



## Atelier de Réflexion Prospective REAGIR

### Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement

#### Document de synthèse - Avril 2014

**Auteurs :** B. de Guillebon, O. Boucher, 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

#### Sommaire

Définir la géo-ingénierie	2
Examen critique des différentes techniques	6
À la recherche d'une géo-ingénierie plus territoriale	9
Aspects sociétaux	11
Conclusions	15

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.

Engagé en septembre 2012, l'ARP REAGIR est consacré à la géo-ingénierie environnementale. La réflexion a été menée par des chercheurs, en sciences sociales et naturelles, et des experts des secteurs publics et privés. Les solutions imaginées de géo-ingénierie ont été analysées à différentes échelles spatio-temporelles avec une vision large et aussi objective que possible sur leurs effets positifs ou négatifs.

L'ARP a rassemblé et synthétisé dans un document complet l'ensemble des travaux menés en groupe ainsi que quelques contributions collectives et individuelles. Le présent document est un résumé, volontairement synthétique et donc parfois réducteur, de l'ensemble de ces travaux. Les lecteurs souhaitant approfondir le sujet sont donc encouragés à lire le rapport complet sur le site de l'ANR et celui de l'ARP REAGIR <http://www.arp-reagir.fr/>.

## 1. Définir la géo-ingénierie

---

Avant toute chose, l'Atelier de Réflexion Prospective s'est attaché à délimiter les contours de ce qu'il faut entendre par géo-ingénierie. Après discussion, le groupe s'est accordé sur la définition 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 résultants de la pression anthropique sur l'environnement ».**

### Questions de frontière

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... 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 éco-technologies, 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. A titre d'exemple, les techniques de modification du temps dont le but est uniquement de générer des pluies localement ne relèvent *a priori* pas de la géo-ingénierie. Par contre, certaines techniques locales employées de manière systématique en de nombreux endroits peuvent avoir un impact global.

La Royal Society britannique a regroupé les méthodes de géo-ingénierie du climat en 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. 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 concept lourd d'enjeux

De fait, aucune définition ne peut prétendre à la neutralité car **le concept même de géo-ingénierie véhicule des valeurs et des 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.

---

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

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

## **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 et 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 lié à la prise de décision
  - ✓ Visée de conservation de l'espace naturel
  - ✓ Une solution technologique mais des questions éthiques et politiques
  - ✓ Idée de contrôle et de manipulation, qui renvoie à la place de l'Homme dans la Nature
- 

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.

### **Un jeu de critères et une nouvelle classification pour distinguer les différentes techniques**

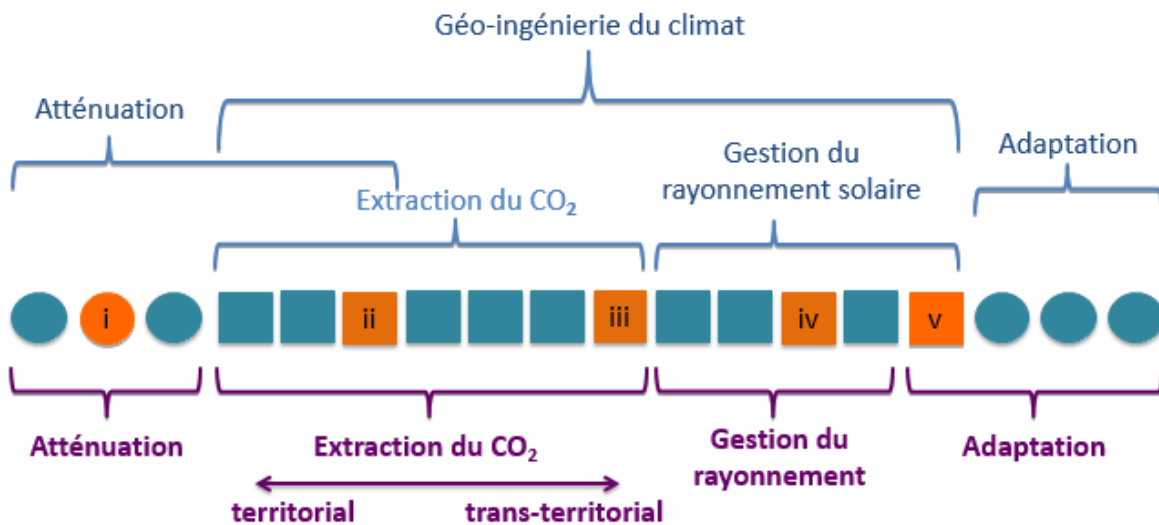
Plusieurs critères ont été adoptés par le groupe pour différencier les techniques de géo-ingénierie : l'intentionnalité, l'échelle de temps, l'échelle spatiale, l'intensité de l'action et/ou de l'impact, le degré de réversibilité.

