels sur l'environnement ;

[note de bas de page :

*Sans porter préjudice aux futures délibérations sur la définition des activités de géo-ingénierie, étant donné que toute technologie qui réduit délibérément le rayonnement solaire ou augmente la séquestration du carbone de l'atmosphère à grande échelle et qui pourrait affecter la diversité biologique (à l'exclusion de la capture et du stockage du carbone par les carburants fossiles quand le dioxyde de carbone est capturé avant d'être émis dans l'atmosphère) doit être prise en compte comme formes de géo-ingénierie pertinentes pour la Convention sur la diversité biologique jusqu'à ce qu'une définition plus précise soit élaborée. A noter que le rayonnement solaire est défini comme une mesure de l'énergie de la radiation solaire reçue sur une surface donnée, à une heure donnée, et que la séquestration du carbone est définie comme le processus d'augmentation du contenu en carbone d'un réservoir/réserve autre que l'atmosphère. ]*

Cette décision demande donc aux Parties de limiter la géo-ingénierie aux recherches scientifiques à petite échelle, menées dans un environnement contrôlé, scientifiquement justifiées et avec une évaluation préalable des impacts sur l'environnement.

### Les principes d'Oxford

• Geoengineering to be regulated as a public good
• Public participation in geoengineering decision-making
• Disclosure of geoengineering research and open publication of results
• Independent assessment of impacts
• Governance before deployment
<i>Tableau : Les « principes d'Oxford » sur la géo-ingénierie. Source : Oxford Geoengineering Programme <a href="http://www.geoengineering.ox.ac.uk">http://www.geoengineering.ox.ac.uk</a></i>

Le programme de recherche de l'Université d'Oxford sur la géo-ingénierie a proposé un jeu de cinq principes (voir tableau) pour guider le développement de ces technologies :

#### **Principe 1 : La géo-ingénierie doit être régulée comme un bien public.**

*Il ne s'agit pas d'interdire l'implication du secteur privé dans la provision des techniques de géo-ingénierie. Elle pourrait même être encouragée pour s'assurer qu'une technologie appropriée soit développée et déployée de façon efficace et à temps. Mais la régulation de telles techniques devrait être entreprise dans l'intérêt du public par les institutions appropriées au niveau national et/ou international.*

Ce principe s'oppose par exemple aux expériences privées comme Planktos. Il questionne l'appropriation des technologies de manipulation du climat, qui a déjà commencé avec les prises de brevets (Bronson *et al.*, 2010).

#### **Principe 2 : Participation du public à la prise de décision sur la géo-ingénierie**

*Autant que possible, les personnes chargées de la recherche en géo-ingénierie devraient être tenues d'informer, consulter et, idéalement, obtenir le consentement éclairé préalable de ceux*

*qui sont touchés par les activités de recherche. L'identité des parties concernées dépendra de la technique étudiée.*

*Par exemple, une technique qui capte le dioxyde de carbone de l'air et le stocke sous le territoire d'un seul État exigera probablement consultation et accord au niveau national et local, alors que une technique altérant l'albédo de la planète par l'injection d'aérosols dans la stratosphère nécessitera accord global.*

Ce principe pose un style de gouvernement particulier. On peut se demander s'il est universel, mais la question de savoir si la démocratie est la forme d'organisation sociale la plus efficace pour atteindre les objectifs écologiques dépasse largement le cadre de ce rapport.

### **Principe 3 : Révélation des résultats de la recherche en géo-ingénierie et libre accès aux résultats publiés**

*Il devrait y avoir une divulgation complète des plans de recherche et de publication ouverte des résultats afin de faciliter une meilleure compréhension des risques et de rassurer le public quant à l'intégrité du processus. Il est essentiel que les résultats de toutes les recherches, y compris les résultats négatifs, soient rendus publics.*

Ce principe s'oppose à des pratiques qui minent l'intégrité, la crédibilité et l'efficacité de la recherche, mais qui restent malheureusement trop répandues. La recherche privée n'a pas pour habitude de publier tous ses résultats, mais même la recherche publique tend à filtrer les résultats négatifs. La publication dans des supports non-immédiatement accessibles, par exemple des revues d'accès payant, reste encore une barrière dans beaucoup de domaines.

