

Projet de rapport pour l'atelier REAGIR Géo-ingénierie et Risques

8 novembre 2013

Minh Ha Duong¹ (CNRS), Fabienne Trolard (INRA) (coordinateurs)

Avec le support de Bénédicte Fisset²

Avec les contributions de François Clin (BRGM), Marie-Lorraine Dangeard (Jaucourt Consultants), Thomas Gasser (CIRED LSCE), Pascal Maugis (LSCE), Dorine Montout (U. PARIS I), Patrick Perret (Institut de l'Ingénierie), Claire-Anne Reix (Thales Alenia Space) [et ***]

1. Introduction

L'objectif de l'atelier de réflexion prospective (ARP) REAGIR est de produire un rapport pour l'Agence Nationale pour la Recherche en vue d'éclairer la stratégie française de recherche sur la géo-ingénierie de l'environnement. Ce rapport doit synthétiser les connaissances et les incertitudes et identifier des priorités de recherche. Dans ce cadre, les participants à l'ARP ont organisé deux séries d'atelier de travail en 2013. L'atelier transverse « Géo-ingénierie et Risques » s'est tenu lors de la seconde série, en été-automne 2013.

Ce texte est la synthèse des travaux de cet atelier. Il a pour but d'alerter et alimenter la réflexion sur les risques liés à la géo-ingénierie de l'environnement et à la recherche dans ce domaine. Les travaux de l'atelier sont partis d'un remue-méninge en réunion plénière ayant abouti à la liste de mots clés suivants: Incertitudes, Mesure, Référentiel, Prudence, Principe de Précaution, Responsabilité, Prévention, Evaluation des risques, Tipping points, Conflits, Arbitrages. Les participants ont ultérieurement ajouté les termes Faisabilité, Gestion des alertes et Résilience.

Les discussions de l'atelier ont exploré plusieurs dimensions de la question, qu'il n'est pas possible de discuter exhaustivement ici. On aurait pu aborder les risques par technologies, par cible vulnérable, par échelle de temps... Ce rapport est organisé selon les deux dimensions suivantes : les différentes perspectives sur le risque selon les branches professionnelles et scientifiques, et les différents niveaux d'appréhension de la géoingénierie (politique, recherche, mise en oeuvre).

2. De multiples approches du risque sont pertinentes pour la géoingénierie de l'environnement

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. 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, voir au rejet. On peut penser par exemple à la distinction risque/incertitude « bien connue » mais surtout pour les 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.

Afin d'éviter à des erreurs d'utilisation par rapport aux fondamentaux philosophiques et à certains usages établis, les participants de l'atelier recommandent de tenir compte de deux références

1 Contact : haduong@cired.fr

2 Contact ARP REAGIR : bfisset@ipsl.jussieu.fr

récentes en la matière :

- Pour parler de risque dans la conduite de projet, le vocabulaire relatif à la gestion des risques est normé par l'ISO³ Guide 73 :2009.
- Pour parler de risque dans les groupes d'experts, le GIEC a produit des lignes directrices sur le traitement de l'incertitude sur lesquelles il serait intéressant de s'appuyer⁴⁵.

Les participants soulignent que la rigueur s'impose dans le choix des définitions, un certain nombre d'erreurs étant fréquemment propagées et que, du fait de la multiplicité des définitions, il est nécessaire d'exposer les raisons du choix de l'une ou l'autre des deux traditions référencées ci dessus et dont quelques apports sont discutées ci après.

2.1. Les approches d'ingénieur

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 énorme gravité. Les risques liés aux conflits sont apparentés, dans nos sociétés, à des risques majeurs.