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.

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 page 5). 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.

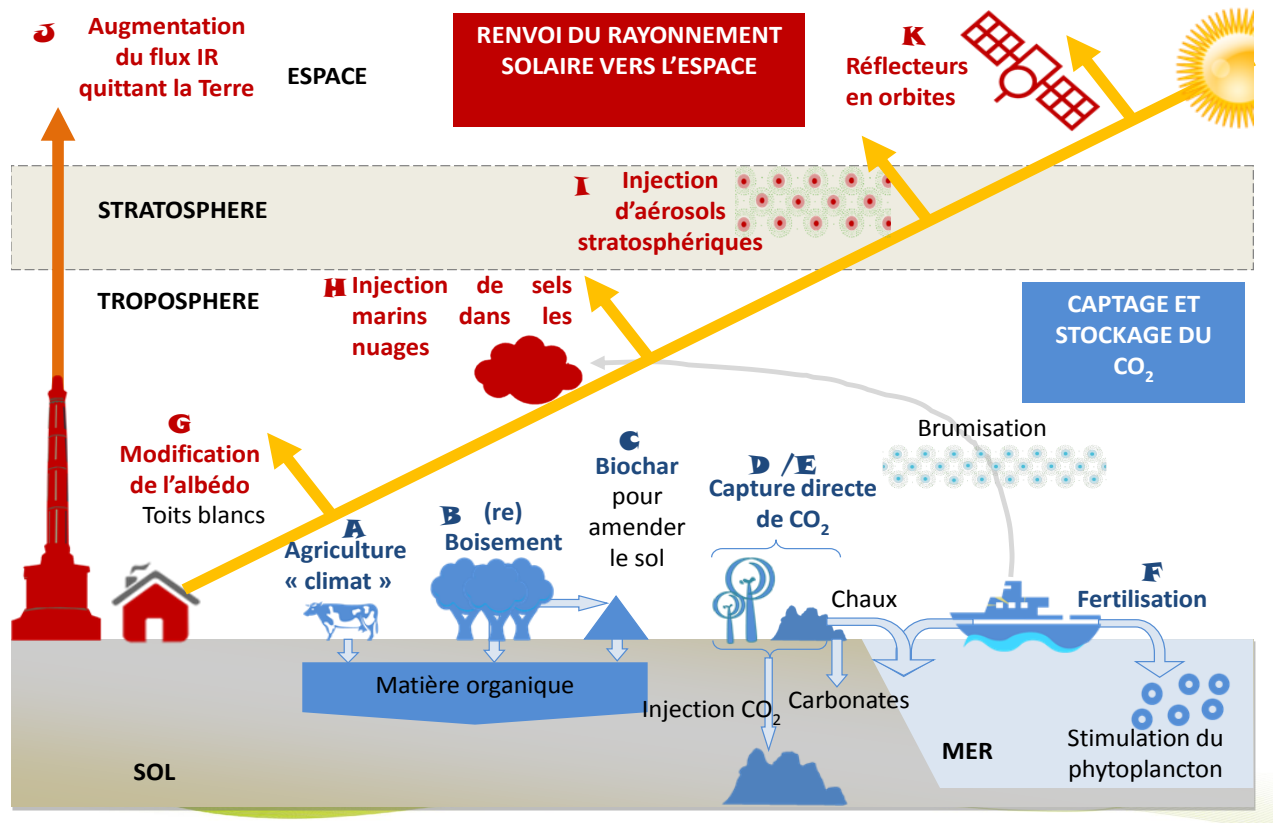
Même si elle permet de mieux rendre compte de la diversité des solutions, cette classification n'est pas exempte de défauts. Il existe en effet des zones de recouvrement et des méthodes qui, selon l'approche adoptée, pourront être classées ou non dans la géo-ingénierie.

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.



