



HAL
open science

Le discours de la promesse chez les promoteurs de l'ingénierie climatique.

Régis Briday

► **To cite this version:**

Régis Briday. Le discours de la promesse chez les promoteurs de l'ingénierie climatique.. Socio , 2019, 12, pp.133-157. 10.4000/socio.4657 . hal-02307627

HAL Id: hal-02307627

<https://hal.science/hal-02307627>

Submitted on 7 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le discours de la promesse chez les promoteurs de l'ingénierie climatique

Version auteur de l'article pour le numéro 12 de la revue *Socio* consacré aux « Nouvelles promesses techniques », 2019

Régis Briday

Chercheur associé au LATTS (Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés) ;
Champs-sur-Marne, France

Résumé

Français

Cet article examine le discours de la promesse que portent les défenseurs de l'ingénierie climatique. Dans un premier temps, l'auteur analyse deux promesses faites au sujet des projets de géoingénierie, conçus pour altérer brusquement le climat global : la promesse d'une réduction des incertitudes suffisante pour garantir un monde moins incertain que le monde climatiquement dérangé par l'humain ; la promesse d'un déploiement provisoire de la géoingénierie. Dans un second temps, l'auteur décrit une situation où les possibilités offertes par les technologies d'émissions négatives (NET) locales de type BECCS (biomasse associée aux captage et séquestration du CO₂ lors de sa combustion) suscitent un optimisme dans les travaux de prospective climatique et le monde entrepreneurial qui est en décalage avec l'apathie des programmes de R&D sur le sujet.

English

This article analyses the main promises made by Climate engineering proponents. First, the author discusses promises made about geoengineering projects, which are designed to alter the global climate swiftly: the ability to reduce uncertainties enough to ensure a less insecure world; the allegedly temporary character of geoengineering technologies. Then, the author depicts a situation where local Negative emission technologies (NETs) such as BECCS (Bioenergy with carbon capture and storage) gain ground in the climate arenas and on the entrepreneurial landscape; yet these technologies are still in search of a model that would be economically and ecologically viable.

Mots-clés :

Géoingénierie ; technologies d'émissions négatives (NET) ; promesses technologiques ; marchés du carbone ; politiques climatiques ; cobénéfices

Keywords :

Geoengineering; negative emission technologies (NETs); technological promises; carbon markets; climate policies; cobenefits

Plan

Œuvrer pour un monde moins incertain ?	4
La promesse douteuse du caractère provisoire de la géoingénierie	6
Les NET à la recherche d'un marché, dans un contexte où la puissance publique n'émet aucun signal fort.....	8
Une initiative complémentaire ou cumulative ? Une synergie avec d'autres technologies post-carbone ?	11
Conclusion	12
BIBLIOGRAPHIE.....	15

Dès les premiers programmes de recherche systématiques sur le changement climatique dans les années 1970, trois approches politiques ont cohabité : la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ou atténuation ; l'adaptation ; enfin, plus marginalement, l'ingénierie climatique. Les technologies d'ingénierie climatique sont présentées comme « correctives », conçues pour agir sur les propriétés de l'environnement *en aval* des émissions de gaz à effet de serre afin d'en contrebalancer les effets. J'introduirai deux distinctions. Premièrement, les scientifiques et ingénieurs ont imaginé, d'une part, des technologies de « gestion des rayonnements solaires », telles que l'injection de particules réfléchissantes dans la stratosphère et le blanchissement des nuages. Ils ont proposé, d'autre part, des techniques de captage et séquestration du CO₂ destinées à pomper plus de CO₂ atmosphérique qu'elles n'en émettent. En règle générale, on nomme indifféremment ces dernières, soit « technologies d'extraction de CO₂ », notion que le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) privilégie dans son dernier rapport, soit « technologies d'émissions négatives », ou NET ('negative emission technologies'), terminologie qui prévaut dans la littérature (*IPCC, 2014 : 485-486*). Une analyse scientométrique dessine quatre « réseaux » de recherche sur les NET : captage du CO₂ dans l'air (ou DAC, pour 'direct air capture') ; fertilisation des océans (pour provoquer une efflorescence de phytoplancton) ; enrichissement des sols à l'aide de charbon de bois pilé ('biochar') ; méthodes recourant à la photosynthèse pour séquestrer le carbone dans les sols, dont l'afforestation, l'enfouissement de biomasse, et la production de biomasse associée aux captage et séquestration du CO₂ lors de sa combustion (ou BECCS, pour 'bioenergy with carbon capture and storage')¹ (*Belter et Seidel, 2013 : 424*).

Deuxièmement, certaines technologies d'ingénierie climatique, que je nommerai technologies de géoingénierie, sont conçues pour altérer brusquement le climat global et/ou affecter des territoires transfrontaliers ou avec un statut juridique international (la haute mer, l'Antarctique), avec les risques géopolitiques que cela comporte.² D'autres, que je qualifierai de technologies « locales », ne sauraient générer de bouleversements environnementaux rapides à grande échelle, même en cas d'implantations promptes et nombreuses. Elles posent des questions économiques, juridiques et de gouvernance différentes. Dans cet article, je traiterai d'abord des *technologies de géoingénierie* – radiatives (e.g. l'injection de particules réfléchissantes dans la stratosphère) et d'émissions négatives (e.g. la fertilisation des océans) – (sections 1 & 2). Puis, en ce qui concerne l'ingénierie climatique locale, je me limiterai aux *NET locales*, dans la mesure où les technologies radiatives locales (e.g. l'usage de peinture réfléchissante sur les bâtiments) suscitent peu d'intérêt pour le moment (sections 3 & 4).

