

Résumé

Basé sur l'analyse de la littérature sur les scénarios climat et la géo-ingénierie, ce rapport formule quatre visions ou futurs possibles :

- « L'adaptation suffit », la géo-ingénierie ne se développe pas parce qu'elle n'est ni nécessaire ni recherchée.
- « Émissions négatives en 2050 », on atténue le changement climatique mais on fait encore plus avec la capture du CO₂ à partir de l'air et le stockage géologique.
- « Urgence climat en 2075 », la gestion du rayonnement solaire apparaît comme une réponse à un événement climatique global brusque qui révèle l'insuffisance et/ou le caractère tardif de l'effort international sur l'atténuation.
- « Double catastrophe », l'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère tempère avec succès le changement climatique, jusqu'à ce qu'une crise sociale majeure fasse cesser l'action. Un changement climatique rapide se produit alors, dont l'impact démultiplie les effets de la crise sociale.

Ces quatre visions visent à baliser grossièrement et dans son ensemble la discussion sur la géo-ingénierie.

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Périmètre et méthode.....	6
2.1. Les débats sur la géoingénierie.....	6
2.2. Qu'est-ce qu'un scénario ?.....	12
2.3. Modèles, simulation et scénarios.....	16
3. Les scénarios existants.....	19
3.1. GEOMIP et autres simulations de SRM.....	19
3.2. Scénarios technologiques ou sociaux.....	23
3.3. Scénarios exploratoires du GIEC : RCP, SSP et SPA.....	28
Trajectoires RCP du GIEC.....	28
Trajectoires SSP du GIEC.....	32
Les Shared Climate Policy Assumptions (SPA).....	36
4. Quatre scénarios sur la géo-ingénierie.....	38
4.1. Motivation.....	38
4.2. Formulation des scénarios.....	38
Scénario 1 : L'adaptation suffit.....	38
Scénario 2 : Émissions négatives en 2050.....	39
Scénario 3 : Urgence climat en 2060.....	41
Scénario 4 : Double catastrophe.....	43
4.3. Analyse des scénarios.....	44
5. Conclusions.....	46
6. Références.....	47

Index des illustrations

Illustration 1: Les quatre tensions du débat sur la géoingénierie.....	8
Illustration 2: Phasage la géo-ingénierie climatique par gestion du rayonnement solaire (SWCE).23	
Illustration 3: RCP, forçage radiatif et réchauffement global.....	30
Illustration 4: RCP, émissions de CO2 provenant des combustibles fossiles.....	30
Illustration 5: Les cinq Shared Socioeconomic Pathways (SSP).....	33

Index des tableaux

Tableau 1: Axes de l'analyse factorielle du débat sur la géoingénierie.....	10
Tableau 2: Trois cadrages de la géo-ingénierie dans la littérature.....	14
Tableau 3: Scénarios explorant la gestion du rayonnement solaire.....	20
Tableau 4: Descriptions des Shared Socioeconomic Pathways (SSP).....	35
Tableau 5: Exemple de matrice de compatibilité entre les trajectoires RCP et SSP.....	36
Tableau 6: Correspondance entre scénarios SRES et nouvelles trajectoires RCP et SSP.....	36
Tableau 7: Exemple de Shared Policy Assumptions (en colonnes).....	37
Tableau 8: Scénario « L'adaptation suffit » dans la matrice SSP/SPA/RCP.....	44
Tableau 9: Scénario « Emissions négatives 2050 » dans la matrice SSP/SPA/RCP.....	44
Tableau 10: Scénario « Urgence climat en 2060 » dans la matrice SSP/SPA/RCP.....	44
Tableau 11: Scénario « Double catastrophe » dans la matrice SSP/SPA/RCP.....	45

1. Introduction

L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) française a lancé en 2012 un [appel d'offre](#) pour une recherche de type "Atelier de Réflexion Prospectif" sur la géo-ingénierie de l'environnement. Le projet lauréat s'intitule [Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de géo-ingénierie de l'environnement](#), coordonné par le CNRS et l'APESA.

En complément des ateliers de discussion thématique organisés par l'ARP, il est apparu utile de compléter la réflexion par une étude sur les scénarios explorant les futurs à long terme de la géo-ingénierie. C'est l'objet de ce rapport. Il s'agit ici d'explicitier les visions communes qui sous-tendent les discussions à propos de l'ingénierie de notre planète.

Ces discussions prennent aujourd'hui place dans diverses arènes. On parle de géo-ingénierie dans les communications académiques, les négociations diplomatiques, la presse populaire scientifique et technique, et même dans les médias grands publics comme la télévision. Or le sujet apparaît délicat à traiter de manière rationnelle. Il se prête facilement aux controverses dérivées de celles sur le changement climatique. Il a longtemps relevé de la science-fiction plutôt que de la science normale. Il évoque immédiatement des mythes fondamentaux de la culture antique grecque, l'hubris et la Nemesis. Et une lourde part de l'histoire des modifications environnementales à grande échelle relève de l'histoire militaire. Ces difficultés brouillent les approches raisonnées pourtant urgentes car la géo-ingénierie pose aujourd'hui des questions dans les négociations climat et les politiques de recherche.

L'ambition de ce rapport est de décrire plus clairement les peurs et les espoirs de la géo-ingénierie en explicitant ses scénarios les plus fréquemment évoqués sur une base rigoureuse, pour atténuer les problèmes du vocabulaire qui reste flou, des échelles de temps des discours ambiguës, et de la prise en compte des contraintes de faisabilité scientifiques, techniques et socio-économiques lointaines.

Le chapitre 2 exposera les cadrages des débats sur la géo-ingénierie et quelques éléments sur l'approche scientifique du très long terme. Le chapitre 3 décrira ensuite les scénarios déjà publiés, en visitant le domaine en trois temps : les simulations de gestion du rayonnement solaire (3.1), les scénarios techniques ou sociaux (3.2), et les jeux de scénarios du GIEC (3.3). Le chapitre 4 présentera et discutera nos quatre scénarios. Ceux-ci s'intitulent « L'adaptation suffit », « Émissions négatives en 2050 », « Urgence climat en 2075 » et « Double catastrophe ». Le chapitre 5 conclut.

2. Périmètre et méthode

2.1. Les débats sur la géoingénierie

Le projet ANR REAGIR a ainsi défini la géo-ingénierie (Boucher et al. 2014):

« La géo-ingénierie de l'environnement correspond à l'ensemble des techniques et pratiques développées en action corrective d'effets de la pression anthropique sur l'environnement et mettant en jeu des mécanismes qui contribuent à réguler le système planétaire terrestre »

La communauté intellectuelle sur le sujet se caractérise par une variété de points de vue sur la question. Afin que le jeu de scénarios élaboré dans ce rapport soit utile pour tous, il est nécessaire de connaître l'ensemble de ces points de vue. Pour cela, il existe une littérature scientifique récente ayant analysé le débat en termes de tensions, cadrages, arguments.

(Markusson 2013) ont examiné les principaux rapports publiés à ce jour en langue anglaise sur la géo-ingénierie. Ils l'ont analysée en termes de tension sur quatre thèmes, voir Illustration 1 page 8. Pour chaque thème, ils ont identifié deux (ou trois) points de vue polaires. Chaque point de vue répondant de façon différente à « Quel est le problème ? », et donc à « Quelle est la bonne réponse ? » :

La tension « 1. Science et gouvernance » est orientée par les deux positions extrêmes suivantes :

- (a) Le problème est que les connaissances scientifiques sont aujourd'hui insuffisantes pour arrêter des politiques. La solution est de faire plus de recherche, la société répondra.
- (b) Le problème est qu'il n'y a pas de cadre politique pour faire la recherche. La solution est de poser d'abord un cadre de gouvernance, la science est politique.

La tension « 2. Nouveauté ou continuité » est orientée par les deux positions extrêmes suivantes :

- (a) Le problème est qu'il n'y a pas de précédent technique ni de corpus de connaissance spécifique. La solution est que la recherche, et seulement la recherche, pourra fournir la connaissance requise et donc permettre la technologie.
- (b) Le problème est que la géo-ingénierie est une continuation des trajectoires

socio-techniques pathologiques de modification du temps. La solution est de les empêcher de le refaire. Un problème concomitant est que la géo-ingénierie supporte le régime capitaliste, la suprématie blanche, mâle et des pays du nord. La solution est de mobiliser la résistance et d'instituer des contre-pouvoirs.

La tension « 3. Compenser les émissions » est orientée par les deux positions extrêmes suivantes :

- (a) Le problème est la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La solution est de concevoir des mécanismes de géo-ingénierie refroidissants (puits et boucliers) qui compensent le réchauffement causé par l'homme..
- (b) Le problème est la société basée sur le carbone. La solution est le changement social, qui évite le besoin de contre-mesures.

La tension « 4. Rapport à la mitigation » est orientée par les trois positions

- (a) Le problème est que l'atténuation a échoué et que nous sommes déjà dans l'urgence climatique. La solution est de déployer la géo-ingénierie maintenant.
- (b) Le problème est que la mitigation est nécessaire, mais sera peut être trop tardive. La solution est de rechercher la géo-ingénierie maintenant.
- (c) Le problème est que la géo-ingénierie diverte l'effort de mitigation. La solution est de se concentrer sur la mitigation.

Pour chacune de ces quatre tensions, la littérature est qualifiée de « Diverse » lorsque les rapports supportent des positions contradictoires. La littérature est qualifiée de « Ambivalente » lorsque les rapports avancent des formulations de compromis, comme par exemple « La géo-ingénierie est nouvelle et ancienne » ou bien « Compenser les émissions est possible et très difficile ». Les deux qualificatifs ne sont pas exclusifs. Par construction, la littérature est diverse sur toutes les tensions explorées, mais le degré d'ambivalence varie.

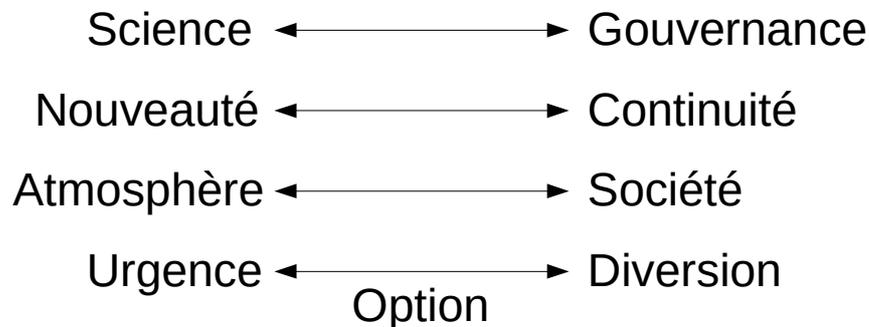


Illustration 1: Les quatre tensions du débat sur la géoingénierie

Source : Markusson (2013).

La diversité de la littérature sur la tension « 1. Science et gouvernance » est visible par exemple sur la question du moratorium. C'est la tension pour laquelle l'ambivalence est la plus présente, par exemple sur la co-construction de la connaissance par la science et la société. Cela montre une ouverture et une volonté de rapprochement des points de vue.

Par contraste la littérature sur la tension « 4. Rapport à la mitigation » apparaît peu ambivalente. Cela suggère que les positions sont relativement claires et tranchées, mais peu de ponts sont en construction. De même, l'ambivalence dans la littérature sur la tension « 3. Compenser les émissions » apparaît peu prégnante.

L'analyse de la diversité et de l'ambivalence sur la tension « 2. Nouveauté ou continuité » fait apparaître une corrélation des positions avec la tension « 1. Science et gouvernance ». Présenter la géo-ingénierie comme (a) nouvelle correspond à mettre en avant (a) le problème de la science, et vice versa.

(Huttunen & Hildén 2013) ont étudié les cadrages de la géo-ingénierie dans la littérature académique revue par les pairs. Le concept de cadrage partage des points communs avec le concept de point de vue évoqué précédemment, puisqu'un cadre est caractérisé par quatre fonctions : une définition du problème, un diagnostic des causes, une interprétation morale et une recommandation de remède. Ils identifient trois cadrages « 1. Risque / bénéfique »; « 2. Gouvernance » et « 3. Équilibre naturel ». Le premier cadrage apparaît largement majoritaire avec 48 articles analysés, contre 8 et 12 pour les deux autres. Leurs caractéristiques sont résumées au Tableau 2 page 14.

Les articles du cadrage « 1. Risque / bénéfique » se subdivisent en deux familles ou sous-cadrages : « 1a. Dernier ressort » et « 1b. Technologie correctrice ».

L'argument du sous-cadrage « 1a. Dernier ressort » est que mitigation des émissions pourrait ne pas marcher, et suite à leur échec un recours à la géo-ingénierie pourrait être nécessaire. Il suit une logique du moindre mal. L'argument du sous-cadrage « 1b. Technologie correctrice » est le pragmatisme, tant économique que politique. Il met la géo-ingénierie sur le même plan que la mitigation et l'adaptation. Si les deux sous-cadrages concluent à la nécessité d'étudier davantage la géo-ingénierie, ils diffèrent sur les conditions de mise en oeuvre envisagée. Parmi les 27 articles rangés dans le sous-cadrage « Technologie correctrice », une minorité de sept conclut à des risques excessifs impliquant l'abandon de cette technologie.

Les articles du cadrage « 2. Gouvernance » ne s'organisent pas plus finement.

Les articles du cadrage « 3. Équilibre Naturel » se subdivisent en deux familles ou sous-cadrages : « 3a. Morale profonde » et « 3b. Éthique pratique ». La première famille rejette strictement et absolument la géo-ingénierie pour des raisons morales. La seconde famille accepte que la technologie puisse être étudiée, voire temporairement utilisée en dernier ressort. Mais par rapport au cadrage Risque/bénéfice, ces articles maintiennent le débat éthique comme question centrale de la recherche sur la géo-ingénierie. Ainsi, ils s'intéressent aussi aux questions de gouvernance.

Les auteurs concluent que les dialogues science-science et science-société doivent reconnaître les trois cadrages existants. Cette recommandation s'applique directement aux jeux de scénarios proposé dans la suite.