### **Principe 4 : Évaluation indépendante des impacts**

*Une évaluation des impacts de la recherche en géo-ingénierie devrait être menée par un organisme indépendant de ceux qui entreprennent la recherche. Lorsque les techniques sont susceptibles d'avoir un impact transfrontalier, l'évaluation doit être effectuée par le biais des instances régionales et / ou internationales appropriées. Les évaluations doivent traiter à la fois les impacts environnementaux et socio-économiques de la recherche, et aussi de l'atténuation des risques de verrouillage technologiques prématurés et des intérêts acquis.*

La question de l'indépendance se pose particulièrement pour ce style de recherche à grande échelle. On peut penser aux exemples du nucléaire ou du stockage du CO<sub>2</sub>. Les organisations compétentes sont peu nombreuses à l'échelle d'un pays. Il y a de plus une contradiction certaine entre être compétent et ne pas être impliqué dans la recherche sur le domaine.

### **Principe 5 : La gouvernance avant le déploiement**

*Toute décision en matière de déploiement ne doit être prise qu'avec des structures de gouvernance solides déjà en place, en utilisant les règles et les institutions existantes chaque fois que possible.*

## **Le rapport de la U.K. Royal Society**

Le rapport de la U.K. Royal Society sur l'ingénierie climatique (Shepherd 2009) est un document important dans la reconnaissance institutionnelle de ces technologies. Les résultats principaux sont :

- *La méthode la plus sûre et la plus prévisible pour modérer le changement climatique est de prendre rapidement des mesures efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.*

*Aucune méthode de géo-ingénierie ne peut offrir une solution alternative facile ou facilement acceptable au problème du changement climatique.*

- *Les méthodes de géo-ingénierie pourraient toutefois être potentiellement utiles à l'avenir pour augmenter des efforts suivis visant à atténuer le changement climatique en réduisant les émissions, et devraient donc faire l'objet de recherches et d'analyses plus détaillées.*
- *La géo-ingénierie du climat de la Terre est très probablement techniquement possible. Toutefois, la technologie pour le faire est à peine formée, et il y a des incertitudes majeures quant à son efficacité, ses coûts et ses impacts environnementaux.*
- *Les méthodes qui agissent rapidement en réfléchissant la lumière du soleil peuvent s'avérer inefficaces pour compenser les changements dans les régimes des précipitations et des tempêtes, et les modèles climatiques actuels ne sont pas suffisamment précis pour fournir une évaluation fiable de ces méthodes au niveau régional.*
- *Les méthodes qui agissent en enlevant des gaz à effet de serre de l'atmosphère présentent moins de risques, mais auraient un effet beaucoup plus lent sur la température mondiale. Ces méthodes pourraient éventuellement apporter une contribution importante à l'atténuation du changement climatique.*
- *L'acceptabilité de la géo-ingénierie sera déterminée autant par les questions sociales, juridiques et politiques que par des facteurs scientifiques et techniques. Il y a des problèmes de gouvernance sérieux et complexes qui doivent être résolus pour que la géo-ingénierie puisse devenir un jour une méthode acceptable pour modérer le changement climatique.*
- *Il serait très peu souhaitable que les méthodes de géo-ingénierie qui impliquent des activités ou des effets qui s'étendent au-delà des frontières nationales (autres que la simple capture de gaz à effet de serre dans l'atmosphère) soient déployées avant que les mécanismes de gouvernance appropriés soient en place.*

De plus, ce rapport formule des recommandations clés dont en particulier :