L'ingénierie climatique est montée en puissance dans la littérature au cours des années 2000. Dans un contexte où les émissions mondiales de gaz à effet de serre continuent de croître, les scientifiques se prêtent à des modélisations de géoingénierie, et ils intègrent de manière croissante des NET dans

¹ Depuis une vingtaine d'années, des technologies dites de captage et séquestration du CO₂ ('Carbone Capture and Storage', CCS) sont développées en sortie de cheminée de centrales à combustible fossile et d'industries intensives en énergie fossile (ciment, acier, etc.). La BECCS consiste à coupler cette technologie à un procédé de production d'énergie utilisant la biomasse, par exemple une fermentation produisant du bioéthanol ou une gazéification à partir de biomasse. La BECCS est conçue pour générer dans son ensemble un bilan de CO₂ négatif, à l'aide d'un double mécanisme : captage végétal du CO₂ dans l'air par photosynthèse (avec environ la même quantité de CO₂ séquestrée au cours de la croissance de la biomasse que libérée au cours de sa combustion) ; captage du CO₂ en sortie de cheminée, suivi d'une séquestration dans des réservoirs géologiques ou océaniques. Ces deux procédés sont eux-mêmes énergivores, évidemment, et le second comporte un risque de fuite. Contrairement au CCS, la BECCS est donc, non une technologie d'atténuation mais une technologie d'ingénierie climatique, en cela qu'elle agit, en partie, après rejet de CO₂ dans l'atmosphère.

² Contrairement à l'usage dans cet article, de nombreux auteurs utilisent de manière indifférenciée les termes « technologies d'ingénierie climatique » et « géoingénierie (climatique) » (e.g. *Brasseur et Granier, 2013*).

leurs scénarios, arguant qu'y recourir est devenu incontournable pour dessiner des trajectoires politiques plausibles limitant le réchauffement à 2°C en 2100 par rapport aux conditions préindustrielles. Si la littérature sur les NET reste marginale (seulement un peu plus d'1% de la littérature sur le changement climatique intégrait les NET en 2015), elle a enregistré une progression importante depuis la fin de la décennie 2000, et croît aujourd'hui presque deux fois plus rapidement que la littérature sur le changement climatique prise dans son ensemble (Minx *et al.*, 2017 : 3-7). La BECCS et l'afforestation-reforestation sont, de loin, les NET que la littérature juge les plus prometteuses. Ce sont les seules NET que les modèles d'évaluation intégrée du GIEC mobilisent, avec des estimations du même ordre de grandeur en matière de captation du CO₂ pour les deux (IPCC, 2014 : 12-18 et 486 ; Fuss *et al.*, 2014 : 850). Jusqu'à présent, les déploiements d'ingénierie climatique se sont résumés presque exclusivement à la préservation des forêts et à l'afforestation, les autres méthodes restant à l'état de prototype ou de projet.

On recense dans les littératures de sciences de la nature et de sciences humaines & sociales plusieurs controverses associées à l'ingénierie climatique. Par exemple, la BECCS pourrait poser des problèmes d'accès à la nourriture (concurrence territoriale avec des terres agricoles) et à l'eau (les plantes utilisées par la BECCS consomment de l'eau et captent une partie de l'évapotranspiration des cultures), ainsi qu'une perte de biodiversité, avec les problèmes de santé afférents (Burns, 2017). Parallèlement, l'effort de développement des NET risque d'induire une démobilisation conjointe sur le volet atténuation (Anderson, 2015). En tout cas, l'inclusion des NET dans les scénarios du GIEC fait passer la réduction de gaz à effet de serre requise en 2050 de 60-75% à 40-60% (van Vuuren *et al.*, 2017). Enfin, plusieurs auteurs ont pourfendu l'optimisme de certaines hypothèses associées aux performances des NET, et souligné que les investissements tardaient à venir (EASAC, 2018 ; Fuss *et al.*, 2014). En ce qui concerne la géoingénierie, en plus des problèmes géopolitiques saillants qu'elle pose, un triptyque de réserves semblable lui a été adressé : effets environnementaux indésirables ; risque de démobilisation dans l'effort d'atténuation ; sous-estimation de son coût économique et des écueils sociotechniques que pose son déploiement (Hamilton, 2013).

Dans cet article, j'analyse le discours de la promesse que portent les défenseurs de l'ingénierie climatique. Je me concentre sur les techniques mobilisant des procédés *industriels innovants* (ce qui exclut l'afforestation). M'inscrivant dans une tradition d'histoire & philosophie des sciences et des techniques assumant l'héritage constructiviste et interdisciplinaire des *Science and Technology Studies* (voir Pestre, 2006 et Bonneuil et Joly, 2013), mon étude porte conjointement sur les représentations, les pratiques de recherche, les stratégies d'investissement, et la circulation et l'accumulation des ressources (Joly, 2013 : 203-204). Je questionne d'abord deux promesses que font les promoteurs de la géoingénierie : la capacité de réduire à terme les incertitudes suffisamment pour pouvoir présenter la géoingénierie comme garante d'un monde plus sûr (section 1) ; la promesse d'un déploiement provisoire (section 2). Puis, j'analyse des promesses qui sont fréquemment associées aux NET locales telles que la BECCS, le DAC ou le biochar : promesse d'un marché pour les entrepreneurs (section 3) ; promesse de cobénéfices (section 4).

Œuvrer pour un monde moins incertain ?