**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 classées 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.

## 2. Examen critique des différentes techniques



**Figure 2 : Les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat.** La figure ci-dessus 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).

### Agriculture « orientée climat »

À 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.

## **Augmentation des surfaces boisées**

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.

## **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.

## **Techniques confinées de capture du CO<sub>2</sub> atmosphérique**

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.

## **Alcalinisation de l'océan**

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.

## **Fertilisation des océans**

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.

### **Modification de l'albédo 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.

### **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.

### **Injection d'aérosols stratosphériques**

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.

### **Courts-circuits énergétiques**

Au lieu de réfléchir le rayonnement solaire (techniques G, H, I et K de la figure 2), 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.

### **Réflecteurs 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.

D'autres techniques ont été mentionnés lors des ateliers, comme le stockage de carbone dans les horizons profonds des sols, l'utilisation des bactéries de la biosphère profonde, ou la destruction du méthane atmosphérique mais ne sont pas discutées ici compte-tenu du peu d'informations disponibles. Le lecteur est néanmoins renvoyé au rapport complet pour plus de détails.

### 3. À la recherche d'une géo-ingénierie plus 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>3</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.

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.

#### 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.

#### 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>3</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 forêt

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>4</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 photocatalyse.

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>4</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.

## 4. Aspects sociétaux

---

### Nature et technique

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 emprise sur le monde ? Est-il bon, est-il mauvais d'entreprendre des recherches ou des actions en géo-ingénierie ? Ces questions de choix de société et d'évaluation morale sont 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 épistémique, 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.

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 exige une attention éthique particulière 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 selon lequel on comprend et contrôle ce que l'on a conçu et fabriqué.

Or la géo-ingénierie évolue en régime d'incertitude et pourrait déclencher des processus naturels qu'il serait impossible à contrôler.

Pour entreprendre des recherches et des actions en géo-ingénierie, il est donc indispensable de respecter les bonnes pratiques suivantes :

- ✓ ne pas dissimuler les zones d'ignorance,
- ✓ ne pas fonder les décisions sur des modèles simplistes,
- ✓ bien définir les frontières du système que l'on considère,
- ✓ évaluer de manière la plus complète possible les conséquences (environnementales, politiques, sociales) de l'action, son échelle, sa durée d'effet, sa réversibilité et les effets non intentionnels possibles.

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.

## Gouvernance de la géo-ingénierie

Le problème de la gouvernance de la géo-ingénierie se pose de manière urgente dans la mesure où celle-ci touche à des biens communs planétaires<sup>5</sup> (comme l'atmosphère, les océans, la biodiversité).

Pourtant, à l'exception de quelques textes qui font référence de manière directe ou indirecte à

la géo-ingénierie (voir encadré), la géo-ingénierie se trouve dans un vide juridique quasi-total.

### La géo-ingénierie et le droit international

Peu de textes internationaux font référence à 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) ne couvrirait la géo-ingénierie que dans la mesure où elle aurait une fin hostile. Les pays de l'Organisation Maritime Internationale ont voté une interdiction de la fertilisation des océans (dans les eaux internationales) à l'exception de « recherches scientifiques légitimes et de petite échelle » (OMI, 2008). La Convention sur la Diversité Biologique, adoptée lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, a été complétée en 2010 par un texte interdisant le déploiement de techniques de géo-ingénierie climatique sans pour autant s'appliquer de manière contraignante.

Le risque élevé d'utilisation unilatérale de la géo-ingénierie par un pays donné et de répercussions sur les autres pays requiert *a priori* un encadrement fort dans un processus international qui explicite ce qui peut être autorisé et ce qui doit être interdit. On peut penser ici à l'exemple du Traité de non-prolifération nucléaire. Dans le cas d'une interdiction, se pose alors la question de la surveillance et de la détectabilité de possibles actions clandestines.

Par ailleurs, l'expérience de la gouvernance internationale du climat a montré que les grandes conventions internationales sont généralement peu contraignantes au plan juridique et que des pays-clés s'en abstiennent, ce qui réduit considérablement leur effectivité.

---

<sup>5</sup> Les biens communs planétaires (traduction de *global commons* en anglais) se réfèrent aux ressources naturelles partagées par l'humanité et qui ont un caractère international ou supranational comme l'atmosphère, les océans, ou encore les régions polaires.