(Cairns 2013) ont examiné les cadrages selon une méthode plus quantitative. Utilisant l'analyse factorielle des résultats d'un sondage auprès d'un groupe d'experts, l'étude identifie quatre facteurs ou cadrages ainsi intitulés :

Facteur

1. Au minimum nous avons besoin de plus de recherche.
« *Research is the only way to determine the potential impacts of different technologies,* »
 2. Nous sommes les ingénieurs en charge de la maintenance de la planète.
« *it is likely to be only a question of time before humanity is compelled to use geoengineering* »
 3. La géo-ingénierie est une stratégie politique.
« *a dystopian future in which we would find ourselves trapped by the consequences of our hubristic actions* »
 4. Concentrons nous sur le carbone.
« *There is nothing wrong with a technological fix* »
-

Tableau 1: Axes de l'analyse factorielle du débat sur la géoingénierie

Source : Cairns (2013)

Les résultats ci dessus sont orientés par une opposition entre le facteur 2 qui est pour et le facteur 3 qui est contre, avec les facteurs 1 et 4 plus neutres. En termes de positions sur les quatre tensions identifiées par Markusson, le facteur 2 semble tendre vers le pôle représenté par les opinions (a) : la géo-ingénierie est plus science que gouvernance, plus nouveauté que continuité, plus climatique que sociale, plus nécessaire que spécieuse. Le facteur 3 est à l'opposé sur ces quatre tensions. Le facteur 1 est moins tranché sur la quatrième tension (4b plutôt que 4c) et au milieu sur la troisième, sinon proche du (a) pour les tensions « 1. Science et gouvernance » et « 2. Nouveauté et continuité ». Le facteur 4 est ambivalent sur ces tensions 1 et la 2, mais nettement orienté sur les réponses d'action aux tensions 3 et 4 : urgence, ça chauffe.

Par rapport aux résultats de Huttunen et Hildén, le facteur 3 correspond au cadrage « 3. Équilibre naturel ». Les trois autres facteurs se rapportent au cadrage « 1. Risque et bénéfiques », le cadrage « 2. Gouvernance » ne semble pas ressortir de l'analyse factorielle.

(Rickels et al. 2011) et (Betz & Cacean 2012) exposent une analyse logique des arguments du débat sur la géo-ingénierie, aussi nommée ingénierie climatique. La structure générale du débat est articulée autour de six propositions. Certaines de ces propositions sont paramétrées, elles se rapportent spécifiquement à une action de recherche *R* à propos d'une technologie de géoingénierie *G*. La proposition principale est la thèse :

[T1] On devrait conduire la recherche et le développement *R* sur la technologie d'ingénierie climatique *G*.

Cette proposition découle de la conjonction des trois propositions suivantes :

[T2] Dans le futur, la technologie d'ingénierie climatique *G* devrait être prête pour un déploiement

[T3] Les effets secondaires de la recherche *R* sur la technologie d'ingénierie climatique *G* sont négligeables devant la perspective d'en disposer (probablement) dans le futur.

[T4] Il n'y a pas d'alternative à une recherche *R* immédiate sur la technologie d'ingénierie climatique *G* qui permettrait de la rendre disponible dans le futur.

La proposition [T2] est la plus discutée, elle est réfutée par la proposition :

[T5] Tout déploiement futur de la technologie d'ingénierie climatique *G* serait (moralement) mauvais

De plus, la proposition suivante apparaît généralement admise :

[T6] La mitigation est prioritaire sur l'ingénierie climatique.

Sans reproduire ici tous les détails du rapport de Rickels et al., qui examinent et structurent l'ensemble des idées du débat, l'analyse rapporte que les principaux arguments pour la géo-ingénierie sont l'efficacité relative par rapport à la mitigation, la possibilité d'atteindre des objectifs climatiques ambitieux, le dernier ressort. Les arguments contre sont les réserves sur l'efficacité technique et économique réelle, des arguments d'éthique du risque, d'équité et religieux.

L'analyse met en évidence l'importance logique de prendre en compte les effets secondaires de la recherche [T3] et l'existence des alternatives [T4]. Ces aspects, particulièrement [T4], ont été peu discutés jusqu'ici comme le montrent les analyses des débats discutées plus haut dans cette section.

L'analyse logique des arguments autour des thèses [T1] à [T6] révèle les relations de prérequis ou conséquence entre les considérations. Elle permet de déterminer si un ensemble de prises de positions est incomplet ou contradictoire. Dans l'autre sens, si on se donne une position, par exemple « accepter T1 pour une action de recherche *R* pour une technologie *G* », l'analyse de la cohérence logique permet de remonter le réseau d'arguments à accepter ou rejeter sous-jacent à cette position.

Betz et Cacean illustrent ce pouvoir de clarification en étudiant quatre positions éthiques sur le développement de la technologie d'augmentation de l'abédo des nuages, sur l'analyse de risque de la fertilisation océanique, sur la prohibition de la

recherche sur la gestion du rayonnement solaire par les aérosols, et enfin sur le développement des technologies de capture à partir de l'air.

Les scénarios que l'on proposera dans la suite seront discutés par rapport aux tensions et cadrages existants, qui constituent les grands points de vue du débat sur le sujet. Des façons différentes de voir la géo-ingénierie conduisent à justifier des scénarios différents. L'analyse logique du débat exposée par Betz et Cacean permettra d'en faire une justification cohérente. La cohérence interne de chaque scénario sera assurée, mais pourra différer entre les scénarios en fonction des ressorts choisis pour les construire.

Les scénarios proposés dans ce rapport visent à améliorer la compréhension des mécanismes et à changer les perceptions, en laissant de côté l'objectif d'améliorer la prise de décision. Même si construction de scénarios et la planification stratégique sont souvent deux activités liées, (Wright, Bradfield, et al. 2013) rappellent que ce sont deux activités distinctes, et qu'on dispose de peu de preuves scientifiques aujourd'hui que la première améliore la seconde.

C'est pourquoi nous laissons de côté la littérature sur les aspects philosophiques et politiques de la géo-ingénierie (Hale & Dilling 2011), (Rayner et al. 2009), (Long et al. 2011), (Salzman & Jackson 2010), (Shepherd 2009, p.57 et suivantes) (Gordon 2010) (Rickels et al. 2011, sect.7.4, pp 176-177), de même que la littérature sur ses implications pour l'économie et les négociations climatiques internationales (Schelling 1996) (Victor et al. 2009) (Bracmort & Lattanzio 2013) (Shepherd 2009, p.40) (Ghosh 2011) (Barrett 2008) (Victor et al. 2009) (Bronson et al. 2010).

2.2. Qu'est-ce qu'un scénario ?

À cette question, deux experts américains répondent ainsi :

« Scenarios are attempts to describe in some details a hypothetical sequence of events that could lead plausibly to the situation envisaged ». (Kahn & Wiener 1967).

« Scenarios are stories about the way the world might turn out tomorrow, stories that can help us recognize and adapt to changing aspects of our present environment ». (Schwartz 1996)

H. Kahn définit les scénarios comme des tentatives pour décrire de façon détaillée une séquence d'évènements hypothétiques qui pourrait conduire plausiblement à une situation envisagée. P. Schwartz définit les scénarios comme des histoires sur ce que le monde pourrait devenir demain, histoires qui peuvent aider à reconnaître

et à s'adapter aux aspects changeants de notre environnement actuel. On retrouve deux éléments en commun dans ces définitions :

- Les scénarios relèvent de la narration : «details, sequence of events », « stories ». Ils utilisent le pouvoir des mots, il ne s'agit pas de tableaux de chiffres ou de courbes. Ce sont les circuits mentaux du langage plutôt que ceux du calcul qui sont d'abord mobilisés.
- Les scénarios relèvent du futur imprédictible : « hypothetical, ... plausibly », « might ». La notion de plausibilité doit ici être distinguée de la notion de probabilité.

Contrairement à H. Kahn qui les définit comme des outils de connaissance pure, la définition de P. Schwartz met l'accent sur l'intérêt pratique des scénarios pour la prise de décision. En effet, les scénarios sont des outils de gestion stratégique. Ils ont été utilisés avec succès dans plusieurs domaines d'activité.

- Pour la défense et la planification des opérations militaires. Après la seconde guerre mondiale, des think tanks américains comme la Rand (Research and Development, originellement branche de l'armée de l'air américaine), ou le SRI (Stanford Research Institute) ont par exemple contribué au développement de pratiques comme « la technique Delphi » pour l'élicitation des opinions d'expert ou « la méthode des scénarios ». Les scénarios de destruction mutuelle assurée, par exemple, ont contribué à la prise de conscience des effets catastrophiques d'un échange nucléaire, et ainsi à l'équilibre de la terreur. Ces organisations sont encore actives aujourd'hui. Comme on le verra dans la suite, la RAND mène par exemple une réflexion précoce sur les scénarios de géo-ingénierie.
- Pour l'aménagement territorial. Il est par exemple nécessaire d'avoir des visions à long terme lorsqu'il s'agit de planifier le développement des infrastructures de transports, voire des villes nouvelles. On peut reconnaître une « École française » de la prospective, depuis les réflexions du rapport DATAR de Julien et al. en 1975 à la revue Futurable aujourd'hui. Celle ci se caractérise par une approche holistique et plus philosophique que celle des organisations américaines citées ci dessus.
- Pour le monde des affaires. Lors du premier choc pétrolier, la société Royal Dutch Shell a été en mesure de réagir plus vite que ses concurrentes car un exercice de prospective interne l'avait préparée. Ce succès a contribué à faire connaître le futuriste Pierre Wack et à populariser les méthodes de scénarios en entreprise.

Cadrage :	1. Risque/bénéfice	2. Gouvernance	3. Équilibre Naturel
Sous-cadrages :	1a Dernier ressort 1b Technologie correctrice	(sans)	3a. Morale profonde 3b. Éthique pratique
Définition	La géo-ingénierie est un problème risqué et complexe, qui a du potentiel pour atténuer le changement climatique. Les décisions devraient se baser sur des analyses informées par la recherche.	La géo-ingénierie est essentiellement une question de gouvernance, les problèmes de gouvernance devraient être résolus aussi tôt que possible, avant que la technologie soit applicable.	La géo-ingénierie ne résout pas le problème original mais ajoute aux problèmes. C'est une question éthique.
Problème	La connaissance sur la géo-ingénierie est limitée, il y a des risques considérables mais aussi des opportunités.	L'existence de la géo-ingénierie soulève des questions de gouvernance et de politique.	La géo-ingénierie traite les effets et non les causes qui sont enracinées dans un dévoiement de la relation homme-nature.
Cause	Les progrès technologiques et scientifiques créent de nouvelles options de géo-ingénierie, mais ces options n'ont pas assez été prises au sérieux.	L'intérêt pour la géo-ingénierie augmente car elle est perçue comme offrant un potentiel de solutions bon marché, rapides et facilement applicables pour atténuer le changement climatique, au temps où la menace climatique augmente.	L'Humanité est trop étrangère à la Nature, les humains ne cherchent que leur propre bénéfice.
Morale	La géo-ingénierie devrait être étudiée car ne pas le faire pourrait conduire à négliger des solutions potentielles, ou à prendre un risque aux conséquences inconnues si/quant elle est appliquée.	Le contrôle de la géo-ingénierie devrait être développé sérieusement, négliger cela conduirait à des problèmes de régulation dans le futur.	La géo-ingénierie est immorale c'est un signe d'hubricité et devrait donc être rejetée.
Prescription	Étudier les potentiels techniques, les effets, les risques, les coûts et prendre des décisions informées.	Concevoir des systèmes de gouvernance appropriés.	Les humains doivent apprendre à vivre en équilibre avec la nature et s'abstenir de développer l'idée plus loin.

Tableau 2: Trois cadrages de la géo-ingénierie dans la littérature.

Source : Huttunen et Hildén (2013, Table 2, trad. HDM).

Pour une revue détaillée et récente des buts et méthodes de scénarios, voir le numéro spécial de (Wright, Cairns, et al. 2013). Sommairement, on peut classer les scénarios en deux sortes : exploratoires ou normatifs. Les scénarios exploratoires se donnent pour but de décrire l'étendue des futurs possibles sans limites. Ils examinent les tendances et éléments prédéterminés, s'intéressent aux ruptures. L'idée est qu'il n'existe pas de futur prédéterminé, mais une « impérieuse nécessité de réduire l'étendue des incertitudes ». Les scénarios normatifs procèdent d'une démarche inverse au sens où un but futur est prédéfini. On s'intéresse alors aux options stratégiques pour l'atteindre et aux risques.

On distingue deux orientations pour les scénarios normatifs : souhaités ou redoutés. Les premiers se rapportent à l'idée d'utopie, les seconds à celle de contre-utopie ou dystopie. Il existe toutefois une différence entre un scénario normatif souhaité et une utopie. Les utopies classiques portent leur regard sur la construction sociale, politique et culturelle dans son ensemble. Beaucoup de scénarios s'intéressent à une question précise, mais certains adoptent le regard le plus vaste comme les Shell Global Scenarios ou les scénarios socio-économiques du GIEC. La différence tient donc moins dans l'objet que dans la forme et le point de vue. Les utopies et dystopies sont plutôt présentées comme des récits littéraires longs de type roman, alors que les scénarios sont généralement écrits dans des rapports techniques d'une longueur compatible avec le temps disponible des responsables chargés des décisions stratégiques. De plus utopies et dystopies sont plutôt des récits normatifs avec un ressort moral important, alors que les scénarios se veulent plus scientifiques et moralement neutres.

Les exercices de prospective pour explorer le futur lointain conduisent souvent à écrire plusieurs scénarios. Montrer le caractère multivoque et non déterminé du futur est en effet un aspect essentiel de ce genre de travaux :

« Ni prophétie ni prévision, la prospective n'a pas pour objet de prédire l'avenir – de nous le dévoiler comme s'il s'agissait d'une chose déjà faite – mais de nous aider à le construire. Elle nous invite donc à le considérer comme à faire, à bâtir, plutôt que comme quelque chose qui serait déjà décidé et dont il conviendrait seulement de percer le mystère » (Jouvenel 2004)

Il est toutefois rare de dépasser le nombre de 5 scénarios dans une même étude. En effet, une taille excessive rend difficile la mémorisation et donc l'utilisation du jeu de scénarios. Les exercices de prospective comportent donc entre 1 et 4 scénarios en pratique. Lorsqu'il s'agit de scénarios exploratoires, la question d'inclure un scénario « central » ou « business as usual » se pose.