La géoingénierie a subitement occupé une place significative dans les arènes scientifique et médiatique dans la seconde moitié des années 2000, à la suite de la publication de travaux retentissants par des climatologues reconnus et de grandes institutions publiques états-uniennes et britanniques ('U.S. National Research Council', Pentagone, 'Royal Society'). La plupart des débats, pour certains anciens (voir Briday, 2014 et 2015), ont porté, premièrement, sur la quasi-impossibilité d'organiser un processus de délibération citoyenne au sujet de telles technologies. Deuxièmement,

les auteurs ont insisté sur les menaces qu'elles faisaient planer sur la sécurité et la diplomatie. D'abord, un usage belligérant est à redouter (d'où l'UN Convention on the prohibition of military or any other hostile use of environmental modification techniques', signée dès 1978 par les Etats-Unis et l'URSS). Ensuite, de nombreux auteurs jugent leur déploiement « ingouvernable » : il y aurait nécessairement des Etats « gagnants » et d'autres « perdants », alors que les savoirs permettant d'établir la responsabilité de ces technologies dans les phénomènes environnementaux observés souffriraient nécessairement d'incertitudes importantes (Kellogg et Schneider, 1974 ; Hulme, 2014). Les acteurs qui envisagent un déploiement de géoingénierie renversent la perspective. Ils le présentent comme un dernier recours permettant d'éviter une catastrophe climatique qui, à mesure que les études se multiplient, semble devoir induire des troubles internationaux toujours plus grands (crise alimentaire, migrations massives, montée des eaux, événements climatiques et météorologiques extrêmes, etc.). Resterait à développer des technologies performantes, et surtout à réduire les incertitudes des simulations climatiques faisant intervenir la géoingénierie.

Ces incertitudes sont grandes. Dans un article fameux daté de 2006, le Prix Nobel de chimie 1995 Paul Crutzen propose d'étudier la possibilité d'injecter des particules soufrées réfléchissantes dans la stratosphère pour « combattre un éventuel réchauffement climatique drastique ». Il explique que cette technique est la seule qu'il voit qui pourrait être déployée, pour un coût plutôt faible, « presque au dernier moment », avec des effets significatifs « dès six mois » (Crutzen, 2006 : 213-217). Mais, lorsque Crutzen compare ce « projet d'ajustement de l'albédo » à l'éruption du Mont Pinatubo en 1991, le climatologue Alan Robock et ses collègues lui objectent que les éruptions des grands volcans tropicaux riches en soufre produisent des altérations climatiques régionalement plus hétérogènes qu'il ne l'a laissé entendre, en altérant notamment les régimes pluviométriques. Par ailleurs, un rapport de l'Académie des sciences des Etats-Unis estime que la quantité de soufre nécessaire au contre-balancement d'un doublement de CO₂ devrait être au minimum cinq à dix fois supérieure à celle calculée par Crutzen (c'est-à-dire d'un ordre de grandeur comparable à la quantité de soufre émise lors de l'éruption du Pinatubo, mais injectée chaque année). D'autres climatologues comme Lennart Bengtsson, enfin, arguent que les modèles numériques sont inaptes à décrire finement les conséquences – sans doute chaotiques – qu'un déploiement géoingénierique aurait sur le « système "climat terrestre" » (in van Hemert, 2017).

En outre, l'article de Crutzen enferme les débats dans un cadre technicien, où les incertitudes décisives sont celles qui relèvent des sciences de la nature et des ingénieurs. A ce stade, écrit-il, il faut « intensifier la recherche pour mettre au défi l'idée de modification du climat qu'il a présentée » ; puis, *dans un second temps*, l'enjeu principal deviendra « la construction de la confiance entre les scientifiques et le grand public » (Crutzen, 2006 : 215 et 217). Crutzen reconduit là un modèle de décision politique largement décrié par les sciences sociales. Premièrement, il présente le consensus scientifique comme un incontournable préalable à la décision politique. Deuxièmement, il adopte une attitude qui minore voire nie le caractère *socio*-technique des controverses, pour les résumer à un ensemble de problèmes purement techniques et nécessairement provisoires, en attente d'être résolus techniquement. La critique qui rejette ces technologies *ab ovo* car trop périlleuses géopolitiquement et incompatibles avec le processus démocratique est rendue inaudible. Tout se passe comme si le temps de l'ingénierie était celui d'une dialectique presque implacable entre l'efficacité croissante d'une technologie (par le Progrès technologique), la baisse des incertitudes des modélisations (par le Progrès dans les sciences de la nature), et les intérêts (supposés tels) du plus grand nombre. Le fait que la géoingénierie devienne

une technologie sûre ne serait qu'une question de temps.³ De temps... et d'investissements, que l'on attire précisément en générant une confiance suffisante dans l'avenir de la technologie concernée.

Il est important d'insister pour finir sur le rôle dual que jouent les modèles numériques dans notre affaire. S'ils suivaient une démarche plus ordinaire, les scientifiques s'intéressant à la géoingénierie multiplieraient aujourd'hui les expériences de terrain. Problème : celles-ci ne sont pas du goût de beaucoup de scientifiques, et elles provoquent des résistances citoyennes (Hulme, 2014 ; Stilgoe *et al.*, 2013 : 1574-1576). On craint leurs effets indésirables, et plus encore la « pente savonneuse » sur laquelle elles risquent de nous entraîner.⁴ De plus, de nombreux scientifiques martèlent que le climat local n'est *pas* une miniaturisation du climat global. Par conséquent, les expériences de terrain à petite échelle seraient impuissantes à estimer la plupart des effets de la géoingénierie. Elles auraient pour simple intérêt de tester les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés, par exemple le temps de résidence et la réactivité chimique de particules dans l'atmosphère. Crutzen propose donc « de commencer par des investigations à l'aide de modèles » uniquement ; puis, « en fonction de leurs résultats, de réaliser pas à pas des tests atmosphériques à petite échelle » (Crutzen, 2006 : 215). Dans ce cadre, les simulations déterminent l'avenir du champ. Ceci ne nous dit pas dans quelle direction, toutefois. Dans la mesure où les modèles numériques suscitent souvent la défiance et la controverse, leur usage peut avoir en ce moment pour effet de saper la confiance dans un déploiement à grande échelle qui ne souffrirait pas d'incertitudes majeures. Mais, l'argument peut être retourné : les modélisations numériques, auxquelles peuvent s'essayer individuellement de nombreux chercheurs pour un coût faible, n'alimentent-elles pas artificiellement la recherche sur des options qui présentent d'emblée des limites démocratiques et des risques sociotechniques et géopolitiques rédhibitoires ?