- *Les Parties à la Convention Climat doivent redoubler d'efforts pour atténuer le changement climatique et s'adapter à celui-ci, et en particulier accepter de réduire les émissions mondiales d'au moins 50% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2050 et plus par la suite. Aucune connaissance actuelle sur la géo-ingénierie ne justifie de diminuer ces efforts ;*
- *Les recherches et le développement d'options de géo-ingénierie doivent être entreprises afin de déterminer si des méthodes à faible risque pourraient être mobilisées si nécessaire pour réduire la vitesse de réchauffement global en ce siècle. Cela devrait comprendre un programme d'observations, le développement et l'utilisation de modèles climatiques et des expériences soigneusement planifiées et exécutées.*

Alors que les principes d'Oxford visaient à établir les conditions d'exercice de la recherche, les conclusions du rapport de la Royal Society sont plus politiques, elles visent à atténuer le risque moral « la géo-ingénierie est une excuse pour ne rien faire ». Le rapport a débouché sur une initiative internationale de gouvernance sur la gestion du rayonnement solaire (*SRM Governance Initiative*).

### **L'évaluation technologique aux Etats-Unis**

Socolow *et al.* (2011) ont conduit pour le compte de l'American Physical Society une évaluation des technologies de capture directe de gaz à effet de serre à partir de l'air.

Les conclusions sont les suivantes :

- *La capture directe n'est pas actuellement une approche économiquement viable pour atténuer le changement climatique.*
- *Les sources d'énergie à haute teneur en carbone ne sont pas des options viables pour alimenter les systèmes de capture directe.*
- *Dans une stratégie d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> cohérente, la capture directe n'est pas à déployer avant que presque toutes les grandes sources centralisées de CO<sub>2</sub> n'aient été éliminées à l'échelle mondiale.*
- *La capture directe peut avoir un rôle à jouer dans la lutte contre certaines émissions diffuses, telles que celles des bâtiments et des véhicules.*
- *Les modèles économiques des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à l'échelle du siècle qui présentent des trajectoires de concentration en cloche « overshoot » et comptent sur la capture directe devraient être considérés avec une extrême prudence.*
- *Pour que la capture directe soit économiquement viable, le stockage géologique du CO<sub>2</sub> doit être peu coûteux et disponible à grande échelle.*
- *Ceci n'apporte aucun crédit aux arguments en faveur d'un délai dans la réponse au changement climatique basés sur la disponibilité de la capture directe comme une stratégie de compensation.*

La négativité du ton tempère l'allant du secteur privé. Comme le rapport de la Royal Society, les orientations sont plus politiques que programmatiques. Les controverses sur le délai dans la réponse au changement climatique sont un débat dépassé dans beaucoup de lieux.

Le rapport de la U.S. Bipartisan Policy Center's Task Force (Long *et al.*, 2011) avait pour but d'apporter un éclairage stratégique consensuel à l'orientation de la recherche sur la géo-ingénierie aux États-Unis, en tenant compte des études précédentes (Persons 2011; Socolow *et al.*, 2011; Gordon 2010). Ces travaux étaient justifiés par deux propositions : *Les risques physiques du changement climatique sont réels et croissants ; et les risques de sécurité géopolitiques et nationaux de déploiement de technologies de remédiation climatique par d'autres pays ou des acteurs sont réels.*

En conclusion ce groupe de travail a recommandé que le gouvernement fédéral se lance dans un programme ciblé et systématique de recherche sur la remédiation climatique, afin que le pays dispose des connaissances nécessaires pour :

- *Juger si certaines techniques de remédiation climatique pourraient offrir une réponse significative aux risques du changement climatique,*
- *Évaluer les mesures que d'autres pays pourraient être en mesure de prendre, et mener les discussions internationales qui vont probablement émerger autour de ces questions dans les années à venir.*