Le Guide ISO 73 fournit le vocabulaire de base en matière de gestion du risque. Il s'insère dans la famille de norme ISO 31000 dont le but est de fixer des principes et des lignes directrices de gestion des risques ainsi que des processus de mise en œuvre. Cette norme vise davantage à harmoniser qu'à uniformiser les approches, les standards et les méthodologies existantes en matière de management du risque. Elle est adaptable à tous les types de risques. Actuellement, la famille ISO 31000 comprend :

- ISO 31000:2009 - Management du risque - Principes et lignes directrices
- ISO/IEC 31010:2009 - Techniques d'évaluation des risques
- ISO Guide 73:2009 - Management du risque - Vocabulaire

Selon cette famille de normes, le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs d'une organisation. Dans ce sens plus large, le risque ne représente pas uniquement la somme des aléas

3 ISO Guide 73:2009. *Management du risque – Vocabulaire*. <http://www.iso.org/iso/fr/iso31000>

4 Mastrandrea, MD, CB Field, TF Stocker, O. Edenhofer, KL Ebi, DJ Frame, H. Held, et al. 2010. Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva. <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/uncertainty-guidance-note.pdf>

5 Mastrandrea, M.D. et al., 2011. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. *Climatic Change*, 108(4), p.675-691. DOI : 10.1007/s10584-011-0178-6. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-011-0178-6>

(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 au niveau 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...

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.

2.2. 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, les échelles d'analyse des survenances n'ayant rien à voir avec les échelles d'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).

Les experts de l'atelier soulignent que :

- 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 événement continu, avec des impacts constants et permanents, sans jusqu'à présent de phénomène 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. 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 calculés avec certitude, compte tenu des connaissances du moment.

La prévention vise les risques avérés dont la probabilité d'occurrence n'est pas évaluée alors que la prudence vise les risques avérés en connaissance de la probabilité d'occurrence. En géo-ingénierie, on ne peut qu'en être surtout dans le domaine de la précaution car on ne sait pas si le danger existe réellement, compte tenu des connaissances limitées du moment. Or les enjeux de risques de la géo-ingénierie ne se satisferont pas d'un jeu de spéculations sur des scénarii propres à alimenter une démarche de précaution. Sauf à bouleverser nos pratiques sociales, une option opérationnelle de mise en œuvre d'une ingénierie devrait relever, comme toute pratique technologique, du 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 des techniques mobilisant des systèmes planétaires correspondants à des réservoirs très ouverts de biodiversité évoluée vont 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 essentiellement instruite de scénarii et indicateurs associés dont la modélisation en prévision opérationnelle risque de faire défaut en terme de prudence.

Les résultats des études sur les éventuelles conséquences et les risques sont encore hypothétiques du fait de l'absence d'expérimentation et de tests à grande échelle. La *plausibilité* des risques est donc basée sur des expériences et sur un raisonnement logique. La prise de décision nécessite de se prononcer sur le choix des actions alors que les conséquences sont encore incertaines. et que l'on peut faire face à des imprévus.

Il faut déterminer quel cadre envisager pour une ou des hypothétiques législations. Un des talons d'Achille du législateur, c'est qu'on n'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/bénéfices. Dans ce contexte, l'application des *principes (ou approches) dits « de précaution »* à ce type de recherche, quels que soient leurs définitions, devient très peu rigoureuse. A l'origine (droit romain), il s'agissait plutôt d'une gestion de bon père de famille, l'absence de certitude n'entrant 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 ou Déclaration de Wingspread 98*). En sens 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, 2012*).

3. Les risques liés à la géoingénierie 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 niveau du risque politique induit par l'affichage d'une telle programmation de recherches
- Le niveau du risque scientifique de mauvaise maîtrise des démarches de recherche
- Le niveau du risque sociotechnique à développer de filières sur le fond dangereuses ou durablement déraisonnables.

3.1. Risque politique

L'Académie des Sciences a tenu une conférence sur l'ingénierie climatique planétaire le 25 juin 2013. Il est ressorti des exposés que même pour le sujet perçu comme le moins fantasmagorique, c'est-à-dire le stockage du CO₂, il n'existe pas d'acceptabilité sociale en France. Il a été dit en conclusion que la communauté scientifique n'a pas le choix de devoir s'y mettre ou pas, ne serait-ce que pour éclairer sur les risques.