La promesse douteuse du caractère provisoire de la géoingénierie

À l'inverse des concepteurs de nombreuses technologies émergentes, ceux de la géoingénierie, non seulement se gardent de mettre en avant son caractère transgressif, mais la présentent invariablement comme une médecine éphémère, qui devra disparaître comme elle était venue une fois le service rendu. Crutzen décrit ainsi son injection stratosphérique comme réversible⁵ et provisoire. Or, un scénario de géoingénierie qui court sur quelques décennies seulement est-il envisageable ?

³ Le sous-chapitre "Biological Uptake in Oceans and Freshwater Reservoirs, and Geo-engineering" du Groupe III du troisième rapport du GIEC (2001), co-rédigé par David Keith, l'un des inébranlables avocats de la recherche sur l'ingénierie climatique depuis le début des années 1990, est une autre manifestation de cette attitude. À l'aide du seul article Teller *et al.*, 1997, ses auteurs espèrent rendre caduques les principales réserves – toutes deux d'ordre technique – qu'aurait soulevées selon eux jusqu'alors la possibilité d'injecter des particules réfléchissantes dans la stratosphère : l'impact potentiel sur la chimie atmosphérique, et l'apparence visuelle d'un ciel blanchi (IPCC, 2001 : 332-334).

⁴ Si plusieurs facteurs vertueux se trouvent réunis – gains commerciaux, intérêts de recherche (en particulier, « des programmes de recherche dans la tradition de la 'Big science', qui deviennent trop gros pour échouer »), acquisition d'une tolérance à l'ingénierie climatique de petite échelle, etc. –, alors le processus d'innovation conduit presque inévitablement à un déploiement, a constaté Stefan Schäfer, qui a nommé ce phénomène « la pente savonneuse de la R&D » (Schäfer, 2013).

⁵ Il écrit : « si des effets secondaires indésirables et imprévus devenaient apparents, il serait possible de stopper rapidement la modification et l'atmosphère retournerait à son état antérieur en quelques années » (Crutzen, 2006 : 216).

Même s'il était confié à la puissance publique et scrupuleusement réglementé, un déploiement de géoingénierie ne créerait pas moins une réalité nouvelle et des dynamiques : *économiques*, d'abord ; « *infrastructurelles* », ensuite, puisqu'il nécessiterait un arsenal de surveillance gigantesque qui faciliterait – voire inciterait à – de nouvelles « corrections » climatiques.⁶ Une nouvelle réalité *climatique*, enfin. Le risque n'est peut-être pas tant qu'un arrêt subit de la maintenance d'un programme de géoingénierie engendrerait d'immenses coûts de sortie – un 'termination shock', impliquant des coûts d'adaptation pour les sociétés et les écosystèmes (Zürn et Schäfer, 2013) –, mais le fait que ce programme aurait déjà reconfiguré en profondeur le climat – c'est tout de même à cela qu'elle est destinée ! – et les savoirs climatiques, appelant de nouveaux ajustements que l'on peut raisonnablement imaginer durables. D'autant que les scientifiques ont montré que le climat global et les climats régionaux étaient interconnectés de multiples manières. Et, d'autant que le tabou de l'expérimentation *in situ*, profondément ancré chez les scientifiques de l'atmosphère et du climat, aura été ébranlé (Briday, 2014 : 130). En définitive, il est difficile d'envisager la géoingénierie comme une technologie de correction provisoire du climat ; elle se présente plutôt comme la promesse d'un choc environnemental, technique et économique, qui opérerait un saut dans un monde inconnu.

Si la géoingénierie, voire plus généralement l'ingénierie climatique, est destinée à reconfigurer en profondeur et durablement l'environnement et les cadrages politiques du climat, et donc les sociétés avec eux, il devient indispensable de proposer une lecture des projets civilisationnels qu'elle active ou réactive, de manière consciente ou non. Pour l'heure, l'immense majorité des promoteurs de la géoingénierie, dont ceux qui bénéficient d'une légitimité scientifique sur la question, la conçoivent comme un dernier recours et comme éphémère. Par contre, il apparaît fortement probable qu'un déploiement de géoingénierie ferait boule de neige, ouvrant grand les portes de l'environnement au règne de « l'industrie corrective ». Il offrirait un contexte favorable à des voix qui appelleraient à une gestion « positive » de l'environnement global, qui étendrait le projet industriel « comtien » d'hybridation nature-artifice à l'échelle planétaire.⁷ Aujourd'hui, des « écomodernistes » autoproclamés se vantent de porter « une vision optimiste de l'humanité » apte à réconcilier « la prospérité humaine et une planète écologiquement vibrante ». Parmi les signataires de l'*Ecomodernist Manifesto*, qui porte une version résolument technophile et croissantiste, figure David Keith, un ancien du M.I.T. pour lequel une recherche poussée en matière de géoingénierie, même de terrain, n'est pas un tabou (Asafu-Adjaye *et al.*, 2015).⁸

Les signataires de l'*Ecomodernist Manifesto* et d'autres accompagnent ainsi leur récit d'entrée dans l'Anthropocène d'une mise à disposition d'outils techniciens, dont parfois la géoingénierie, plus promptement qu'ils n'invoquent une heuristique de la peur et/ou n'appellent à réformer en profondeur les manières de vivre, de consommer et de délibérer (Bonneuil et Fressoz, 2013). L'article de Crutzen est particulièrement ambigu. Il est impossible de savoir en définitive si son auteur utilise la géoingénierie comme un croque-mitaine pour nous enjoindre de réduire au plus vite nos émissions de gaz à effet de serre, ou s'il est déjà entré dans un régime où le recours à la géoingénierie est

⁶ « Infrastructurale » est ici à comprendre au sens d'infrastructures d'information et de connaissance (cf. Edwards, 2010 : 12-20).