De plus, on n'a jamais vu à ce jour de traité ou de mécanisme collectif qui ait su fonctionner sur une durée de plusieurs siècles. La position de nombreux acteurs fait qu'il est très improbable qu'un cadre juridique et politique commun aux différentes techniques de géo-ingénierie et aux différents stades du processus (recherche, expérimentation, déploiement) puisse être défini.

En 2009, un groupe d'universitaires d'Oxford a proposé une série de principes destinés à guider la recherche en matière de géo-ingénierie<sup>6</sup>. Ce « code de conduite », désormais connu sous le nom de principes d'Oxford, comprend cinq principes que l'on reprend ici :

- ✓ **réglementation de la géo-ingénierie comme un bien public.** Si l'implication du secteur privé ne doit pas être prohibée (et peut même être encouragée), elle 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** par un organisme d'évaluation qui 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.

Ces principes ont suscité un débat entre chercheurs qu'il importe de suivre et d'investir. Au vu de l'insuffisance des mesures de régulation envisagées, la conclusion de l'atelier souligne un besoin d'approfondissement de la recherche en ce domaine, notamment en sciences politiques et sociales.

## Aspects économiques et 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.

Le modèle économique des méthodes de capture du dioxyde de carbone pourrait reposer sur la vente du CO<sub>2</sub> pour élaborer des produits chimiques ou fabriquer des carburants (par photosynthèse naturelle ou artificielle), mais le principal débouché serait la vente de crédits d'émission auxquels la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> pourraient donner droit. Toutefois, cela ne serait envisageable 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 prenant en compte les aspects de vérification.

---

<sup>6</sup> <http://www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/principles/>

Pour les méthodes de gestion du rayonnement solaire, il est plus difficile d'imaginer autre chose qu'un financement direct par les gouvernements. C'est pourquoi on peut penser que le débat sur ces méthodes se situera avant tout 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.

Enfin, il faut distinguer dans la géo-ingénierie les techniques apportant des résultats incrémentaux dont l'intensité pourra être proportionnelle à l'effort financier consenti, par opposition à des dispositifs plus radicaux soumis à des lois de seuils avec des intensités capitalistiques très importantes. Outre les problèmes de vérification déjà mentionnés, de telles perspectives font aussi face à une difficulté importante qui est celle de **la responsabilité** quant aux effets collatéraux.

## Analyse des risques

En matière de géo-ingénierie, la question du risque est centrale. Le risque peut être défini comme la combinaison d'un danger et d'une occurrence (ou d'une exposition).

Trois principes fondamentaux caractérisent la décision en présence d'incertitude :

- ✓ La prudence vise les dangers avérés dont la probabilité d'occurrence peut être mesurée (le risque est connu et quantifiable).
- ✓ La prévention vise les dangers avérés dont la probabilité d'occurrence est difficile à évaluer (le risque est connu, mais difficilement quantifiable).
- ✓ La précaution vise les dangers potentiels dont ni la sévérité, ni la probabilité d'occurrence ne peuvent être calculées avec certitude, compte tenu des connaissances du moment (le risque est à la fois mal connu, voire imprévisible et difficile à quantifier).

Dans les pratiques sociales actuelles, la mise en œuvre d'une option technologique doit relever du principe de prudence (par opposition à celui de précaution) qui impose une quantification des risques par des démarches scientifiques prévisionnelles qui permettent de bien définir les dangers et leur probabilité d'occurrence, bornant ainsi leurs incertitudes.

Or, dans le cas de techniques mobilisant des systèmes planétaires très ouverts, avec un impact potentiel sur le climat et la biodiversité, on se heurte à la grande difficulté d'évaluer de manière précise les risques. Les 20 ans de travaux du GIEC ont bien montré qu'en matière de changements climatiques et de systèmes naturels, il existe des dangers imprévisibles et non quantifiables. De plus, lorsqu'il est question d'un système naturel, il est très difficile de chiffrer la probabilité d'occurrence d'un événement donné. En matière de géo-ingénierie, on est donc bien dans une situation d'incertitude relevant de la précaution. Le niveau de risque évalué sera beaucoup plus important pour les solutions techniques qui introduisent une rupture radicale, que pour celles qui ont un positionnement de « retour à des pratiques assimilables à certaines supposées avoir préexisté » ou qui relèvent d'un cadre plus proche d'activités industrielles existantes.