Le faire comporte deux avantages. Cela peut informer les décideurs qui ne connaissent pas le champ de la connaissance commune dans le domaine. Et cela crédibilise l'étude auprès des décideurs qui connaissent le champ, puisqu'ils voient qu'on a pris en compte les tendances actuelles. Ce dernier point peut être particulièrement important si les scénarios stratégiques sont construits par des intervenants extérieurs à l'équipe qui les utilise.

Toutefois inclure un scénario central pose un problème essentiel à la prospective : le risque que l'exercice soit perçu comme un travail de prévision avec le « best guess » et des variantes moins probables. Le scénario central peut devenir un point focal qui conduit les utilisateurs à sous estimer l'incertitude que les analystes avaient tenté de transmettre par le jeu de scénarios. Pour ces raisons, on privilégie souvent le nombre de deux ou quatre scénarios.

La question du scénario central se pose moins pour les scénarios normatifs. On en présente souvent un seul. Son statut d'image du futur qui n'est pas une prédiction est assumé clairement dès le début. En effet il est par définition téléologique, c'est à dire construit à partir d'un but final, donc on ne peut logiquement penser qu'il découle des tendances actuelles par une nécessité causale. Un scénario normatif désiré est appelé une feuille de route.

2.3. Modèles, simulation et scénarios

La relation entre modèles et prospective marquée par une ambiguïté de vocabulaire : le mot « scénario » peut nommer un ensemble de valeurs des paramètres dans un modèle. Dans le cas d'un modèle déterministe décrivant l'évolution d'un système dans le temps, un tel ensemble de valeurs d'entrée donne un seul ensemble de valeurs de sortie. Le modèle permet ainsi de calculer une simulation d'un futur possible.

L'utilisation d'un modèle nécessite toujours de se donner des paramètres d'entrée, donc met en voeu œuvre des « scénarios » au sens du modélisateur. Ces « scénarios » qui sont des vecteurs de nombres peuvent être ou non adossés à des scénarios narratifs au sens du prospectiviste.

Plusieurs modèles différents peuvent produire plusieurs simulations correspondant à un même scénario narratif. La démarche d'inter-comparaison de modèles est assez fréquente dans la communauté scientifique. L'harmonisation des valeurs d'entrée se fait de préférence sur les valeurs des paramètres numériques, mais dans la mesure où divers modèles n'utilisent pas exactement les mêmes entrées numériques, l'harmonisation peut aussi avoir lieu en partie autour de scénarios narratifs.

Le scénario narratif se suffit à lui même, au sens où il n'a pas nécessairement besoin d'être quantifié pour être utile. Dans le cas de scénarios explorant des changements sociaux comme les style de vie ou les relations géopolitiques, il est d'ailleurs difficile de se rattacher à des variables mesurables bien définies. Toutefois l'utilisation d'un ou de plusieurs modèle-s pour quantifier certains aspects d'un scénario narratif est une pratique courante, au risque de l'ambiguïté ci dessus.

L'emploi de modèles pour illustrer des scénarios narratifs présente plusieurs avantages. Le modèle donne des résultats quantitatifs. Les chiffres précis possèdent un pouvoir de communication efficace, ils donnent une force de conviction. Ils peuvent permettre de produire des images facilement mémorables comme des cartes. Ce pouvoir de communication peut être intéressant pour l'utilisateur du scénario, même si au sens scientifique l'état de la connaissance justifierait des énoncés plus imprécis.

Il subsiste toutefois des différences philosophiques profondes entre la prospective --avec des scénarios narratifs-- et la simulation --avec des modèles numériques-- vont au delà de cette ambiguïté de vocabulaire.

La prospective se veut une approche multidisciplinaire d'inspiration systémique holistique, alors que la modélisation est plus robuste lorsqu'elle traite les problèmes sous un angle disciplinaire bien précis : un modèle économique, démographique, océanique inspirera traditionnellement plus de confiance qu'un modèle intégré. Un scénario de géo-ingénierie au sens holistique ne saurait se limiter à la physique du climat et au bilan des flux d'énergie, entropie et de matière modifiés. Il s'intéressera aussi aux technologies, aux institutions sociales comme les organismes internationaux, les pouvoirs spirituels ou les marchés, et même au contexte global démographique, économique et politique.

La prospective s'intéresse au temps long définit comme étant le temps des ruptures dans la dynamique du système, alors que la modélisation est plus robuste lorsque l'horizon temporel ne comprend pas de telles ruptures qualitatives de la dynamique. La prospective s'intéresse aux seuils de bifurcation et aux signaux faibles, aux non-linéarités qui posent toujours des difficultés aux modèles.

La prospective considère que l'homme et la société fait partie du système, alors que la modélisation est plus robuste lorsqu'elle traite de systèmes physiques purement causaux. La prospective s'intéresse donc à la construction du futur, ce que Gaston Berger résume ainsi :

Nous devons « considérer l'avenir non plus comme une chose déjà

décidée et qui, petit à petit, se découvrirait à nous, mais comme une chose à faire » (Berger 1958)

Considérer que l'avenir est une chose à faire implique que dans l'utilisation des modèles l'intérêt porte sur les variables de contrôle, plus que sur les paramètres observables. La prospective s'intéresse beaucoup à la politique, alors que la simulation relève plutôt de la science.

« Alors, au contraire, que l'avenir est pour l'homme, en tant que sujet connaissant, domaine d'incertitude, et pour l'homme, en tant que sujet agissant, domaine de liberté et de puissance » (Jouvenel 2004)

En conséquence, la prospective et la simulation apportent des contributions différentes à la prise de décision stratégique.

Une des missions des scénarios narratifs est de définir un vocabulaire, poser un langage commun à l'intérieur d'un grand groupe pour parler de choix stratégiques à long terme. Alors que les simulations sont souvent baptisées de codes imprononçables, les scénarios peuvent recevoir des titres compréhensibles plus mémorisables et réutilisables avec moins de contexte.

La prospective se propose d'explorer des incertitudes de type « inconnues inconnues », les risques qui par définitions sortent du pouvoir d'expression du modèle considéré comme langage de description du monde.

La prospective propose plutôt de rechercher une décision robuste, c'est à dire qui produit une performance acceptable dans tous les scénarios. Elle se distingue en cela de la simulation et de la prédiction qui peuvent conduire à rechercher une décision optimale, c'est à dire celle qui donne le meilleur résultat en espérance.

(Lempert & Prosnitz 2011) illustrent cette recherche de prise de décision robuste. Les auteurs utilisent un modèle simple pour projeter les conséquences de trois politiques étasuniennes différentes vis à vis de la gouvernance de la géo-ingénierie. Ces conséquences sont évaluées en fonction de leur dépendance au potentiel technologique futur, au degré de gravité du changement climatique, au potentiel d'accord internationaux pour limiter celui ci et à l'impact que la géo-ingénierie pourrait avoir sur de tels accords. Le modèle est alors utilisé de façon combinatoire pour identifier les vulnérabilités potentielles de ces trois politiques, c'est à dire les conditions dans lesquelles elles ne rempliraient pas les objectifs du gouvernement étasunien. La découverte de ces conditions aboutit à définir des scénarios qui les représentent. Confronter ces scénarios aux politiques permet de réviser celles ci pour pallier aux insuffisances ainsi mises en lumière.

3. Les scénarios existants

La production scientifique récente décrivant des scénarios de géo-ingénierie, dans une acception large du terme, s'élève à plusieurs douzaines d'articles. Cette section présente et organise la littérature en trois temps : les approches de science du climat qui simulent les conséquences de la gestion du rayonnement solaire (SRM) (3.1), les scénarios sectoriels qui explorent des aspects technologiques ou politiques (3.2), et enfin les scénarios RCP et SSP du GIEC (3.3).

3.1. GEOMIP et autres simulations de SRM

Dans cette section, nous examinons des scénarios essentiellement construits pour explorer la dynamique du système climatique, et plus particulièrement la gestion du rayonnement solaire. La plupart sont des scénarios exploratoires (voir la définition au 2.2 page 12). La science du système terre n'a pas besoin d'être reliée à des valeurs morales prescrivant ce qu'il faudrait faire ou éviter.

Il ne s'agit pas de scénarios essentiellement narratifs mais de scénarios au sens des modélisateurs, qui paramétrisent des simulations numériques (la distinction est discutée au 2.3 page 16). La nécessaire habitude de pratiquer des analyses de sensibilité dans les modèles du système terre explique en partie que le nombre de scénarios sur la gestion du rayonnement solaire soit relativement élevé, en comparaison avec d'autres technologies de géo-ingénierie.

Ces scénarios sont organisés en trois groupes. Le premier regroupe des scénarios globaux étudiant la question de l'efficacité de la géo-ingénierie. Le second regroupe aussi des scénarios globaux mais la question est celle du risque de catastrophe. Le troisième regroupe les scénarios plus sectoriels.

Les trois premières lignes du Tableau 3 page 20 présentent les scénarios sur l'efficacité de la gestion du rayonnement solaire. (Wigley 2006) montre que l'effet refroidissant de l'injection annuelle des précurseurs d'aérosols sulfates dans l'atmosphère pourrait être efficace et permettre de gagner du temps pour réduire les émissions de CO₂. Sur l'optimisation de l'efficacité, (Volodin et al. 2011) ont réalisé des simulations (non reprises dans le tableau) montrant que l'effet refroidissant était maximum pour une injection près de l'équateur vers 22-24 km d'altitude. (Ricke et al. 2010) montrent que la gestion du rayonnement solaire pourrait atténuer les changements extrêmes de température et de précipitation, mais ne permettrait pas de stabiliser le climat dans toutes les régions du monde simultanément, ce qui compliquerait sensiblement tout accord diplomatique sur le sujet. Enfin (Kravitz et al. 2011) ont défini un jeu de scénarios pour étudier les effets d'une manipulation du rayonnement solaire dans le cadre du

Geoengineering Models Intercomparison Project (GEOMIP) basé sur les trajectoires du Climate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Les résultats du scénario G1 de compensation du réchauffement global élevé, obtenus avec une douzaine de modèles, mettent en évidence l'augmentation de la productivité primaire de la végétation par la fertilisation par le CO₂ mais aussi la non-uniformité des effets régionaux (Kravitz et al. 2013).

Référence	Scénarios	Description
(Wigley 2006)	LOW GEO MID GEO HIGH GEO	Atmospheric SO ₂ injection scenarios ramping up from 2010.. HIGH GEO corresponds approximately to the steady-state forcing that would result from eruptions of Pinatubo every two years. MID GEO every four. LOW GEO scales back to zero injection by 2080
(Ricke et al. 2010) 54		Scénarios de stabilisation de température, étude régionalisée des effets en température et précipitation avec climateprediction.org
(Kravitz et al. 2011)	GeoMIP G1, GeoMIP G2, GeoMIP G3solar, GeoMIP G3, GeoMIP G4	G1 : 4xCO ₂ (=expérience CMIP5 6.3) compensé par une réduction uniforme de l'insolation. G2 : +1%CO ₂ /an (=expérience CMIP 6.1) compensée par une réduction uniforme de l'insolation. G3solar : RCP4.5 compensée par une réduction uniforme de l'insolation. G3 : RCP4.5 compensée par injection de SO ₂ . G4 : RCP4.5 + 1/4 Pinatubo par an (~5 Tg SO ₂ /an injecté à 16-25km à l'équateur).
(Jones et al. 2013)	GeoMIP G2	G2 : +1%CO ₂ /an (=expérience CMIP 6.1) compensée par une réduction uniforme de l'insolation qui cesse après 50 ans
(Brovkin et al. 2009)	CTRL AER0 AER2 AER4 2°CO ₂ INS2 AER2CEASE	CTRL : release of 5,000 GtC and no compensation Simulation AER0, AER2, and AER4 : aerosol-induced compensation of global temperature above thresholds of 0° , 2° , and 4° C, respectively Simulation 2° CO ₂ : pure CO ₂ forcing which keeps global annual mean temperature increase at the 2° C level. INS2 : same as AER2 but with compensation for radiative CO ₂ forcing achieved through a reduction in the solar constant. AER2CEASE : follow AER2 till the year 2300 then sulfur emissions are set to zero.
(Matthews & Caldeira 2007)	A2 GEO ON_2025 ON_2050 ON_2075 OFF_2025 OFF_2050 OFF_2075 A2+CS GEO+CS OFF_2050+CS	Observed CO ₂ concentrations followed by SRES A2 A2 with geoengineering implemented at 2000 A2 with geoengineering implemented at 2025 A2 with geoengineering implemented at 2050 A2 with geoengineering implemented at 2075 GEO with geoengineering failure at 2025 GEO with geoengineering failure at 2050 GEO with geoengineering failure at 2075 A2 with doubled climate sensitivity after 2005 GEO with doubled climate sensitivity after 2005 OFF_2050 with doubled climate sensitivity after 2005

Tableau 3: Scénarios explorant la gestion du rayonnement solaire.

Les lignes 4, 5 et 6 du Tableau 3 page 20 présentent des scénarios sur la terminaison abrupte de la gestion du rayonnement solaire.

(Jones et al. 2013) décrivent des simulations dans lesquelles le CO₂ atmosphérique augmente de 1 % par an et le réchauffement induit est compensé par une réduction de la constante solaire mais pendant 50 ans seulement, sur la base du scénario GeoMIP G2. Les 11 modèles climatiques différents s'accordent sur une augmentation rapide de la température planétaire moyenne après la fin de la compensation, accompagnée par une augmentation des taux de précipitation moyenne globale et diminution dans la couverture de glace. Il n'y a pas d'accord sur l'impact de la résiliation de la géo-ingénierie sur la productivité primaire nette. Il y a un consensus considérable sur la répartition géographique des changements de température suivant la résiliation : un réchauffement rapide dans les hautes latitudes et sur les continents. Les modèles s'accordent également sur une réductions de la banquise arctique, mais moins pour l'Antarctique. Les modèles sont moins d'accord en ce qui concerne la répartition des changements des précipitations et de la productivité primaire nette, avec un plus grand degré de consensus à des latitudes plus élevées.