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 de prochaines négociations climatiques internationales, plus précisément la Conférence des Parties de la Convention Climat COP 21 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 instrumentalisée par les politiques. Il paraît fondamental de trouver des solutions déconnectées des filières émettrices et d'ouvrir la recherche à de nouvelles filières technologiques.

Néanmoins engager un programme de R&D « en géo-ingénierie environnementale » n'est pas qu'une décision de gestion de la recherche. Cela peut avoir des retombées politiques.

L'un des premiers risques avancé pour ne pas engager une telle initiative est qu'elle puisse être perçue comme à 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-court à des intentions ou tentatives d'innovations sporadiques mal contrôlées par une contre-expertise peu construite. Le recherche d'une position intermédiaire doit être particulièrement réfléchi au regard d'un certain nombre de questions auxquelles une recherche plus approfondie, particulièrement en sciences sociales, pourrait contribuer à répondre :

- Au travers de la recherche et au profit de quelle autorité une expertise scientifique mérite-t-elle d'être instruite ?
- Comment concilier innovation technologique et recherche publique ?
- 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 demanderesse 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 à être envisagées ?

La discussion des risques autour de la construction d'une expertise renvoie finalement aux questions de gouvernance (voir cet atelier dans l'ARP). Quelles limites politiques de gouvernance de la recherche impose alors au terme de «géo-ingénierie» (dimension des systèmes planétaires concernés en visée ou en mobilisation: dispersés reproductibles, suprarégionaux, internationaux, globaux...) et «environnementale» (climat, biodiversité, hydrosystèmes, polluants persistants, désertification, acidification, imperméabilisation des sols, ...) ?

3.2. Risque et conduite de la recherche

Au niveau de 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.

Premièrement, les risques dans la recherche. La recherche en géo-ingénierie environnementale s'attaque par définition à de grandes échelles spatiotemporelles peu accessibles à l'expérimentation scientifique ; des milieux planétaires extensifs en systèmes ouverts en mécanismes d'intégrations complexes ; et des innovations technologiques incongrues au regard des processus ou cinétiques naturels ou d'incrémentation anthropique souvent moins radicale.

Donc dès lors que la recherche devient expérimentale, la question du confinement et de la réversibilité se pose. La stochastique, la modélisation et l'analogie seront évidemment 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 appel sur la géo-ingénierie nouvelle qui reste à imaginer.

Deuxièmement, pour ce qui est de la recherche sur les risques en géo-ingénierie. Le traitement du sujet est sûrement crucial mais il relève lui aussi d'une approche systémique et pluridisciplinaire. A titre d'exemple, les principes d'Oxford prévoient la participation du public dans les processus de décision mais est-ce praticable au niveau de la démocratie mondiale ? Comment adapter la nature et la quantité d'information en fonction du niveau stratégique de la décision et en fonction du public ? Quelles sont les leçons tirées de la communication sur le changement climatique, et sont-elles transposables à la communication sur la géo-ingénierie ?

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 comitologie à un minima de trois composantes: c'est-à-dire, ne pas s'en tenir à un comité stratégique arbitrant les propositions d'un comité scientifique (et technologique) mais bien 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 instruire une dimension en «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 anime des interdisciplinarités en s'en remettant trop rapidement à leur intégration superficielle.

La vision systémique complexe et le recours aux différentes disciplines pose déjà la question de l'évaluation par les pairs au niveau scientifique. Par exemple certains évoquent dès aujourd'hui les rétroactions climatiques peu instruites à ce jour si une géo-ingénierie s'opérait brusquement : des modèles de freinage ou de dérapage deviennent pour eux un préalable à la conception de la mécanique d'un frein.

Les experts de l'atelier ont posé et discuté de nombreuses questions telles que:

- Qui va financer ce genre de recherche ? Faut-il rechercher des financements privés ?