Le groupe a souligné que la recherche sur la remédiation climatique n'est pas un substitut aux efforts d'atténuation et d'adaptation, et qu'il est beaucoup trop tôt pour envisager le déploiement de n'importe laquelle de ces technologies. La raison principale de la recherche, soutient le rapport, est de veiller à ce que les États-Unis aient la connaissance nécessaire – en sciences physiques et sociales, en sciences humaines, et dans la société civile – pour agir à bon escient si le système climatique passe un seuil critique et des mesures correctives rapides s'avèrent nécessaires. Les membres du groupe de travail ont souligné que la recherche ne suppose pas le déploiement, au contraire un programme de recherche pourrait révéler qu'aucune des techniques proposées ne saurait être déployée sans conséquences collatérales ou risques écrasants. Par ailleurs, le rapport fait valoir que la menace d'action unilatérale par un autre pays est réelle, et que les États-Unis doivent comprendre

ces questions afin de participer et mener les discussions internationales, et afin d'évaluer comment les autres nations ou entités privées pourraient agir.

### **Le programme SPP1689 en Allemagne**

A l'issu d'un processus comparable à l'ARP Réagir, le Sénat de la Fondation allemande pour la recherche (DFG) a mis en place en 2012 le programme de recherche prioritaire (Schwerpunktprogramm 1689) intitulé «Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities? » (Deutsche Forschungsgemeinschaft / DFG, 2012).

Le programme constate que l'évaluation des technologies doit être multidimensionnelle et couvrir les aspects scientifiques, techniques et sociaux ; les aspects politiques, juridiques et éthiques ; les effets directs et indirects; à court et à long terme ; régionaux et globaux. Il constate que cette multidimensionnalité a reçu trop peu d'attention dans la recherche internationale, et exige des projets interdisciplinaires.

Deux axes sont prévus au programme : examen et évaluation des effets potentiels, des incertitudes et évaluation juridique, éthique et acceptabilité publique. Le programme met l'accent sur trois méthodes : (1) la dissémination d'aérosols dans la troposphère ou la stratosphère, (2) l'épandage de corps alcalins dans l'océan, et (3) le reboisement.

## Annexe D: Calendrier de l'atelier REAGIR

### Réunion plénière de lancement : 20 novembre 2012

Le but de la réunion de lancement a été de présenter l'état des lieux de la recherche sur la géo-ingénierie de l'environnement en France et à l'étranger, d'explicitier les opinions et besoins des industries et des associations environnementales sur ces questions, de susciter un premier débat entre les participants et d'organiser la première série d'ateliers thématiques.

### Ateliers thématiques : janvier - avril 2013

Ces quatre ateliers ont consisté en deux rencontres durant lesquelles ont été consultés le maximum d'experts pour alimenter la réflexion. Ils ont eu une dimension multidisciplinaire de manière à inclure toutes les dimensions de la problématique de la géo-ingénierie.

- **Définition et attributs de la géo-ingénierie** : 31 janvier et 11 avril 2013  
Coordinateurs : Bernadette Bensaude-Vincent, Olivier Boucher et Bertrand Guillaume
- **Géo-ingénierie territoriale** : 30 janvier et 25 mars 2013  
Coordinateurs : Fabienne Trolard et Benoît de Guillebon
- **Géo-ingénierie biologique** : 28 janvier et 25 avril 2013  
Coordinateurs : Luc Abbadie, Stéphane Blain et Philippe Ciais
- **Géo-ingénierie physique** : 4 février et 11 avril 2013  
Coordinateurs : Minh Ha Duong et Olivier Boucher

### Réunion plénière de mi-parcours : 30 avril 2013

La réunion plénière de mi-parcours a permis la restitution des travaux de chacun des ateliers thématiques. Une première définition des axes de recherche a été dégagée. Des sujets transverses à travailler dans la seconde partie ont été définis.

### Ateliers transverses : juin - septembre 2013

De la même manière que pour les premiers ateliers thématiques, deux rencontres ont été organisées pour chaque atelier transverse avec une large consultation pour alimenter la réflexion.