Ces résultats confirment les travaux précurseurs de (Brovkin et al. 2009) et (Matthews & Caldeira 2007) qui avait déjà mis en évidence le risque d'effet rebond avec des modèle de complexité intermédiaire climat-cycle du carbone. Si on cesse de refroidir, alors le réchauffement est encore plus rapide et intense. Les scénarios utilisés sont décrits au Tableau 3.

Ces simulations supportent l'approche plus normative de (Baum et al. 2013) qui racontent les développent en racontant l'histoire de la double catastrophe. Il s'agit d'un scénario redouté, qui narre un risque important de la gestion du rayonnement solaire : celui d'une interruption soudaine de l'action. Dans le scénario, une crise sociale majeure fait cesser l'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère. Cette cause peut être une pandémie, une guerre nucléaire, ou une autre catastrophe globale. L'effet refroidissant du programme de SRM s'estompant, un changement climatique rapide se produit, démultipliant les effets de la catastrophe initiale à cause de la vulnérabilité préalable de la population.

Un troisième groupe de simulations visent à examiner les conséquences locales ou sectorielles de la gestion du rayonnement solaire. (Naik et al. 2003) examinent l'impact de la géoingénierie sur la biosphère terrestre. (Pongratz et al. 2012)

examinent comment les rendements agricoles changent entre un scénario 2xCO₂ et un scénario SRM. (Caldeira & Wood 2008) montrent que la gestion du rayonnement solaire pourrait fonctionner à peu près aussi bien à toutes les latitudes, y compris près des pôles.

Tous les scénarios sur le SRM discutés jusqu'ici dans cette section sont essentiellement de « scénarios au sens du modélisateur » à vocation exploratoire. Il s'agit de paramétrer les simulations et faire tourner les modèles, mais la faisabilité politique et économique n'est pas un souci. Diminuer la constante solaire dans un modèle est un calcul sans prétention de faisabilité technique. La suite explore des scénarios plus normatifs.

Le quatrième groupe de scénarios distingués ici explore l'idée d'une urgence climatique, un concept qu'il n'est pas donné de développer ici autant qu'il le mériterait. Le recours à la géoingénierie, et plus particulièrement au SRM, est justifié comme une réponse à une non linéarité climatique. C'est le point de vue défendu dans l'essai influent de (Crutzen 2006) :

...the albedo enhancement scheme should only be deployed when there are proven net advantages and in particular when rapid climate warming is developing, paradoxically, in part due to improvements in worldwide air quality. Importantly, its possibility should not be used to justify inadequate climate policies, but merely to create a possibility to combat potentially drastic climate heating (e.g. Andreae et al., 2005; Stainforth et al., 2005; Crutzen and Ramanathan, 2003; Anderson et al., 2003a,b). The chances of unexpected climate effects should not be underrated, as clearly shown by the sudden and unpredicted development of the antarctic ozone hole.

L'essai de Crutzen ne contient pas de scénario détaillé. Nous n'avons pas trouvé de simulations numériques par des modèles du système terre quantifiant l'histoire de l'urgence climatique. Néanmoins une bonne part du rapport de (Blackstock et al. 2009) peut être lue comme un document de prospective qualitative décrivant l'histoire de l'utilisation du SRM en réponse à une urgence climatique. Même si le document se focalise sur l'agenda de recherche dans les 10 prochaines années, l'Illustration 2 page 23 décrit le début, le milieu et la fin de ce recours.

Recourir au SRM n'est cependant pas la seule et unique réponse pensable à une urgence climatique, voir (Swart & Marinova 2010) pour une mise en contexte par rapport d'autres options de « plan B ».

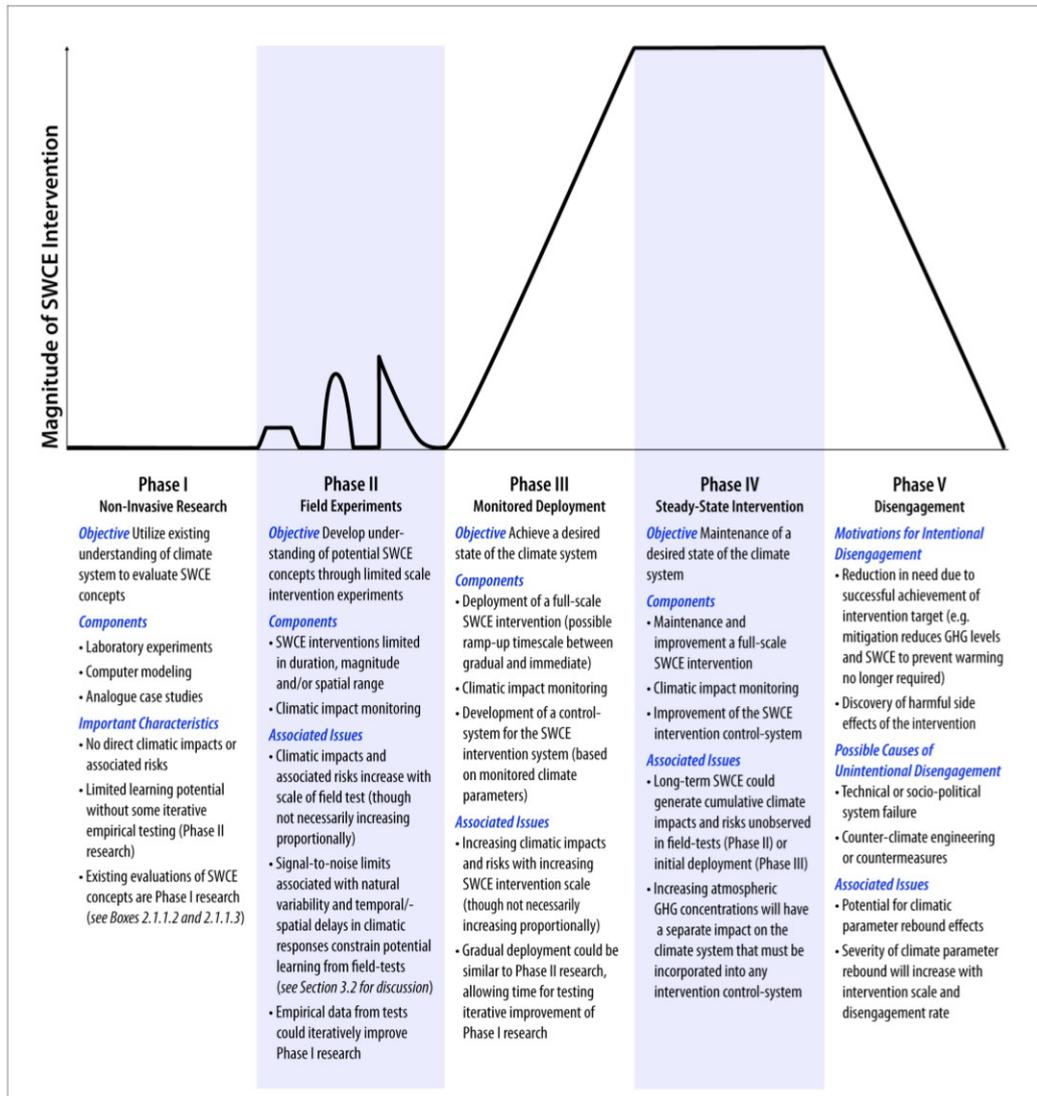


Illustration 2: Phasage la géo-ingénierie climatique par gestion du rayonnement solaire (SWCE).

Source : Figure 4 de Blackstock et al. 2009.

3.2. Scénarios technologiques ou sociaux

Cette section décrira deux groupes de scénarios. Elle évoquera d'abord les études du potentiel et de l'efficacité pour une technique de géo-ingénierie spécifique, études plutôt normatives désirées, certaines étant presque des feuilles de route. Puis la description se tournera vers un second groupe de scénarios qui explore la géo-ingénierie dans des aspects plus holistiques.

La géo-ingénierie comprend un grand nombre de technologies discutées par exemple dans le rapport de l'ARP REAGIR. Pour chacune de ces technologies, la question de son potentiel pour produire des effets à grande échelle sur le climat est parmi les premières à se poser. Pour l'étudier, cela conduit à formuler des scénarios où la partie développement technologique est aussi essentielle que la partie climatique.

Les scénarios et feuilles de route publiées pour les diverses technologies proposées sont nombreuses. Citons par exemple l'étude du potentiel technique maximal du biochar par (Woolf et al. 2010) ; les discussions de (Hartmann et al. 2013) sur potentiel de la fertilisation minérale ; les simulations climatiques de (Singarayer et al. 2009) explorant l'effet d'une manipulation de l'abedo des cultures ; (Klein et al. 2011) sur la production d'électricité par gazéification de la biomasse, cycle combiné et captage stockage du CO₂ (Bio-IGCC+CCS) ; (Cao & Caldeira 2010) sur la fertilisation des océans par le fer ; ainsi que (Dooley & Calvin 2011) sur le captage et stockage du CO₂. (Chen & Tavoni 2013; Keith et al. 2006) examinent des trajectoires d'émission avec la capture directe à partir de l'air.

Les scénarios de développement technologique de ce groupe peuvent poser des problèmes à l'interface science-société particuliers pour plusieurs raisons:

- Les groupes qui se chargent de développer une technologie sont aussi naturellement les plus intéressés pour produire de tels scénarios. Les conditions sont donc favorables au conflit d'intérêt nuisible à la neutralité scientifique.
- Certaines de ces technologies, comme la capture à partir de l'air, en sont à un stade où le marketing et les perspectives de futures très positives sont critiques pour la réussite du développement de l'entreprise.
- Le rapport entre un potentiel technique et un potentiel réaliste est facile à perdre de vue. Or ce dernier peut être plusieurs ordres de grandeur inférieur pour des raisons économiques, sociales ou géopolitiques.
- Les médias accentuent le caractère spectaculaire des études. La simplification et la personnalisation nécessaires pour présenter des idées nouvelles à un large public peut jouer contre les précautions de la science.

Formuler les études en termes de scénarios normatifs désirés ou redoutés permet d'aborder ces conflits avec plus de transparence, en affichant d'emblée les parti pris et le caractère possible mais non nécessaire ni même probable du futur décrit.

À côté de cette série d'études prospectives orientées sur la technologie, d'autres

chercheurs ont élaboré des études prospectives orientées sur la société.

Le Yale Climate and Energy Institute (YCEI) et le Centre for International Governance Innovation (CIGI) ont organisé en Septembre 2011 un atelier de travail « Solar Geoengineering Scenarios Workshop » pour produire un jeu de scénarios sur la gestion du rayonnement solaire (Banerjee et al. 2013).

A la différence des simulations décrites au 3.1, il s'agissait explicitement d'un exercice de prospective animé par un professionnel du domaine. L'atelier de travail s'est donné un horizon temporel entre 2050 et 2100. La dynamique du contexte global dans lequel les technologies de SRM se développeraient a aussi été étudiée. Les participants étaient d'origine disciplinaire et générationnelle diverse, la diversité internationale étant moins représentée.

Les scénarios ont été construits selon une méthode matricielle, en croisant deux axes de tension, chacun étant caractérisé par l'opposition entre deux extrêmes (voir aussi 2.1 page 6).

- L'axe X porte sur la gouvernance : exclusive ou inclusive. Quels critères guident l'action des acteurs politiques, États-Nations ou autres ? La direction « exclusive » signifie que les acteurs mettent en oeuvre des agendas qui reflètent leur intérêt propre au sens étroit, voire égoïste, dans une géopolitique de réalisme. La direction « inclusive » signifie que les acteurs ont une conception plus large du bien commun global, et poursuivent des intérêts plus collectifs.
- L'axe Y porte sur la contrôlabilité de la technologie et de ses effets. La direction « contrôlable » signifie que les aspects techniques et scientifiques du SRM sont compris, elle peut être mise en oeuvre de façon raisonnablement prédictible avec confiance dans l'évaluation des risques. La direction « incontrôlable » signifie que l'on s'attend à des surprises quant à la réponse du climat au SRM.

Cela a conduit à produire quatre scénarios de déploiement du SRM, un par cadran. De plus, deux scénarios de non-déploiement ont été produits, différenciés selon l'axe de tension Y sur la contrôlabilité. Chaque scénario est décrit en deux pages de texte, sans simulations numériques. Dans ces deux pages, la première donne quelques coups de projecteur sur l'histoire du dossier climat comme il pourrait se jouer entre 2020 et 2070 à peu près. La narration est sous la forme d'une séquence de coupures de presse : titre, date et quelques lignes descriptives à propos d'événements représentatifs. Ce dossier est ensuite suivi d'un texte d'une page

environ, qui dit l'histoire sous la forme d'un court article plus structuré.

Sans traduire l'intégralité des scénarios, leurs ressorts essentiels sont les suivants (les noms entre guillemets sont de moi) :

1. Contrôlable Égoïste. « Sophisticated ». Les négociations climatiques sont visiblement inutiles et s'effondrent, la Chine admet en 2020 pratiquer le SRM avec des résultats positifs sur les récoltes, la technologie et le type de particules progressent, des négociations en vue d'un contrôle régionalisé des climats locaux n'aboutissent pas et des usages militaires surgissent.
2. Contrôlable Collectif. « Carbon is karma ». Après des essais prometteurs au Royaume Uni et en Russie, les USA adoptent la géo-ingénierie vers 2030, relançant les négociations climat aboutissant à une agence de régulation global de la géo-ingénierie, à laquelle des contre-pouvoirs globaux n'émergent que vers le milieu du siècle.
3. Incontrôlable Collectif. « Greenfinger ». Face à un début de relargage massif du méthane précédemment piégé par le permafrost arctique, et à la paralysie des Nations Unies bloquées par l'Inde qui craint les effets secondaires du SRM, en 2025 un milliardaire commande une flotte d'avions basée dans les territoires autonomes du Canada pour injecter des aérosols réfléchissants. L'emballement du changement climatique est évité, au prix de graves perturbations de la mousson en Asie du Sud dont la solidarité internationale ne peut qu'atténuer les pires conséquences. La flotte passe sous contrôle onusien à la mort du milliardaire en 2040.
4. Incontrôlable Égoïste. « Ending in ice ». L'initiative de gestion du rayonnement solaire menée par le Consortium Dédale s'avère bien trop efficace et irréversible. Le refroidissement global renverse les flux migratoires du Nord vers le Sud, exacerbant les tensions internationales.
5. Contrôlable Non-déploiement. « Green ». Alors que vers 2020 la science et les technologies de géo-ingénierie apparaissent convaincantes, les opinions publiques contraires bloquent partout la géo-ingénierie, alors que la transition énergétique induit une mitigation importante des émissions. La marée montante de l'écologie politique internationale aboutit en 2033 à la signature d'un contrat social global pour une croissance durable verte.
6. Incontrôlable Non-déploiement. « Miscarried ». En 2018, des explosions volcaniques majeures surajoutées à des expérimentations de gestion du rayonnement solaire créent une année exceptionnellement froide, qui impacte gravement les récoltes et la sécurité alimentaire. La géo-ingénierie

est bannie en 2036 suite à des révélations concernant les impacts des nanoparticules sur la santé. Le réchauffement global atteint +4°C en 2050.