Faut-il envisager une recherche collaborative ou une recherche fondamentale ?

- Quel est l'enjeu de cette recherche ?

- Ne doit-on pas envisager la recherche sur la géo-ingénierie au niveau international plutôt que national ? Les projets peuvent-ils être intégrés dans des programmes européens ?
- Quelle place réserver à la recherche en sciences sociales et humaines ?
- Comment lancer une recherche appliquée en rupture vis-à-vis des filières traditionnelles ?
- Comment motiver la communauté française de la recherche et de l'industrie en vue de réalisations concrètes ?
- Comment associer des personnes ou des organismes qui travaillent sur le risque et l'expertise ?
- Rôles du Comité d'orientation et du Conseil scientifique au sein de l'ANR ?
- Comment communiquer sur le sujet ?

3.3. Risque et mise en oeuvre de la géoingénierie

Les débats de l'atelier sont partis de l'exposé sur les risques en géo-ingénierie présenté par Jürgen Scheffran (CLISEC, Université de Hambourg) lors de la réunion plénière du 30 avril dernier. L'une des diapositives illustrant sa présentation croisait les conséquences potentielles, directes ou indirectes, avec chacune des technologies admises au niveau international comme géoingénierie climatique (gestion du rayonnement solaire ou stockage du CO₂). Ce cadre de réflexion montre l'intérêt des approches systémiques. Cependant, la complexité de tels systèmes ne permet pas de lister l'ensemble des conséquences telles que les rétroactions ou les paramètres extérieurs d'aggravation.

C'est pourquoi une autre approche est proposée, faisant appel aux risques associés aux 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. Certains risques liés à la géo-ingénierie sont connus. Citons quelques exemples dans les différents compartiments terrestres :

- la **pulvérisation d'eau de mer** a pour but d'augmenter l'albédo océanique de basses couches, mais la taille des aérosols n'est pas bien contrôlable, les cirrus pourraient être affectés, les effets infrarouge/visible sont contrastés, l'effet sur la couche d'ozone peut être négatif et entraîner des dépôts dans la troposphère ;
- l'**injection de SO₂ dans la stratosphère** vise à y augmenter l'albédo, mais cela ne fonctionne que s'il y a des nuages àensemencer, la recondensation peut limiter la vaporisation du sel de sulfate, et les précipitations continentales peuvent se retrouver modifiées ;
- la **fertilisation des océans** par introduction d'azote ou de Fe vise à stimuler l'activité phytoplanctonique et donc l'absorption de CO₂, mais l'impact peut rester très local, des toxines peuvent être produites, la chaîne trophique perturbée ailleurs par surconsommation locale de sels nutritifs, l'oxygène profond surconsommé, la production de N₂O stimulée, etc.
- **favoriser l'absorption de CO₂ par la biosphère continentale** en plantant massivement des arbres n'a pas un effet certain sur la température (la transpiration augmente, mais l'albédo aussi) et n'est pas nécessairement efficace d'un point de vue GES puisqu'à terme, le bois se décompose ou est brûlé, et les rétroactions climatiques du fait de la perturbation du cycle du carbone sont incertaines, sans oublier les enjeux liés à la limitation des ressources en eau (déjà aggravée sur de larges territoires du globe) et à celle des terres et des nutriments, à la durabilité menacée par les incendies et les ravageurs, à la compétition d'usage des sols avec des répercussions possibles sur la sécurité alimentaire ;
- le **stockage géologique de CO₂** en aquifères salins ou en strates charbonnées consiste à soustraire ce GES au compartiment atmosphérique, sous réserve qu'il reste confiné en

profondeur (risques liés à la présence de failles initiales ou induites, à l'intégrité du puits) et que le réservoir aie les capacités hydrodynamiques adaptées pour accueillir un volume suffisant, avec des difficultés à assurer le suivi des site sur le long-terme et celles liées aux risques géo-mécaniques.