⁷ Dans son acception comtienne, « l'industrie » désigne l'« action de l'homme sur le monde qui l'entoure » par le truchement de « la technique », technique qui « trouve dans la science sa *base rationnelle* » (Bourdeau, 2009 : 440-441).

⁸ Il est par ailleurs vraisemblable que le déploiement de technologies de géoingénierie « serait très favorable à l'ouverture d'une autre boîte de Pandore, celle du transhumanisme » (Bourg et Hess, 2010 : 304). En tout cas, le président du 'Transhumanist Party' états-unien propose déjà de « dépenser beaucoup d'argent dans la géoingénierie » (cf. l'entretien de Zoltan Istvan daté du 6 mars 2015, <medium.com/re-form/the-transhumanist-who-would-be-president-8950069ca0a4>).

devenu juste... nous faisant, par le biais de quelque prophétie auto-réalisatrice, entrer de plain-pied dans une nouvelle phase de l'Anthropocène, où l'homme s'affirme comme force géologique *assumée*, l'égal du volcan (Crutzen, 2006). Ailleurs, Crutzen écrit que, à l'heure de l'Anthropocène, « une tâche stimulante, mais aussi difficile et intimidante, attend la recherche sur le global et la communauté des ingénieurs, pour guider l'humanité vers un 'management' global et durable de l'environnement » (Crutzen et Stoermer, 2000 : 18). Si l'Anthropocène n'est pas *en principe* pour Crutzen le moment de radicaliser l'emprise de l'humain sur l'environnement, il le présente *pourtant* comme l'époque où les scientifiques et les ingénieurs sont les acteurs centraux pour décider de son avenir.

Les NET à la recherche d'un marché, dans un contexte où la puissance publique n'émet aucun signal fort

Comme les promoteurs de la géoingénierie, ceux des NET locales affichent souvent un pessimisme important au sujet des capacités de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, associé à un grand optimisme technologique. Comme eux, ils dépeignent l'ingénieur comme acteur-pivot de la "transition", et présentent leurs technologies comme de simples prolongements mimétiques, synergiques et provisoires de la nature (en attendant l'économie post-carbone). Comme eux, ils cherchent à aménager une place à leur technologie d'ingénierie climatique au sein de la recherche publique et dans les négociations internationales officielles sur le climat. Toutefois, les NET locales n'ont qu'un minuscule impact individuel sur le climat global. Elles ne partagent pas la nature clairement transfrontière ni le caractère centralisé des « géoingénieriques » fertilisation des océans et injection de particules dans la stratosphère. Elles réunissent des acteurs dominants différents (start-ups, recherche publique-privée sur des projets de terrain, collectivités territoriales, ONG locales et internationales, agriculteurs, riverains, etc. vs État, droit international, ONG internationales, entrepreneurs milliardaires, climatologues avec de puissants outils de modélisation, etc.), qui revendiquent des modèles politiques et économiques différents.

Trois modèles de développement des NET locales cohabitent. Le premier s'appuie sur *l'investissement public* territorial, national ou onusien. Jusqu'à présent, la plupart des subsides sont allés à l'afforestation et à la restauration d'écosystèmes. Ils peuvent prendre la forme de compensations financières, comme celles attribuées dans le cadre du mécanisme international REDD+ (Réduction des émissions dues à la déforestation et la dégradation des forêts) aux pays en développement qui protègent et restaurent leurs stocks de carbone forestier, ou encore celles octroyées, plus marginalement, par le 'BioCarbon Fund' de la Banque mondiale à des projets de 'climate-smart agriculture' (Woelcke, 2012). Les États investissent aussi dans leur recherche nationale. Ils allouent des financements à des programmes de BECCS. Ils soutiennent surtout des projets de CSS, qui sont beaucoup plus nombreux ; or, s'il s'agit d'une technologie d'atténuation, son développement se répercute sur celui de deux technologies-sœurs qui sont des NET : la BECCS et le DAC.⁹

Un deuxième modèle de développement des NET insiste sur les effets bénéfiques secondaires, ou *cobénéfices*, que leur déploiement génère en plus de la captation de CO₂. Je développe ce point dans la section suivante.

⁹ Pour l'heure, le CCS capte peu de financements publics. Quant à sa compatibilité avec d'autres procédés en vue de monter des installations de BECCS et de DAC, elle n'a guère été développée. Au sujet de l'Europe, voir le constat sombre que dresse le rapport de l'*European Academies' Science Advisory Council* (EASAC, 2018 : 10).

Le troisième modèle est *une stratégie d'innovation principalement portée par des entrepreneurs privés*, qui mise sur une hausse importante du prix du carbone pour assurer sa rentabilité. Dans le cas des NET éligibles aux quotas carbone du Protocole de Kyoto, le retour sur investissement, déjà fléché, peut être immédiat. C'est le cas de certains programmes forestiers réalisés en Russie et dans les pays d'Europe centrale et orientale dans le cadre du Mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC), ou de projets de boisement et reboisement relevant du Mécanisme de développement propre (MDP). C'est également le cas de quelques activités industrielles de CCS, éligibles depuis la COP17 de Durban (2011). Aussi, les promoteurs de la BECCS et du DAC cherchent-ils à s'engouffrer dans cette brèche. Lorsque le monde du 'green business' s'est saisi de la thématique des émissions négatives, il a participé en toute logique, à la fois aux (sur)enchères sur le juste objectif climatique international (objectif +2°C voire +1,5°C en 2100 ; objectif "zéro émission nette" dès 2040), et à la promotion de l'entrée des NET dans un hypothétique marché carbone post-Kyoto.