Les travaux ont été conduits sur un rythme accéléré, la durée d'une journée et demi étant courte pour ce genre d'exercice. En particulier la discussion des inconnues inconnues s'est limitée à une énumération des événements disruptifs, sans les intégrer aux processus d'écriture des scénarios.

Dans le cadre du Harvard Project on Climate Agreements, (Bodansky 2011; Bodansky 2013) a étudié diverses approches de la géo-ingénierie sans se limiter au SRM. Il a analysé leur statut actuel vis à vis du droit international, et examiné quatre scénarios de régulation particulièrement préoccupants.

1. Inadequate Research Funding. Dans ce scénario les financements de la recherche sur la géo-ingénierie restent à leur niveau actuel, faibles. Le risque est alors qu'on ne maîtrise pas les coûts, potentiels et risques des diverses technologies, rendant plus probables des échecs en cas de mise en oeuvre. La gouvernance internationale en réponse à ce scénario viserait à stimuler la dépense publique et privée dans le domaine. Les collaborations existantes autour de la station spatiale internationale ou du LHC sont des modèles de partage des coûts. Il importe aussi d'accroître la notoriété et la légitimité de l'idée.
2. Premature Rejection. Dans ce scénario un moratoire voire une interdiction est prononcée, comme pour la chasse à la baleine, l'exploitation minière de l'antarctique ou la nourriture GMO en Europe. Comme dans le scénario précédent, les progrès de la connaissance sont gelés. Un effet pervers est qu'un moratoire pourrait déplacer la recherche vers les États qui ne l'appliqueraient pas, donc des États moins prudents. La gouvernance internationale en réponse à ce scénario viserait à créer des institutions régulatrices de confiance, aptes à prévenir toute prise de risque excessive et perçues comme telles.
3. Greenfinger. Dans ce scénario un acteur privé entreprend la géo-ingénierie, qui apparaît comme une menace plutôt qu'une solution. La gouvernance internationale en réponse se compare à la lutte contre le terrorisme. Il importerait de promouvoir la coopération internationale et clarifier les zones de juridiction.
4. Unilateral or minilateral state action. (Long et al. 2011) estiment qu'une douzaine d'États ont la capacité de déployer les techniques d'injection

d'aérosols stratosphériques. Cela est à la fois rassurant –en tant que perspective de répondre au changement climatique qui n'est pas conditionnée par une pleine coopération internationale– et inquiétant – en tant qu'un seul pays pourrait dérégler le climat du monde entier. Un passage à l'acte unilatéral par un pays peut être rationnel en situation de dernier recours si sa survie est menacée, mais ce type de situation se définit rarement de façon claire. Face à la perspective de ce scénario, la gouvernance internationale pourrait s'inspirer des pratiques gouvernant le recours à la force militaire par les États. Devant les limites de ces pratiques pour prohiber les activités unilatérales, l'accent pourrait être mis sur les mécanismes de consultation et de notification.

Ces réponses de gouvernance internationale devront s'inscrire dans les dispositifs existants. La Convention Climat n'est pas nécessairement le plus plausible, ayant montré ses limites en matière d'efficacité fonctionnelle et de prise de décision.

3.3. Scénarios exploratoires du GIEC : RCP, SSP et SPA

Cette section décrit une approche matricielle de la création de scénarios exploratoires, c'est à dire construits pour explorer l'espace des futurs plausibles. Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC définit en effet deux jeux de trajectoires : les Representative Concentration Pathways (RCP) et les Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Ces trajectoires sont aujourd'hui des références incontournables pour les analyses du changement climatique en général. Une troisième dimension, les Shared Policy Assumptions (SPA) décrit les options de politique climatiques envisageables.

L'approche est matricielle au sens où c'est la combinatoire entre les trajectoires RCP, les trajectoires SSP et le jeu de SPA qui permet de définir des scénarios.

Trajectoires RCP du GIEC

Le jeu de trajectoires RCP (van Vuuren et al. 2011) est utilisé dans le rapport du Groupe de Travail I du GIEC, particulièrement au chapitre 12 (voir Stocker, Qin & Plattner 2013, TS 5.2 pp. 79-81 pour une synthèse). C'est le jeu de trajectoires utilisé dans l'exercice d'intercomparaison de modèles CMIP5. Il remplace pour l'essentiel les scénarios définis antérieurement dans le IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES). Les Illustration 3 et Illustration 4, page 30, représentent ces scénarios en termes de forçages radiatifs, de gaz à effet de serre et d'émissions de CO₂

La gamme des réponses décrites dans les RCP va de la poursuite tendancielle du

réchauffement à la stabilisation du forçage radiatif, et même jusqu'à un scénario drastique de mitigation (RCP2.6) qui stabilise puis réduit lentement le forçage radiatif après le milieu du 21^e siècle.

Les modèles climatiques analysés dans le rapport projettent que le RCP2.6 correspond à une réduction de 50 % (intervalle des résultats : 14-96 %) des émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport aux niveaux de 1990. À la fin du 21^e siècle, environ la moitié des modèles infèrent des émissions légèrement au dessus de zéro, tandis que l'autre moitié infèrent un retrait net du CO₂ de l'atmosphère (Stocker, Qin & Plattner 2013, paragr.TS 5.6 p. 93).

(Bellamy et al. 2012) remarquent que les RCP comprennent au moins deux propositions de géo-ingénierie :

- Le RCP 4.5 inclut une afforestation à grande échelle : « *RCP4.5 shows a clear turning point in global land use based on the assumption that carbon in natural vegetation will be valued as part of global climate policy. As a result of reforestation programs, the use of cropland and grassland decreases, following considerable yield increases and dietary changes.* » (van Vuuren et al. 2011)
- Le RCP 2.6 inclut un recours à la Bio-Energy avec Carbon Sequestration (BECS). Son extension après 2100, le ECP 3PD requiert d'autres technologies qui retirent le CO₂ de l'atmosphère : « *For ECP3PD, the assumed continuation of negative emissions implies that sufficient storage capacity will be found to store CO₂ from bio-energy, CCS use, or other technologies that may remove CO₂ from the atmosphere. Storage before 2100 (of emissions from bio-energy and fossil fuels) equals about 600 GtC. Assuming that after 2100 the storage potential only will be used for bio-energy and CCS (BECCS), the continuation of the scenario would at least require another 200 GtC. Optimistic estimates of storage potential are consistent with these numbers.* »

Néanmoins comme les principales conclusions du rapport AR5 sur la géo-ingénierie rappelées dans l'encadré Texte 1 page 31 ci après le montrent, le GIEC n'a pas discuté directement le lien entre les RCP et la géo-ingénierie. Le rapport indique explicitement que la faisabilité technique des RCP n'a pas été examinée dans la littérature analysée.

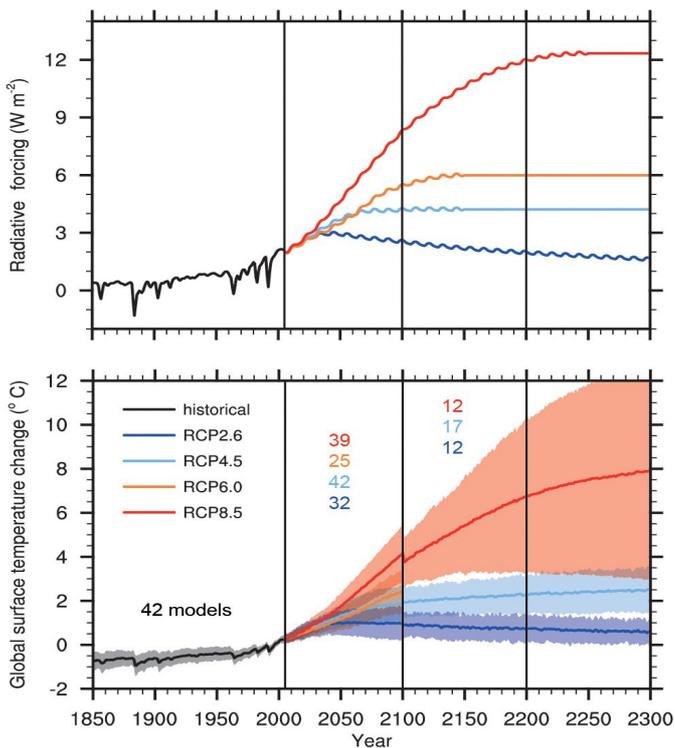


Illustration 3: RCP, forçage radiatif et réchauffement global.

(Top) Total global mean radiative forcing for the four RCP scenarios based on the Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change (MAGICC) energy balance model. Note that the actual forcing simulated by the CMIP5 models differs slightly between models.

(Bottom) Time series of global annual mean surface air temperature anomalies (relative to 1986–2005) from CMIP5 concentration-driven experiments. Projections are shown for each RCP for the multi-model mean (solid lines) and ± 1.64 standard deviation (5 to 95%) across the distribution of individual models (shading), based on annual means. The 1.64 standard deviation range based on the 20 yr averages 2081–2100, relative to 1986–2005, are interpreted as likely changes for the end of the 21st century. Discontinuities at 2100 are due to different numbers of models performing the extension runs beyond the 21st century and have no physical meaning. Numbers in the same colours as the lines indicate the number of different models contributing to the different time periods.

Source : Figure TS.15 de (Stocker, Qin & Plattner 2013), avec permission.

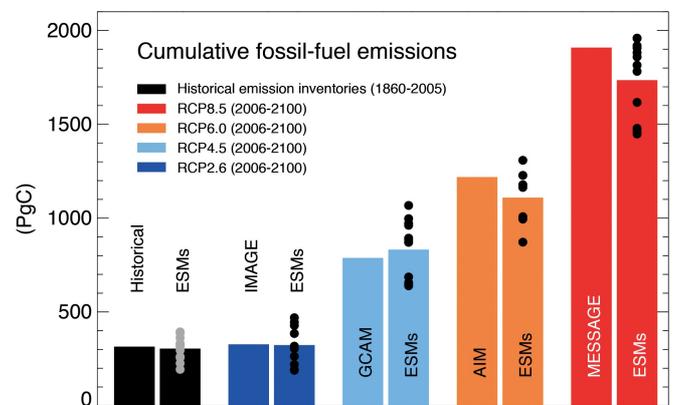
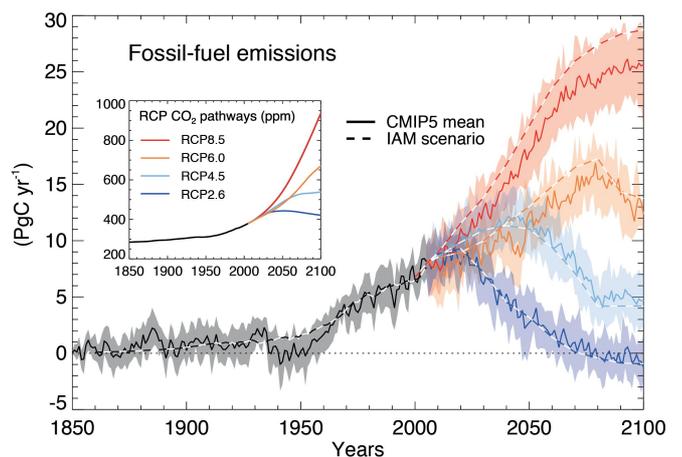


Illustration 4: RCP, émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles

Compatible fossil fuel emissions simulated by the CMIP5 models for the four RCP scenarios. (Top) Time series of annual emission (PgC yr⁻¹). Dashed lines represent the historical estimates and RCP emissions calculated by the Integrated Assessment Models (IAMs) used to define the RCP scenarios, solid lines and plumes show results from CMIP5 Earth System Models (ESMs, model mean, with one standard deviation shaded). (Bottom) Cumulative emissions for the historical period (1860–2005) and 21st century (defined in CMIP5 as 2006–2100) for historical estimates and RCP scenarios. Left bars are cumulative emissions from the IAMs, right bars are the CMIP5 ESMs multi-model mean estimate and dots denote individual ESM results. From the CMIP5 ESMs results, total carbon in the land-atmosphere–ocean system can be tracked and changes in this total must equal fossil fuel emissions to the system. Hence the compatible emissions are given by cumulative emissions = $\Delta CA + \Delta CL + \Delta CO$, while emission rate = $d/dt [CA + CL + CO]$, where CA, CL, CO are carbon stored in atmosphere, land and ocean respectively. Other sources and sinks of CO₂ such as from volcanism, sedimentation or rock weathering, which are very small on centennial time scales are not considered here. {Box 6.4; Figure 6.25}.

Source : Figure TS.19 (Stocker, Qin & Plattner 2013).

SRM remains unimplemented and untested but, if realizable, could offset a global temperature rise and some of its effects. There is medium confidence that SRM through stratospheric aerosol injection is scalable to counter the RF and some of the climate effects expected from a twofold increase in CO₂ concentration. There is no consensus on whether a similarly large RF could be achieved from cloud brightening SRM due to insufficient understanding of aerosol–cloud interactions. It does not appear that land albedo change SRM could produce a large RF. Limited literature on other SRM methods precludes their assessment. {7.7.2, 7.7.3}

Numerous side effects, risks and shortcomings from SRM have been identified. SRM would produce an inexact compensation for the RF by GHGs. Several lines of evidence indicate that SRM would produce a small but significant decrease in global precipitation (with larger differences on regional scales) if the global surface temperature were maintained. Another side effect that is relatively well characterized is the likelihood of modest polar stratospheric ozone depletion associated with stratospheric aerosol SRM. There could also be other as yet unanticipated consequences. {7.6.3, 7.7.3, 7.7.4}

As long as GHG concentrations continued to increase, the SRM would require commensurate increase, exacerbating side effects. In addition, scaling SRM to substantial levels would carry the risk that if the SRM were terminated for any reason, there is high confidence that surface temperatures would increase rapidly (within a decade or two) to values consistent with the GHG forcing, which would stress systems sensitive to the rate of climate change. Finally, SRM would not compensate for ocean acidification from increasing CO₂ {7.7.3, 7.7.4}.