- **Géo-ingénierie et risques** : 27 juin et 12 septembre 2013  
Coordinateurs : Fabienne Trolard et Minh Ha Duong
- **Géo-ingénierie et politiques** : 3 juillet et 11 septembre 2013  
Coordinateurs : Olivier Boucher et Benoît de Guillebon
- **Géo-ingénierie - Nature et technique** : 28 juin et 11 septembre 2013  
Coordinateurs : Bernadette Bensaude-Vincent et Bertrand Guillaume

### Journée de restitution finale : 17 décembre 2013

Cette journée, ouverte aux experts ayant participé au travail, mais aussi à la communauté française potentiellement intéressée par la géo-ingénierie, a été le temps de restitution de tous les travaux et de propositions de recommandations pour l'acquisition complémentaire de connaissances par la recherche.



## Annexe E: Liste des participants à l'atelier REAGIR

Luc ABBADIE (UPMC-BIOEMCO)  
Pierre BARRE (CNRS-LABORATOIRE GEOLOGIE ENS)  
Slimane BEKKI (LATMOS-IPSL)  
Bernadette BENSAUDE VINCENT (UNIVERSITE PARIS I)  
Nicolas BERIOT (MEDDE)  
Stéphane BLAIN (UPMC-LOMIC)  
Denis BONNELLE (INDEPENDANT)  
Laurent BOPP (CEA-LSCE)  
Olivier BOUCHER (CNRS-LMD)  
François-Marie BREON (CEA-LSCE)  
Philippe CIAIS (CEA-LSCE)  
François CLIN (BRGM)  
Amy DAHAN (CNRS-CENTRE KOYRE)  
Marie-Lorraine DANGEARD (JAUCOURT CONSULTANTS)  
Matthias DORRIES (IRIST UNIVERSITE STRASBOURG)  
Laurent DUMERGUES (APESA)  
Jean-Louis FELLOUS (COSPAR-CNES)  
Bénédicte FISSET (CNRS-IPSL)  
Thomas GASSER (CIRED-LSCE)  
François GEMENNE (UVSQ)  
Sophie GODIN-BEEKMANN (CNRS-LATMOS)  
Bertrand GUILLAUME (CREIDD UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES)  
Benoît de GUILLEBON (APESA)  
Minh HA DUONG (CIRED-CNRS)  
Peter HANAPPE (SONY COMPUTER SCIENCE LABORATORY)  
Didier HAUGLUSTAINE (CNRS-LSCE)  
Nicolas HUNEEUS (CNRS-LMD)  
Pierre de JOUVANCOURT (PARIS I)  
Morgan JOUVENET (UVSQ)  
Xavier de LACAZE (MEDDE)  
Annamaria LAMMEL (UNIVERSITE PARIS 8)  
Jean-Marc LAPERRELLE (JML CONSULTANT)  
Hervé LE TREUT (IPSL)  
Gilles MARDON (CIRED-CNRS)  
Pascal MAUGIS (LSCE)  
Michka MELO (SONY COMPUTER SCIENCE LABORATORY)  
Dorine MONTOUT (MASTER 2 PARIS I)  
Nathalie de NOBLET (CEA - LSCE)  
Etienne OLLION (CNRS-CSO)  
Patrick PERRET (INSTITUT DE L'INGENIERIE)  
Bernard QUEGUINER (UNIVERSITE AIX MARSEILLE)  
Benjamin RAIMBAULT (EHESS)  
Gilles RAMSTEIN (CNRS-IPSL)  
Claire-Anne REIX (THALES ALENIA SPACE)  
Renaud de RICHTER (CHEMSUD)  
David SALAS Y MELIA (METEO FRANCE)  
Roland SEFERIAN (LSCE-IPSL)  
Fabienne TROLARD (INRA)  
Mieke VAN HEMERT (IFRIS ET CENTRE KOYRE)  
Robert VAUTARD (IPSL-LSCE)  
Eric VESINE (ADEME)