On voit à travers ces quelques exemples "populaires" des risques d'échec, d'effet de bord ou d'effets colatéraux, avec une prévisibilité souvent lacunaire, voire un risque d'effet inattendu peu contraint. Les experts de l'atelier recommandent d'encourager l'analyse des risques telles méthodes existantes et d'autres méthodes 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 préconisées permettant un retour d'expérience dynamique.

D'une manière générale, et reprenant J. Scheffran, il est nécessaire que chacune des méthodes de géo-ingénierie [soit] caractérisée en fonction de la zone d'application ponctuelle ou diffuse, des effets à court ou long terme, de l'amplitude des effets, de la compétition ou non avec des ressources limitées, des impacts régionaux homogènes ou hétérogènes [localement] et du degré d'incertitude.

Les experts de l'atelier soulignent que les échelles interagissent, la géo-ingénierie locale pourrait avoir un impact global et réciproquement.

- ? Impacts directs de la géo-ingénierie sur l'environnement à petite échelle. Avant d'avoir un impact global, la géo-ingénierie a un impact local immédiat sur le milieu où elle est appliquée ou à distance en « aval » (atmosphère, océan, cycle de l'eau, biodiversité, forêt, agriculture, villes).
- ? 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 : modification des précipitations, dégradation des écosystèmes et déclenchement de phénomènes climatiques pouvant avoir des répercussions sociétales, démographiques et économiques. La complexité du système climatique et les incertitudes rendent difficile toute prévision 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 les cultures alimentaires). La définition, la mesure, la prévision de ces impacts en termes de coût d'opportunité est difficile.

Le recours à des processus et des systèmes de grandes échelles exacerbe la notion de risque du fait de l'ampleur et de la complexité. 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. Au delà des exemples ménagers comme les filières « bio » ou le biodégradable, on le voit dans des exemples industriels comme les systèmes épuratoires extensifs et le recours aux dilutions et transformations en milieux « naturels résilients », et des exemples réglementaires comme la gestion environnementale par seuils, l'écotoxicologie et la globalisation européenne de REACH comparant concentrations prévisibles dans l'environnement et concentrations admissibles dans l'environnement. 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 présumées avoir préexisté ».

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 CO₂ 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 équilibre « prévisible à entropie constante ».

D'autres solutions plus externes de géo-ingénierie (injections d'intrants, de dispositifs particuliers, implication d'un sous-système,...) peuvent correspondre à des techniques de « rajout » moins intégrées dans les processus en place et modifier le système initial. Au-delà de la réversibilité de leur propre mise en application, elles auront donc à démontrer que l'entropie du système qu'elles auront complexifié ne soit 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 de risques pour une hiérarchisation des voies potentielles.

Terminons enfin ici avec l'important volet des risques de fortes dimensions humaines, 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. Conclusion

La question du risque en géo-ingénierie de l'environnement peut sembler effrayante. Pourtant, les risques font partie du quotidien des professionnels et des experts. Il existe un processus logique rigoureux de gestion du risque sur lequel on s'appuie pour 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 définir 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 futur n'est pas connu à ce jour. Toutefois, un certain nombre de choix critiques ont été identifiés :

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

En conclusion, les experts s'accordent que le risque de 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.

5. Contributions consultées

Risques et R&D en géo-ingénierie environnementale (François Clin)

Risques : concepts, vocabulaire, principes (Patrick Perret)

Réflexion sur la gestion du risque associé aux mesures de géo-ingénierie climatique (Atelier REAGIR/Géoingénierie territoriale, Marie-Lorraine Dangeard, Pascal Maugis, Fabienne Trolard, Dorine Montout)

Compte rendu de l'atelier du 27 juin 2013 rédigé par Bénédicte Fisset

Compte rendu de l'atelier du 12 septembre 2013 rédigé par Bénédicte Fisset

La Géo-ingénierie est politique car elle est communication, programme et décision. Contribution à l'atelier REAGIR (Montout Dorine)