Source : (Stocker, Qin, Plattner, et al. 2013, p.27, 98 box TS.7)

Voir aussi ibid. FAQ 7.3

Texte 1: Conclusions principales du 5e rapport du GIEC sur la géo-ingénierie.

Trajectoires SSP du GIEC

Les SSP (Shared Socioeconomic Pathways) sont des scénarios de trajectoires socio-économiques (Kriegler et al. 2012; O'Neill et al. 2012). Ils complètent à ce titre les RCP qui sont davantage orientés par la description de trajectoires climatiques. Les SSP s'intéressent à des variables telles que la population, le produit national brut, la répartition de la richesse, les niveaux d'éducation, la santé publique, le degré d'urbanisation ou encore la disponibilité des technologies.

Les SSP sont définis d'abord par des descriptions narratives, qui ont ensuite servi de base pour élaborer des jeux d'indicateurs quantifiés. Ces indicateurs servent à deux communautés scientifiques, celle de la modélisation intégrée du changement climatique et celle de l'analyse des impacts, adaptation et vulnérabilité.

Les SSP se répartissent selon deux axes. L'un représente l'ampleur du défi en matière d'adaptation des sociétés au changement climatique, l'autre l'ampleur du défi en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Ces deux axes ont conduit à définir les cinq SSP représentés Illustration 5 page 33, au Tableau 4 page 35, et synthétisés ainsi par (Mondon & Imbard 2013) :

- Le SSP1 (faible défi d'adaptation, faible défi d'atténuation), décrit un monde marqué par une forte coopération internationale, donnant la priorité au développement durable ;
- Le SSP2 (défi d'adaptation moyen, défi d'atténuation moyen), décrit un monde caractérisé par la poursuite des tendances actuelles ;
- Le SSP3 (défi d'adaptation élevé, défi d'atténuation élevé) dépeint un monde fragmenté affecté par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle et peu soucieuses de l'environnement.
- Le SSP4 (défi d'adaptation élevé, faible défi d'atténuation) est celui d'un monde marqué par de grandes inégalités entre pays et en leur sein. Une minorité y serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus faciles à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.
- Le SSP5 (faible défi d'adaptation, défi d'atténuation élevé) décrit un monde qui se concentre sur un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement, fondé sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone; la hausse du niveau de vie permettrait d'augmenter la capacité d'adaptation, notamment grâce au recul de l'extrême pauvreté.

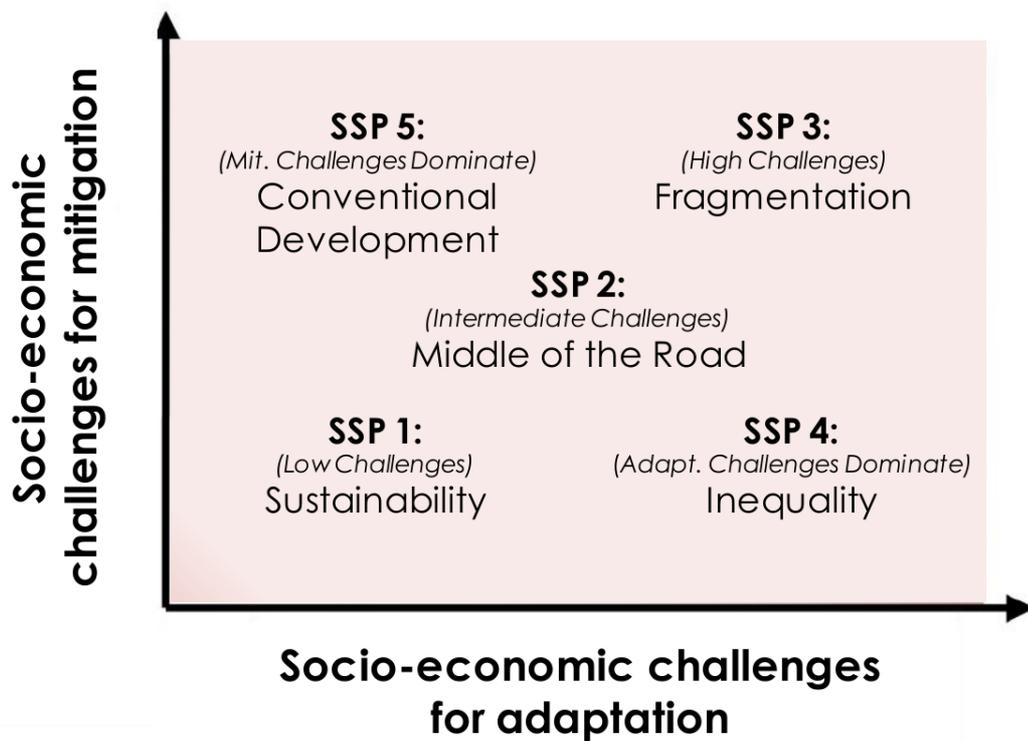


Illustration 5: Les cinq Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

Source (O'Neill et al. 2012).

SSP1 – Sustainability

This is a world making relatively good progress towards sustainability, with sustained efforts to achieve development goals, while reducing resource intensity and fossil fuel dependency. Elements that contribute to this are a rapid development of low-income countries, a reduction of inequality (globally and within economies), rapid technology development, and a high level of awareness regarding environmental degradation. Rapid economic growth in low-income countries reduces the number of people below the poverty line.

The world is characterized by an open, globalized economy, with relatively rapid technological change directed toward environmentally friendly processes, including clean energy technologies and yield-enhancing technologies for land. Consumption is oriented towards low material growth and energy intensity, with a relatively low level of consumption of animal products. Investments in high levels of education coincide with low population growth.

Concurrently, governance and institutions facilitate achieving development goals and problem solving. The Millennium Development Goals are achieved within the next decade or two, resulting in educated populations with access to safe water, improved sanitation and medical care. Other factors that reduce vulnerability to climate and other global changes include, for example, the successful implementation of stringent policies to control air pollutants and rapid shifts toward universal access to clean and modern energy in the developing world.

SSP 2 - Middle of the Road (or Dynamics as Usual, or Current Trends Continue, or Continuation, or Muddling Through)

In this world, trends typical of recent decades continue, with some progress towards achieving development goals, reductions in resource and energy intensity at historic rates, and slowly decreasing fossil fuel dependency.

Development of low-income countries proceeds unevenly, with some countries making relatively good progress while others are left behind. Most economies are politically stable with partially functioning and globally connected markets. A limited number of comparatively weak global institutions exist.

Per-capita income levels grow at a medium pace on the global average, with slowly converging income levels between developing and industrialized countries. Intra-regional income distributions improve slightly with increasing national income, but disparities remain high in some regions. Educational investments are not high enough to rapidly slow population growth, particularly in low-income countries. Achievement of the Millennium Development Goals is delayed by several decades, leaving populations without access to safe water, improved sanitation, medical care. Similarly, there is only intermediate success in addressing air pollution or improving energy access for the poor as well as other factors that reduce vulnerability to climate and other global changes.

SSP 3 - Fragmentation (or Fragmented World)

The world is separated into regions characterized by extreme poverty, pockets of moderate wealth and a bulk of countries that struggle to maintain living standards for a strongly growing population.

Regional blocks of countries have re-emerged with little coordination between them. This is a world failing to achieve global development goals, and with little progress in reducing resource intensity, fossil fuel dependency, or addressing local environmental concerns such as air pollution. Countries focus on achieving energy and food security goals within their own region.

The world has de-globalized, and international trade, including energy resource and agricultural markets, is severely restricted. Little international cooperation and low investments in technology development and education slow down economic growth in high-, middle-, and low-income regions. Population growth in this scenario is high as a result of the education and economic trends. Growth in urban areas in low-income countries is often in unplanned settlements.

Unmitigated emissions are relatively high, driven by high population growth, use of local energy

resources and slow technological change in the energy sector. Governance and institutions show weakness and a lack of cooperation and consensus; effective leadership and capacities for problem solving are lacking. Investments in human capital are low and inequality is high. A regionalized world leads to reduced trade flows, and institutional development is unfavorable, leaving large numbers of people vulnerable to climate change and many parts of the world with low adaptive capacity. Policies are oriented towards security, including barriers to trade.

SSP 4 - Inequality (or Unequal World, or Divided World)

This pathway envisions a highly unequal world both within and across countries.

A relatively small, rich global elite is responsible for much of the emissions, while a larger, poorer group contributes little to emissions and is vulnerable to impacts of climate change, in industrialized as well as in developing countries.

In this world, global energy corporations use investments in R&D as hedging strategy against potential resource scarcity or climate policy, developing (and applying) low-cost alternative technologies. Mitigation challenges are therefore low due to some combination of low reference emissions and/or high latent capacity to mitigate. Governance and globalization are effective for and controlled by the elite, but are ineffective for most of the population. Challenges to adaptation are high due to relatively low income and low human capital among the poorer population, and ineffective institutions.

SSP 5: Conventional Development (or Conventional Development First)

This world stresses conventional development oriented toward economic growth as the solution to social and economic problems through the pursuit of enlightened self interest.

The preference for rapid conventional development leads to an energy system dominated by fossil fuels, resulting in high GHG emissions and challenges to mitigation. Lower socio-environmental challenges to adaptation result from attainment of human development goals, robust economic growth, highly engineered infrastructure with redundancy to minimize disruptions from extreme events, and highly managed ecosystems .

Tableau 4: Descriptions des Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

La combinaison des deux familles de trajectoires RCP et SSP permet une approche matricielle de la construction de scénarios (van Vuuren et al. 2014). Mais certaines combinaisons semblent moins plausibles. Par exemple la trajectoire de concentration la plus basse RCP2.6 semble difficilement compatible avec la trajectoire dans lequel les défis des politiques climat sont les plus élevés SSP3. De tels jugements peuvent se représenter par une matrice comme le Tableau 5. Dans ce type de matrice, les lignes et les colonnes sont des *trajectoires*, au croisement desquelles on peut écrire des *scénarios*, plausibles ou non. Le X signifie que la combinaison est jugée plausible.

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
RCP 8.5			X		
RCP 6.0		X	X	X	X
RCP 4.5	X	X	X	X	X
RCP 2.6	X	X		X	

Tableau 5: Exemple de matrice de compatibilité entre les trajectoires RCP et SSP..

Pour la relation avec les anciens scénarios SRES (van Vuuren & Carter 2014) suggèrent la correspondance suivante :

SSP1 « Sustainable Pathway »	RCP 4.5	SRES B1
SSP2 « Moderate Pathway »	RCP 6.0	SRES A1B ou B2
SSP3 « Rocky Road »	RCP 8.5	SRES A2
SSP5 « Conventional development »	RCP 8.5	SRES A1F1

Tableau 6: Correspondance entre scénarios SRES et nouvelles trajectoires RCP et SSP.

La dernière ligne, qui n'est pas cohérente avec le Tableau 5, montre le caractère subjectif et toujours inachevé de ce type d'exercice.

Les Shared Climate Policy Assumptions (SPA)

Les SPAs sont des hypothèses de politique climatiques standardisées définies pour structurer les analyses dans la communauté scientifique (Kriegler et al. 2014). Les SPA sont complémentaires des SSP dans la mesure où les trajectoires

socioéconomiques SSP sont définies en l'absence de toute politique climatique et de tout impact du changement climatique. Les SSP représentent donc des trajectoires de référence, l'incertitude sur le contexte. Les SPA représentent les options stratégiques à évaluer.

Les SPA peuvent concerner les politiques de mitigation, par exemple « Un prix du carbone universel est instauré » ou « Des réglementations détaillées sont organisées par secteur » aussi bien que des politiques d'adaptation, par exemple « La coopération internationale pour l'adaptation atteint un niveau historiquement élevé ». La Table ci-dessous reproduit l'ensemble de quatre SPA décrit par (Kriegler et al. 2014).

Policy attribute	Reference policy	Cooperation & moderate adaptation	Middle road & aggressive adaptation	Fragmentation & moderate adaptation
Mitigation : level of global cooperation	Low	High	Medium	Low
Mitigation : start of global cooperation	Never	Early	Mid term	Late
Mitigation : sectoral coverage	Focus on electricity and industry. No significant inclusion of land use based mitigation options.	Carbon pricing on land. Full coverage of energy supply and end use sectors	Forest protection and bioenergy constraints. Energy supply, transport and industry covered.	Limited forest protection, no limitation on bioenergy use. Electricity and industry covered.
Adaptation : capacity building	Small	Moderate	Large	Moderate
Adaptation : international insurance	Only via international markets, with limited access for some countries	Insurance available for least developed countries	Global insurance provided	Only via international markets, with limited access for many countries

Tableau 7: Exemple de Shared Policy Assumptions (en colonnes).

La spécification numérique conjointe d'une trajectoire RCP, d'une trajectoire SSP et d'un jeu de SPA permet de définir un scénario « au sens du modélisateur », lorsque la combinaison est plausible. Cela permet de définir les hypothèses numériques pour l'analyse des coûts des politiques climatiques, comme l'analyse des dommages résiduels par les modèles d'évaluation intégré. Cette approche matricielle permet en particulier l'intercomparaison des modèles.

4. Quatre scénarios sur la géo-ingénierie

4.1. Motivation

(Wright, Bradfield, et al. 2013) distinguent trois motivations possibles a priori pour construire des scénarios :

1. Améliorer la connaissance des processus, des causes et des connexions logiques entre les événements, afin de découvrir les séquences que le futur pourrait suivre.
2. Défier la pensée conventionnelle, recadrer les perceptions et changer l'état d'esprit des membres dans une organisation.
3. Améliorer la prise de décision, pour informer le développement de stratégies d'action.