Cette stratégie s'insère parfois dans un discours euphorique sur la mutation verte du capitalisme, comme chez l'économiste Graciela Chichilnisky, qui compte aussi parmi les fondateurs de *Global thermostat*, une entreprise qui développe des technologies de DAC ([Chichilnisky, 2016](#)). L'intégration des NET dans un marché comme outil de gouvernance internationale est en revanche rejetée par les associations environnementalistes, y compris celles favorables au développement des NET ; ainsi le 'Friends of the Earth' britannique estime que « l'inclusion des NET dans les marchés du carbone existants » aurait pour unique effet, pervers, « de se substituer à des formes d'atténuation techniquement réalisables », et recommande de « soutenir les NET séparément » ([FoE England..., 2011 : 35](#)).¹⁰

L'appel à la puissance publique ne concerne pas uniquement des aspects financiers et réglementaires. Les promoteurs des NET l'exhortent à prendre les dispositions nécessaires pour guider graduellement le prix du carbone à la hausse à l'échelle mondiale, afin d'offrir une garantie de base aux investisseurs. Car à ce stade, les NET industrielles demeurent en recherche d'un modèle économique viable. Elles se développent dans des niches d'investissement comptant encore largement sur des apports de capital-risque (avec l'éventualité de voir naître des bulles spéculatives) ([Buck, 2016](#)).¹¹ Certains entrepreneurs feignent de s'accommoder de la faiblesse des engagements de la puissance publique. Sur la plateforme en ligne *Greenbiz*, Gregory Nemet estime que « servir des niches de marché, créer des coproduits et se dérober aux juridictions politiques ('hedging across political jurisdictions') sont des moyens de rendre la demande en NET robuste à la volatilité politique » ([Nemet, 2016](#)). Mais, l'immense majorité d'entre eux pensent que ce marché deviendra prometteur si et seulement si la puissance publique émet des signaux forts en matière de prix du carbone.

Pour l'heure, les NET peinent à se développer. Aussi, leur impact sur le climat est-il généralement renvoyé à la seconde moitié du siècle, où elles pourraient, soit permettre d'éviter le dépassement du

¹⁰ La plupart des grandes ONG environnementales (Greenpeace, WWF, Biofuelwatch, etc.) refusent catégoriquement d'inclure des NET industrielles dans leurs scénarios. *Friends of the Earth England, Wales & Northern Ireland*, au contraire, défend que le recours aux NET est désormais nécessaire et recommande au gouvernement britannique « d'identifier et financer avec des budgets directs appropriés les NET durables » de manière domestique et à l'étranger ([FoE England, 2011 : 5 et 30](#)).

¹¹ Le modèle économique en construction des NET contraste fortement avec celui de la géoingénierie : il est à dominante privée – tout en requérant des signaux forts de la part du régulateur et de l'investisseur public (signaux que les promoteurs des NET aimeraient comparables aux « autres énergies propres » ; [Global CCS Institute, 2016](#)) – ; il est diffus, se présentant comme une prolifération d'initiatives locales, dont la réussite dépendra de leur capacité à prouver le gain qu'elles apportent à un territoire au-delà des baisses nettes de CO₂ et/ou de la montée en échelle de leur activité à moyen terme.

budget carbone théorique compatible avec le seuil de +2°C en 2100, soit permettre une sortie plus rapide du régime d'overshoot au-dessus de +2°C s'il est atteint (Bernie & Lowe, 2015). Les promoteurs des NET mettent en avant les prévisions optimistes du GIEC au sujet de la BECCS. Dans les scénarios retenus par le GIEC, le captage de CO₂ par BECCS peut avoisiner les 1000 GtCO₂ pour la période 2015-2100 – ce qui correspond à des niveaux comparables à l'estimation des émissions de CO₂ sur la même période –, avec un captage s'élevant à 2-10 GtCO₂/an dès 2050.¹² Or, la crédibilité de ces estimations a été vivement mise en doute. Sabine Fuss et ses collègues estiment que de tels objectifs requerraient « d'immenses efforts de montée en échelle » (Fuss *et al.*, 2014 : 851). Naomi Vaughan et Clair Gough jugent quant à elles que « les hypothèses qu'utilisent les scénarios du GIEC ne sont pas réalistes, ni en ce qui concerne l'extension territoriale de déploiement, ni en ce qui concerne le développement de structures de soutien sociétal adaptées » (Vaughan et Gough, 2016 : 6). En 2016, il n'existait encore à travers le monde qu'une seule usine de démonstration de BECCS fonctionnant à échelle industrielle : la raffinerie de Decatur dans l'Illinois. Seule l'activité de conversion du maïs en éthanol est équipée d'un système de CCS, si bien que l'installation dans son ensemble est loin d'atteindre un bilan carbone net négatif. Afin de mener à bien son projet, l'exploitant 'Archer Daniels Midland Company' a obtenu une bourse de 141,1 M\$ de l'US Department of Energy (Stolark, 2017 ; Yeo and Pearce, 2016).