Enfin, au vu de l'imprévisibilité des dangers dans beaucoup de techniques de géo-ingénierie, une exigence de réversibilité s'impose. Même réversibles, **les techniques de géo-ingénierie transposent du risque dans le futur** (que ce soit sur la pérennité du stockage de carbone ou sur l'engagement temporel qu'impliquent les techniques de gestion du rayonnement solaire). Si on se penche plus particulièrement sur les aspects de R&D en géo-ingénierie, trois types de risque doivent être distingués :

- ✓ **Le risque politique induit par l'affichage de la programmation de recherches en géo-ingénierie.** En effet, la notion même de géo-ingénierie implique l'espoir de pouvoir contrer les effets du changement climatique



sans avoir à s'engager dans des efforts potentiellement coûteux de réduction des émissions. Il pourrait être tentant de retarder ces efforts le temps que les techniques de géo-ingénierie s'affinent. Par ailleurs, engager des recherches sur le sujet peut être perçu comme une validation *a priori* de concepts dangereux, déraisonnables ou irrecevables pour et par les populations. 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 avec l'aide des chercheurs en sciences sociales.

- ✓ **Le risque scientifique de mauvaise maîtrise des démarches de recherche.** La recherche en géo-ingénierie environnementale s'attaque par définition d'une part à de grandes échelles spatio-temporelles peu accessibles à l'expérimentation scientifique et d'autre part à des innovations technologiques incongrues au regard des processus ou cinétiques naturels. Dès lors que la recherche devient expérimentale, les questions du confinement et de la réversibilité se posent. Dans la mesure où l'on ne peut pas faire l'économie d'une démonstration expérimentale fiable tant dans son déroulé que dans ses conclusions, les méthodes de géo-ingénierie pouvant être déployées de manière incrémentale sont de nature à minimiser le risque dans la démarche de recherche.
- ✓ **Le risque sociotechnique à développer des filières jugées dangereuses ou déraisonnables.** Le recours à des processus et des systèmes à grandes échelles exacerbe la notion de risque du fait de leur ampleur et de leur complexité. Et, même en adoptant des approches systémiques, il est quasiment impossible d'appréhender l'ensemble des conséquences telles que les rétroactions ou les paramètres extérieurs d'aggravation.

Certains risques liés à certaines techniques de géo-ingénierie sont déjà connus. La géo-ingénierie peut avoir un impact local immédiat sur le milieu où elle est appliquée. Ainsi, le refroidissement recherché peut être accompagné d'impacts non-prévisibles, d'effets externes et d'effets collatéraux : modification des précipitations, dégradation des écosystèmes et déclenchement de phénomènes climatiques pouvant avoir des répercussions sociétales, démographiques et économiques. 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. Enfin, le déploiement de la géo-ingénierie pourrait augmenter et rendre encore plus complexe la part d'imprévu du changement climatique.

Il apparaît donc que les risques associés à la géo-ingénierie sont suffisamment importants pour constituer un 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.

## 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 limiter nos émissions à la source en particulier en réduisant nos consommations d'énergie et en développant des énergies décarbonées.

**Le consortium de l'ARP REAGIR est composé de 9 membres :**

Olivier Boucher - CNRS-LMD (Atmosphère - Climat - Chimie atmosphérique), coordinateur de l'ARP REAGIR  
Benoit De Guillebon - APESA (Animation scientifique - Sciences sociales), coordinateur de l'ARP REAGIR  
Minh Ha-Duong - CNRS-CIRED (Economie - Technologie - Environnement - Risque)  
Fabienne Trolard - INRA-EMMAH (Eau - Usages des sols - Aménagement du territoire)  
Stéphane Blain - UPMC-LOMIC (Biogéochimie marine - Océan)  
Luc Abbadie - UPMC-BioEMCO (Monde du vivant)  
Philippe Ciais - CEA-LSCE (Cycle du carbone - Climat)  
Bertrand Guillaume - UTT-CREIDD (Environnement global - Risque - Société)  
Bernadette Bensaude-Vincent - CETCOPRA (Relations sciences et société - Philosophie des sciences)

**Remerciements :**

Le consortium de l'ARP REAGIR tient à remercier tous les participants aux différents ateliers. Par leur coopération lors des nombreuses réunions et leur travail, ils ont largement contribué à la réussite de ce projet.