C'est la première motivation qui guide cette section. On laissera donc de côté les prises de position qui conduisent à des scénarios normatifs désirés ou redoutés. Et on laissera également de côté les scénarios de gouvernance et les discussions liées à la négociation climat.

On se propose ici de formuler quatre visions qui traversent l'ensemble de la discussion sur la géo-ingénierie. Les scénarios narratifs seront définis au regard des positions remarquables ressortant souvent dans la littérature, et non par une approche synthétique reprenant *ex nihilo* la question. Le but est de révéler les courants de pensée existants et d'articuler une connaissance commune.

Ce travail d'identification et de compilation des grandes visions communes dans le champ est original à notre connaissance, la connaissance commune est éparpillée dans les sources diverses discutées dans ce rapport (voir la section Références page 47). Nous analyserons ensuite comment ces scénarios de géo-ingénierie s'articulent dans la vision matricielle du GIEC basée sur les RCP, SSP et SPA.

4.2. Formulation des scénarios

Scénario 1 : L'adaptation suffit

Dans ce scénario la géo-ingénierie ne se développe pas parce qu'elle n'est ni nécessaire ni recherchée.

Les négociations internationales Paris Climat 2015 s'achèvent sur un demi succès. Un Protocole de Paris signé par l'ensemble des intervenants jette les bases d'un système international dans lequel chacun fait ce qu'il veut, mais de façon transparente. Les écologistes dénoncent un accord sans engagements fermes. De

fait les politiques climat s'avèrent peu contraignantes car très exposées à l'influence des groupes d'intérêts sectoriels et nationaux. Les quotas d'émission lorsqu'il en existe sont généreux par rapport aux besoins, la valorisation sociale des émissions évitées reste faible, le prix du CO₂ sur le marché européen ETS reste sous les 10€/t en 2030.

Le réchauffement global s'avère modéré, sur 2010-2030 il est à la borne basse des prévisions du GIEC. Parmi les problèmes d'environnement global, la priorité passe à d'autres dossiers comme les négociations sur la gestion commune de l'eau, de l'azote et du phosphore, des produits radioactifs, la désertification et la biodiversité. L'urgence de lutter contre le changement climatique s'avère de moins en moins prégnante dans l'opinion publique et chez les décideurs par rapport à la gestion des crises économiques et financières qui ne diminuent pas.

Un nombre important de pays technologiquement avancés enchaînent des années de croissance et de taux d'intérêt faibles (inférieurs à 1 %). Les économies d'énergie et de ressources apparaissent comme évidentes dans un monde de plus en plus fini : on ne trouve plus de pétrole à moins de 100\$ le baril dès 2030 ; le prix du gaz augmente de même ; la démographie se ralentissant plus vite que prévu les actifs deviennent moins nombreux que les inactifs dans la majorité des pays.

Dans ce contexte la recherche est majoritairement orientée vers le développement de produits, procédés et services directement valorisables sur les marchés. Les recherches sur le cerveau, la médecine individualisée, la silver economy, la chimie du végétal, le big data, la cyber sécurité sont des priorités stratégiques par rapport à celles sur le stockage du CO₂ et la fusion. La capture du carbone à partir de l'air et la gestion du rayonnement solaire n'en font jamais partie.

A partir du milieu du siècle, les observations confirment que la sensibilité climatique s'avère plus faible que prévue. Cela conduit le réchauffement global à ralentir vers une asymptote de 2,5°C. Ce niveau apparaît alors aux acteurs comme compatible avec les objectifs de la convention climat. L'exploitation des avantages du changement climatique est rendue possible par les progrès de la prédiction numérique. De fait pour de nombreux pays, elle fait plus que compenser les inconvénients.

Scénario 2 : Émissions négatives en 2050

Dans ce scénario on atténue le changement climatique mais on fait encore plus avec la capture du CO₂ à partir de l'air et le stockage géologique.

La conférence Paris Climat 2015 consacre le succès du changement de paradigme

dans les négociations climat initié à Durban : *partager les solutions, pas le fardeau*. Les États s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre sur la base du principe de la responsabilité commune et selon leurs capacités respectives. Le nouvel accord place l'accent sur des progrès mesurables en direction de la décarbonisation des plus importantes économies de la planète, sans attacher plus d'importance à la ratification de traités internationaux en matière de climat, ou encore à la fixation d'objectifs mondiaux à long terme.

La grande variété internationale des politiques mises en place pour atténuer le changement climatique s'accompagne d'une transparence sur les résultats. Il est ainsi admis que la plupart des actions sont des politiques multi-objectifs croissance-énergie-climat, dans lesquelles la composante « réduction des émissions de gaz à effet de serre » est moins importante que d'autres comme l'emploi ou la sécurité. La transition vers l'économie bas carbone est organisée par des dispositifs d'échelle appropriée selon les secteurs d'activité : certaines au niveau mondial, mais d'autres au niveau national ou individuel.

Les politiques oublient le dogme de l'efficacité d'une valeur universelle du carbone est abandonné au profit d'une régulation différencié pour les différents secteurs de l'économie, car ils ne répondent pas tous de la même façon sur le long terme. La liaison croissance-climat conduit toutefois à une financiarisation du carbone : le certificat de réduction de CO₂ devient un instrument financier utilisé par les États pour une relance qui oriente les investissements vers les projets bas carbone. Inspirés par Keynes, les gouvernements se ressaisissent du privilège régalien de créer et de vendre de certificats de réduction de CO₂ à une valeur qu'ils fixent eux-mêmes. Cette valeur tutélaire du carbone suit une trajectoire croissante élevée et prédictible, au-dessus de 300€/t CO₂ dans la plupart des grands pays riches en 2050, y compris en Chine.

Dans ce contexte les recherches privées pour la gestion industrielle du CO₂ sont stimulées par des perspectives de rentabilité économique crédible jointes à des incitations directes à la R&D. Le stockage du CO₂ offshore et onshore s'avère une technologie robuste et fiable. Le captage se généralise sur les nouvelles usines et les centrales électriques à partir de 2030, et enetrofit à partir de 2040. La production de CO₂ par extraction directe à partir du sous sol étant rigoureusement interdite dès 2020, les besoins de la récupération assistée d'hydrocarbures conduisent à des perspectives de marché pour la capture du CO₂ à partir de l'air. La barre du million de tonnes de CO₂ capturées à partir de l'air est ainsi franchie dès 2025. La performance résulte de la décision par un consortium de mécènes milliardaires de subventionner un parc de démonstrateurs technologiques.

Malgré les progrès des économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables, l'exploitation des ressources de combustibles fossiles reste économiquement à l'ordre du jour. La part de la biomasse parmi les sources d'énergie primaire augmente, mais n'atteint que 10 % en 2040. La compétition pour l'usage des sols et les technologies installées en limitent l'usage. Elle est en particulier utilisée en mélange avec sources fossiles après transformation (torréfiée, liquéfiée ou gaséifiée). Cela autorise le développement d'une production « électricité propre et zéro carbone » de masse, par des centrales électriques mixtes fossile/biomasse avec CCS.

La décarbonisation des combustibles fossiles à la source est privilégiée pour les combustibles liquides. Dès 2020 on trouve en Californie des pompes à « essence zéro carbone ». Le carburant intègre la part de biomasse obligatoire et pré-compense le reste provenant du pétrole. C'est en 2030 qu'une première compagnie aérienne propose un vol régulier zéro carbone entre Londres et New York . La capture du CO₂ à partir de l'air dans de grandes installations centralisées et localisées à proximité d'une zone de stockage efficace se développe, notamment poussée par les marchés de la finance carbone. Ses atouts sont une capacité à monter en échelle, une fiabilité industrielle contrôlable et sa territorialisation locale. Les premières installations sont en fait des unités de production de CO₂ à partir de l'air pour la récupération assistée du pétrole réutilisées après la fin de vie commerciale du champ qu'elles desservent.

Scénario 3 : Urgence climat en 2060

Dans ce scénario la gestion du rayonnement solaire apparaît comme une réponse à un événement climatique global brusque qui révèle l'insuffisance de l'effort international sur l'atténuation. Ces idées sont par exemple développées dans (Victor et al. 2009; Blackstock et al. 2009; Markusson et al. 2013). Selon les axes de (Banerjee et al. 2013), ce scénario décrit une réponse collective et contrôlée.

Le système mis en place à conférence de Paris Climat 2015 consacre l'impossibilité d'une approche par accord global sur des contraintes quantifiées : la question de la répartition de la charge qui se pose si on part d'un objectif de 2°C qu'on veut faire descendre sur les pays est insoluble. L'accent est mis sur la transparence, la bonne volonté des parties, l'orientation du développement technologique, et la création d'un grand fond climat en charge de financer l'adaptation et de la mitigation. Ces mesures créent un climat de confiance, elles représentent un succès politique majeur en ce qu'elles contribuent à un progrès vers une gouvernance politique internationale.

Toutefois la lenteur et les compromis des négociations internationales font que les tendances actuelles en terme d'émissions globales de gaz à effet de serre ne sont pas infléchies à court terme. Les pays réalisent leurs engagements de Cancún, se qui veut dire que les émissions continuent d'augmenter à un rythme rapide, avec un niveau au dessus de 55GtCO₂eq en 2030. Les concentrations suivent à l'avenant. L'objectif de limiter le réchauffement global à 2°C par rapport au niveau préindustriel apparaît de moins en moins tenable, d'autant que la sensibilité climatique se trouve dans le haut de la fourchette des estimations du GIEC.

Un petit nombre de grands pays, dont la Russie et la Chine, poursuivent des recherches sur la gestion du rayonnement solaire. Les recherches sont à double visée, le contrôle du climat global et la sécurité nationale : modification du temps et exploration des implications militaires de la technologie. Les tests d'injection et de dispersion d'aérosols qu'ils conduisent durant les années 2030 sont des succès scientifiques et technologiques. Ils conduisent à des tests internationaux à une échelle progressivement plus grande, qui confirment la faisabilité, le coût et surtout la prédictabilité des conséquences de la gestion du rayonnement solaire.

Un certain nombre de nations parmi les plus riches s'accordent alors à définir une posture de précaution collective, avec des stocks minimaux d'aérosols et des capacités d'injection mobiles interopérables, principalement basées sur des canons électromagnétiques d'artillerie de marine. En 2060 les scientifiques s'accordent à lancer l'alerte sur l'instabilité des hydrates de méthane sous marins. Ils constatent qu'un cycle de rétroaction positive réchauffement climatique – libération du méthane dans l'atmosphère s'est activé. Une augmentation de la température moyenne du globe de 1 degré par décennie est attendue si rien n'est fait.

En réponse, les Nations Unies s'accordent à reconnaître un « état de nécessité », qui pose les bases légales d'une intervention planétaire par une coalition de pays volontaires. Conformément aux plans préétablis, les forces armées sont en mesure d'épandre en 12 mois une couverture d'aérosols stratosphériques conduisant à un refroidissement global contrôlé. Le relais est ensuite passé à un réseau de canons fixes stationnés au sol. En parallèle, un traitement de choc de réduction des émissions de gaz à effet de serre est appliqué, une « économie de guerre » qui conduit à diviser par 10 émissions mondiales de CO₂eq en 10 ans. Le désamorçage direct des hydrates les plus instables, ainsi que le développement des technologies de capture du CO₂ à partir de l'air permet de ramener sa concentration en 2100 à un niveau sans risque pour les stocks de méthane restants. La géo-ingénierie entre alors dans une phase de désengagement progressif, qui permet de clore le projet en 2120.

Scénario 4 : Double catastrophe

L'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère tempère avec succès le changement climatique, jusqu'à ce qu'une crise sociale majeure fasse cesser l'action. Un changement climatique rapide se produit alors, dont l'impact démultiplie les effets de la crise sociale. Ce scénario correspond par exemple aux thèses de (Baum et al. 2013), et dans les termes de (Banerjee et al. 2013) il s'agit d'une mise en oeuvre « 4. Uncontrollable / Self interested »

Le désastre de Paris Climat 2015, pire que Copenhague 2009, marque l'échec des négociations internationales sur le sujet. Il consacre l'impossibilité d'une approche d'un accord global : la question de la répartition de la charge qui se pose si on part d'un objectif de 2°C qu'on veut décliner entre les pays est insoluble. Le changement climatique est vu par des acteurs majeurs comme une arme géopolitique. Ces pays pensent que leur capacité d'adaptation constitue un avantage comparatif, et que comparativement à d'autres ils ont plus à gagner qu'à perdre avec le réchauffement global.

Il n'est pas clair qui en sous-main a financé le consortium de firmes transnationales, de milliardaires, d'ingénieurs et de savants qui a porté les premières expériences d'épandage d'aérosols stratosphériques. On comprend mieux les raisons qui ont poussé le petit état insulaire de Newchagos à héberger le consortium, et à passer à l'échelle supérieure lorsqu'il est devenu évident que son existence même était menacée par la montée des eaux.

Compte tenu des tensions internationales prévalentes, une intervention pour faire cesser le projet rapidement par la force est jugée trop aventureuse par les états-majors des nations opposées au projet. Une stratégie d'usure, plus économique et diplomatiquement acceptable est préférée. La petite société insulaire souffre d'une combinaison d'attaques discrètes par des moyens variés mais coordonnés : piraterie maritime, cyber sabotage, interventions sur les marchés financiers et de matières premières. L'aide étrangère permet de faire face pendant plus d'une décennie, maintenant à flot l'opération d'injection de particules stratosphériques.

Mais la recomposition d'alliances géostratégiques remet en question la viabilité économique et sociale du projet Néo-chagossien. Le gouvernement chute suite à une crise sanitaire majeure, son successeur dénonce les activités du consortium, interrompt la géo-ingénierie, et lance une politique de virtualisation de la nation et de relocalisation climatique, avec pour perspective de rattacher le pays à son grand voisin continental opposé à la géo-ingénierie depuis le début.

L'effet réchauffant sur la planète suite à la cessation de la géoingénierie est

beaucoup plus rapide qu'anticipé, conduisant à un chaos international de l'ordre des années les plus sombres du XXe siècle. Acculé par la perte accélérée de son territoire, chargé d'une lourde responsabilité historique, et sans poids économique ni militaire, les négociations de rattachement du Néochagos avec le pays voisin se font dans une position de faiblesse extrême. Il s'agit plus d'une acquisition que d'une fusion. Elle entérine la disparition de l'état Néochagos.