Le problème est qu'il est devenu politiquement délicat, pour ne pas dire impossible, d'abandonner la cible des 2°C.¹³ Pour les prospectivistes chargés d'imaginer des moyens de combler l'écart entre les trajectoires du 'business as usual' et cette cible, les NET sont une aubaine. Elles leur permettent de continuer à « vendre » aux décideurs des trajectoires vers un monde +2°C, sans remettre fondamentalement en question le modèle économique dominant, et sur la base d'hypothèses simples. Par exemple, on propose un scénario de développement massif de BECCS dans les pays industrialisés et de CCS branché sur des installations fossiles en Chine, puis on passe rapidement en revue les « incertitudes », pourtant reconnues « substantielles », relatives « aux capacités de stockage, à la disponibilité de réseaux de transport de CO₂, à l'acceptabilité sociale, aux problèmes juridiques et aux incitations adéquates » (Selosse et Ricci, 2014 : 967-968). Les entrepreneurs des NET tirent évidemment profit de ces études : le seuil de +2°C ne saurait être uniquement un impératif diplomatique (il faut se tenir à ce qu'on s'est fixé collectivement) et un impératif moral (abandonner cette cible reviendrait à se résigner à la catastrophe), il doit aussi se décliner en un impératif financier, arguent-ils. Or, dans le modèle économique qui domine, la finance tend à récompenser avant tout l'innovation technologique. A l'inverse des énergies renouvelables conventionnelles et de la plupart des technologies qui permettent de réduire les consommations d'énergie, les NET pourront faire valoir leur caractère innovant... A la faveur de promesses de montée en échelle peu crédibles... qui elles-mêmes alimenteront en retour la croyance, peut-être déjà illusoire, dans la possibilité de limiter le réchauffement à 2°C.

¹² Le GIEC intègre des scénarios attribuant aux NET (afforestation + BECCS) des réductions pouvant aller jusqu'à 20 GtCO₂/an en 2100 (IPCC, 2014 : 14). Sur les 400 scénarios du GIEC qui estiment à 50% ou plus la chance de limiter le réchauffement à 2°C, pas moins de 344 comptent sur un déploiement de NET à grande échelle (Anderson, 2015). La moitié des scénarios du GIEC environ comptent sur une part de BECCS dans la production d'énergie primaire supérieure à 5% en 2100. Quant au besoin de captage de CO₂ annuel en 2050, compris entre 2 et 10 Gt, il ne représente pas moins de 5-25% des émissions de 2010 et 4-22% des émissions prévues en 2050. Il est par ailleurs comparable, dans sa fourchette haute, aux actuelles extractions globales moyennes de CO₂ par les puits océaniques ou terrestres (estimées respectivement à 9,2±1,8 Gt et 10,3±2,9 Gt/an) – ou la BECCS comme autre manière de pénétrer de plain-pied dans l'Anthropocène ! (Fuss *et al.*, 2014 : 850-851)

¹³ ... Quand elle n'est pas abaissée à 1,5°C.

Une initiative complémentaire ou cumulative ? Une synergie avec d'autres technologies post-carbone ?

La dernière promesse que je souhaite analyser est celle des bénéfices secondaires associés aux NET locales. Le premier type de cobénéfice réside dans des retombées environnementales, sociales et/ou économiques. Si, dans la plupart des documents de planification stratégique publique, les objectifs associés aux NET sont formulés, pour un coût faible, "en plus" d'objectifs de réductions de gaz à effet de serre déjà ambitieux,¹⁴ il arrive que les NET se trouvent en concurrence plus directe avec les technologies d'atténuation pour l'obtention de marchés publics. Leur caractère cobénéfique est alors immanquablement mis en avant. Par exemple, végétaliser les villes, c'est *aussi* lutter contre la formation d'îlots de chaleur urbains, préserver des espaces de bien-être et créer des écosystèmes propices à la biodiversité. En outre, à défaut de trouver un modèle autonome de rentabilité des NET sur la base de leur seul potentiel à capter le CO₂, des entrepreneurs privés ou des consortia publics-privés misent sur les cobénéfices commercialisables. Par exemple, ils développent une technique de stimulation du phytoplancton qui permet de capter du CO₂ et d'augmenter les rendements halieutiques (service monnayable auprès des pêcheurs), ou ils conçoivent un biochar dont ils valorisent commercialement la capacité à augmenter les rendements agricoles.

Toutefois, et ceci vaut par-delà les NET, on doit s'interroger sur l'actuel foisonnement d'approches "cobénéfiques", "plus intégrées", "sans regret" ou "de compensation d'émissions de gaz à effet de serre prétendument incompressibles". N'est-on pas en train d'assister à la multiplication d'initiatives qui naviguent d'un effet d'aubaine à l'autre, repoussant à plus tard voire aux calendes grecques les initiatives les plus onéreuses et impopulaires ? Le recours aux NET est fréquemment justifié comme une forme de flexibilité accordée à des pays au nom du développement ou à certains secteurs comme le transport aérien, le fret et le transport fluvial, pour lesquels « les réductions d'émissions seraient plus difficiles », lit-on par exemple dans le rapport "Investing in Climate, Investing in Growth" de l'OCDE (OECD, 2017 : 46) ; or, le caractère « difficile » des réductions est évidemment contestable, politiquement négociable.