4.3. Analyse des scénarios

Comme on l'a vu au 3.3 page 28, la communauté scientifique sur l'analyse du changement climatique a défini trois dimensions pour analyser les futurs : contexte socioéconomique (SSP), politiques climatiques (SPA) et forçage radiatif (RCP). Les tables ci dessous exposent à notre sens comment nos 4 scénarios s'inscrivent en compatible (+) ou non (-) avec les hypothèses de ces dimensions.

Shared Socioeconomic pathway SSP	Shared policy assumption SPA	Reference concentration pathway
SSP1 Sustainability	+ Reference policy	RCP 2.6
+ SSP2 Middle of the road	Cooperation & moderate adaptation	+ RCP 4.5
SSP3 Fragmentation	Middle road & aggressive adaptation	RCP 6.0
SSP4 Inequality	Fragmentation & moderate adaptation	- RCP 8.5
SSP5 Conventional development		

Tableau 8: Scénario « L'adaptation suffit » dans la matrice SSP/SPA/RCP

Shared Socioeconomic pathway SSP	Shared policy assumption SPA	Reference concentration pathway
+ SSP1 Sustainability	Reference policy	+ RCP 2.6
SSP2 Middle of the road	Cooperation & moderate adaptation	RCP 4.5
SSP3 Fragmentation	+ Middle road & aggressive adaptation	- RCP 6.0
SSP4 Inequality	Fragmentation & moderate adaptation	- RCP 8.5
SSP5 Conventional development		

Tableau 9: Scénario « Emissions négatives 2050 » dans la matrice SSP/SPA/RCP

Shared Socioeconomic pathway SSP	Shared policy assumption SPA	Reference concentration pathway
SSP1 Sustainability	Reference policy	- RCP 2.6
SSP2 Middle of the road	+ Cooperation & moderate adaptation	+ RCP 4.5
SSP3 Fragmentation	Middle road & aggressive adaptation	RCP 6.0
SSP4 Inequality	Fragmentation & moderate adaptation	- RCP 8.5
+ SSP5 Conventional development		

Tableau 10: Scénario « Urgence climat en 2060 » dans la matrice SSP/SPA/RCP

Shared Socioeconomic pathway SSP	Shared policy assumption SPA	Reference concentration pathway
SSP1 Sustainability	Reference policy	- RCP 2.6
SSP2 Middle of the road	Cooperation & moderate adaptation	RCP 4.5
+ SSP3 Fragmentation	Middle road & aggressive adaptation	+ RCP 6.0
+ SSP4 Inequality	+ Fragmentation & moderate adaptation	RCP 8.5
SSP5 Conventional development		

Tableau 11: Scénario « Double catastrophe » dans la matrice SSP/SPA/RCP

5. Conclusions

L'examen de la littérature scientifique disponible montre que les jeux de trajectoires et scénarios concernant le changement climatique existants accordent une attention faible voire nulle à la géo-ingénierie. Les scénarios RCP du GIEC sont définis en terme de trajectoires de forçage radiatif, hors toute considération technologique. Les scénarios SSP, placés d'un point de vue socio-économique, sont construits par définition comme des mondes de référence en l'absence de toute politique climatique, et n'incluent donc pas de géoingénierie. Deux jeux de scénarios spécifiquement intéressés par la géo-ingénierie existent, mais ils sont partiels. Les scénarios de Yale ne concernent que la gestion du rayonnement solaire, et les scénarios de Harvard la gouvernance.

Malgré ce manque de scénarios explicite, la discussion sur la géo-ingénierie s'articule autour de quelques visions récurrentes qui ressortent souvent dans la littérature. Pour révéler ces courants de pensée préexistants et les articuler comme connaissance commune dans le cadre de la communauté scientifique intéressée par les scénarios du climat, ce rapport formule quatre visions :

- « L'adaptation suffit », la géo-ingénierie ne se développe pas parce qu'elle n'est ni nécessaire ni recherchée.
- « Émissions négatives en 2050 », on atténue le changement climatique mais on fait encore plus avec la capture du CO₂ à partir de l'air et le stockage géologique.
- « Urgence climat en 2075 », la gestion du rayonnement solaire apparaît comme une réponse à un événement climatique global brusque qui révèle l'insuffisance de l'effort international sur l'atténuation.
- « Double catastrophe », l'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère tempère avec succès le changement climatique, jusqu'à ce qu'une crise sociale majeure fasse cesser l'action. Un changement climatique rapide se produit alors, dont l'impact démultiplie les effets de la crise sociale.

Ces quatre visions n'ont pour but que de baliser grossièrement dans l'ensemble la discussion sur la géo-ingénierie.

6. Références

La bibliographie suivante est disponible en archive Zotero avec les textes intégraux sur simple demande.

- Banerjee, B., Collins, G. & Kysar, D., 2013. *Scenario Planning for Solar Radiation Management*, Yale Climate and Energy Institute. Available at: <http://www.ge-scenarios.org/>.
- Barrett, S., 2008. The Incredible Economics of Geoengineering. *Environmental & Resource Economics*, 39(1), p.45-54.
- Baum, S.D., Maher, T.M. & Haqq-Misra, J., 2013. Double catastrophe: intermittent stratospheric geoengineering induced by societal collapse. *Environment Systems & Decisions*, 33(1), p.168-180.
- Bellamy, R. et al., 2012. A review of climate geoengineering appraisals. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(6), p.597–615.
- Berger, G., 1958. L'attitude prospective. *Prospective*, 1. Available at: http://www.prospective.fr/Bibliotheque/Attitude_prospective.htm [Consulté le avril 1, 2014].
- Betz, G. & Cacean, S., 2012. *Ethical Aspects of Climate Engineering*. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.
- Blackstock, J.J. et al., 2009. Climate Engineering Responses to Climate Emergencies. *arXiv:0907.5140*. Available at: <http://arxiv.org/abs/0907.5140> [Consulté le avril 10, 2013].
- Bodansky, D., 2011. *Governing Climate Engineering: Scenarios for Analysis*, Rochester, NY: Social Science Research Network. Available at: http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/21520/governing_climate_engineering.html [Consulté le janvier 27, 2014].
- Bodansky, D., 2013. The who, what, and wherefore of geoengineering governance. *Climatic Change*, p.1-13.
- Boucher, O. et al., 2014. *Atelier de Réflexion Prospective REAGIR Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement*, APESA, CNRS, ANR. Available at: <http://arp-reagir.fr/> [Consulté le juin 12, 2014].
- Bracmort, K. & Lattanzio, R.K., 2013. *Geoengineering: governance and technology policy*, Congressional Research Service. Available at: <https://openers.com/document/R41371/>.
- Bronson, D., Mooney, P. & Wetter, K.J., 2010. *Retooling the Planet? Climate Chaos in a Geoengineering Age*, Report prepared by members of the ETC Group (www.etcgroup.org) for the Swedish Society for Nature Conservation. Available at: <http://www.etcgroup.org/content/retooling-planet-new-etc-group-report-geoengineering>.
- Brovkin, V. et al., 2009. Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Climatic Change*, 92(3-4), p.243-259.
- Cairns, R., 2013. *Examining framings of geoengineering using Q methodology*, SRPU, University of Sussex.
- Caldeira, K. & Wood, L., 2008. Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), p.4039-4056.
- Cao, L. & Caldeira, K., 2010. Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification?: A letter. *Climatic Change*, 99(1-2), p.303-311.
- Chen, C. & Tavoni, M., 2013. Direct air capture of CO₂ and climate stabilization: A model based assessment. *Climatic Change*, 118(1), p.59-72.
- Crutzen, P.J., 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77(3), p.211–220.

- Dooley, J.J. & Calvin, K.V., 2011. Temporal and spatial deployment of carbon dioxide capture and storage technologies across the representative concentration pathways. *Energy Procedia*, 4, p.5845-5852.
- Ghosh, A., 2011. Keynote III-2: International cooperation and the Governance of Geoengineering. In *Meeting report. IPCC Expert Meeting on Geoengineering*. Lima, Peru, p. 37-38. Available at: <http://www.ipcc-wg3.de/meetings/expert-meetings-and-workshops/em-geoengineering>.
- Gordon, B., 2010. *Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination*, U.S. house of representatives, Committee on Science and Technology. Available at: <http://democrats.science.house.gov/committee-report/engineering-climate-research-needs-and-strategies-international-coordination> [Consulté le juillet 31, 2013].
- Hale, B. & Dilling, L., 2011. Geoengineering, Ocean Fertilization, and the Problem of Permissible Pollution. *Science, Technology & Human Values*, 36(2), p.190-212.
- Hartmann, J. et al., 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Reviews of Geophysics*, 51(2), p.113–149.
- Huttunen, S. & Hildén, M., 2013. Framing the Controversial: Geoengineering in Academic Literature. *Science Communication*, p.1075547013492435.
- Jones, A. et al., 2013. The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17), p.9743–9752.
- Jouvenel, H. de, 2004. *Invitation à la prospective = An invitation to foresight*, Paris: Futuribles. Available at: <https://www.futuribles.com/media/filer.../invitationalaprospective.pdf>.
- Kahn, H. & Wiener, A.J., 1967. The Use of Scenarios. In *The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years*. New York: MacMillan, p. 267. Available at: <http://www.hudson.org/research/2214-the-use-of-scenarios> [Consulté le avril 1, 2014].
- Keith, D., Ha-Duong, M. & Stolaroff, J., 2006. Climate Strategy with CO₂ Capture from the Air. *Climatic Change*, 74(1), p.17-45.
- Klein, D. et al., 2011. Bio-IGCC with CCS as a long-term mitigation option in a coupled energy-system and land-use model. *Energy Procedia*, 4, p.2933-2940.
- Kravitz, B. et al., 2013. Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), p.8320–8332.
- Kravitz, B. et al., 2011. The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters*, 12(2), p.162-167.
- Kriegler, E. et al., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. *Climatic Change*, 122(3), p.401-414.
- Kriegler, E. et al., 2012. The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: A new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22(4), p.807-822.
- Lempert, R.J. & Prosnitz, D., 2011. Governing Geoengineering Research. Available at: http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR846.html [Consulté le juillet 29, 2013].
- 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). Available at: <http://bipartisanpolicy.org/news/press-releases/2011/10/blue-ribbon-task-force-climate-remediation-releases-report-calling-feder> [Consulté le avril 10, 2013].
- Markusson, N. et al., 2013. 'In case of emergency press here': framing geoengineering as a response to dangerous climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, p.n/a-n/a.
- Markusson, N., 2013. *Tensions in framings of geoengineering: Constitutive diversity and ambivalence*, Institute for Science, Innovation and Society, University of Oxford.

- Matthews, H.D. & Caldeira, K., 2007. Transient climate–carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(24), p.9949-9954.
- Mondon, S. & Imbard, M., 2013. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*, Paris: DGEC/SCEE/Onerc. Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Decouvrir-les-nouveaux-scenarios.html>.
- Naik, V. et al., 2003. Influence of Geoengineered Climate on the Terrestrial Biosphere. *Environmental Management*, 32(3), p.373-381.
- O’Neill, B.C. et al., 2012. *Meeting Report of the Workshop on The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, Boulder, Co., November 2-4, 2011.*, Available at: <http://iciar.lipi.go.id/workshop-on-the-nature-and-use-of-new-socioeconomic-pathways-for-climate-change-research/>.
- Pongratz, J. et al., 2012. Crop yields in a geoengineered climate. *Nature Climate Change*, 2(2), p.101-105.
- Rayner, S. et al., 2009. *Draft Principles for the Conduct of Geoengineering Research (Oxford Principles)*, Available at: <http://www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/principles/>
- Ricke, K.L., Morgan, M.G. & Allen, M.R., 2010. Regional climate response to solar-radiation management. *Nature Geosci*, 3(8), p.537-541.
- Rickels, W. et al., 2011. *Large-Scale Intentional Interventions into the Climate System? Assessing the Climate Engineering Debate.*, Kiel: Kiel Earth Institute. Available at: <http://www.kiel-earth-institute.de/scoping-report-climate-engineering.html>.
- Salzman, J. & Jackson, R., 2010. Pursuing Geoengineering for Atmospheric Restoration. *Issues in Science and Technology*, p.67-76.
- Schelling, T.C., 1996. The economic diplomacy of geoengineering. *Climatic Change*, 33(3), p.303-307.
- Schwartz, P., 1996. *The art of the long view: paths to strategic insight for yourself and your company*,
- Shepherd, J.G., 2009. *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, London, UK: The Royal Society.
- Singarayer, J.S., Ridgwell, A. & Irvine, P., 2009. Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering. *Environmental Research Letters*, 4(4), p.045110.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., et al. éd., 2013. IPCC 2013: Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, p. 33. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Stocker, T., Qin, D. & Plattner, G.-K. éd., 2013. IPCC 2013: Technical Summary. In *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, p. 33. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Swart, R. & Marinova, N., 2010. Policy options in a worst case climate change world. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(6), p.531-549.
- Victor, D.G. et al., 2009. The geoengineering option: A last resort against global warming? *Foreign Affairs*, 88(2), p.64-76.
- Volodin, E.M., Kostykin, S.V. & Ryaboshapko, A.G., 2011. Simulation of climate change induced by injection of sulfur compounds into the stratosphere. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(4), p.430-438.
- Van Vuuren, D.P. et al., 2014. A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3), p.373-386.
- Van Vuuren, D.P. et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), p.5-31.
- Van Vuuren, D.P. & Carter, T.R., 2014. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. *Climatic Change*, 122(3),

p.415-429.

Wigley, T.M.L., 2006. A Combined Mitigation/Geoengineering Approach to Climate Stabilization. *Science*, 314(5798), p.452-454.

Woolf, D. et al., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(5), p.1-9.

Wright, G., Bradfield, R. & Cairns, G., 2013. Does the intuitive logics method – and its recent enhancements – produce « effective » scenarios? *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), p.631-642.

Wright, G., Cairns, G. & Bradfield, R., 2013. Scenario methodology: New developments in theory and practice: Introduction to the Special Issue. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), p.561-565.