Le risque de substitution de l'ingénierie climatique à des efforts d'atténuation a été signalé dans la littérature. Certains auteurs parlent d'une seconde « pente savonneuse » (après celle de la R&D, évoquée plus haut) : le « glissement vers un 'carbon lock-in' » (Schäfer, 2013). Ce « blocage » ('lock-in', traduit littéralement) peut être lu, à la manière des économistes, comme un mécanisme qui induit que des technologies moins performantes ou en déclin – dans notre cas, des technologies fortement carbonées – se pérennisent parce que les essais répétés sur ces technologies ont entraîné "mécaniquement" une diminution de l'incertitude relative à leurs mérites et/ou parce qu'un changement de technologie serait très coûteux (Liebowitz et Margolis (Ed.), 2014). Il peut également être lu comme une nouvelle manifestation de la fuite en avant technologique et productiviste. Cette fuite en avant, qui n'est pas propre au capitalisme (même s'il l'exacerbe), se présente aussi comme une « circularité », au sens où elle reconduit la logique qui a mené à la situation présente. En adoptant la grille de lecture de Bernard Charbonneau et Jacques Ellul, on pourrait aisément décrire le développement des NET comme une nouvelle contribution à ce mouvement, qui concourt à une colonisation croissante du monde par la technique, faisant l'économie d'une réflexion sur son

¹⁴ Voir e.g. le rapport *Paris change d'ère. Vers la neutralité carbone en 2050*. Tout en donnant à Paris des objectifs ambitieux d'atténuation (-70% d'émissions brutes de CO₂eq en 2050), les auteurs visent un objectif de -20% de CO₂eq à l'aide du boisement et de la végétalisation des bâtiments et de l'espace public, énonçant que les émissions négatives sont « la clef pour viser la nullité des émissions nettes » à Paris en 2050. Les 10% restants sont des investissements de « compensations » dans les énergies renouvelables à l'extérieur du territoire parisien (Elloth, 2017 : 99 et 305).

efficacité écologique à long terme tout autant que sur le sens que revêtent les pratiques productives et l'existence vécue même dans un tel flux de "progrès", exacerbant les hétéronomies, le besoin de croissance, la bureaucratie, etc. (Hardy, 2014).

Une hypothèse plus modeste consisterait à énoncer que les solutions techniques de type NET parviennent à capter le consentement paresseux des décideurs et des concitoyens, dans un cadre culturel globalement très favorable à l'innovation technologique. Quoiqu'il en soit, plutôt qu'une initiative complémentaire, on peut voir dans le développement des NET un nouveau développement technologique forcément plus polluant que des économies d'énergie – qui constituent pourtant un gisement de réduction d'émissions de gaz à effet de serre gigantesque. Ceci tend à renforcer l'idée selon laquelle l'histoire matérielle de nos sociétés est « fondamentalement cumulative » : plutôt que substituer des technologies nouvelles aux anciennes, les sociétés cumulent fréquemment les deux, de nouvelles pollutions se surimposant alors et parfois durablement aux anciennes (Edgerton, 2012 ; Fressoz, 2013).

Le second type de cobénéfice associé aux NET est leur participation à un secteur d'innovation dans le domaine des technologies post-carbone. J'illustrerai ce point rapidement. Pour les auteurs du scénario de neutralité carbone à 2050 de l'association négaWatt, les émissions négatives doivent demeurer celles qu'on ne génère pas, et non le CCS en sortie de cheminée d'usine à charbon ou « d'hypothétiques ruptures technologiques ». Pourtant, ils parient sur des filières embryonnaires, dont certaines ont même recours à des procédés de captage de CO₂. C'est le cas de la production de méthane de synthèse, un gaz de synthèse sur lequel négaWatt mise fortement, le plaçant au cœur de son projet de transition dans la mesure où il pourrait contribuer à la fois à la valorisation des déchets et au stockage des excédents d'électricité renouvelable (négaWatt, 2016 ; négaWatt, 2017 : 4 et 25). Aussi, bien que souhaitant se passer des services des NET *produites à l'échelle industrielle*,¹⁵ les acteurs suivant la logique de négaWatt pourraient bénéficier des développements techniques de la BECCS sur le volet gazéification à partir de biomasse. Ils pourraient en outre profiter des innovations du CCS en matière de captage du CO₂ en sortie de cheminée, qui devraient stimuler l'industrie de la production de carburant de synthèse (ainsi, en France, le projet public-privé VALORCO, co-financé par l'ADEME et ArcelorMittal, mobilise plusieurs laboratoires publics pour produire un carburant de synthèse en utilisant le carbone capté en sortie de cheminée d'une usine sidérurgique). Des synergies d'innovation sont donc en train de naître entre des technologies de captage et séquestration du CO₂ et des technologies utilisant des procédés semblables pour produire des combustibles faiblement carbonés.¹⁶

Conclusion

Dans cet article, j'ai montré que le recours à l'ingénierie climatique s'inscrivait dans toute une « économie de la promesse » (Joly, 2013), en lien avec des enjeux politiques et d'éthique de la recherche, des enjeux de prospective stratégique (avec quelle urgence déployer ces technologies ?), des enjeux industriels et d'investissement, des enjeux sociaux et territoriaux, des enjeux de

¹⁵ En matière de NET, le scénario négaWatt 2017-2050 compte uniquement sur de nouvelles « pratiques culturelles » permettant d'accroître le stockage de carbone par l'agriculture – en conséquence, le « puits de carbone » français passerait de 62MteqCO₂ à plus de 80MteqCO₂/an sur la période 2030 à 2050 (contre une légère décroissance à 48MteqCO₂ dans le scénario tendanciel). (négaWatt, 2017 : 35)

¹⁶ Au stade actuel, ces développements restent embryonnaires, anecdotiques en matière de réduction de gaz à effet de serre.

gouvernance. J'ai réinscrit les promesses de l'ingénierie climatique dans une réflexion générale sur le recours quasi-systématique à des réponses technologiques, mais aussi plus spécifiquement dans des dynamiques de technicisation et de monétarisation propres à la gouvernance climatique.

J'ai distingué les promesses qui sont *plutôt* formulées par les défenseurs de la géoingénierie de celles qui sont *plutôt* mobilisées par les promoteurs des NET locales. Du fait du danger de désordre diplomatique qu'elle représente, les États gardent la main sur la recherche en matière de géoingénierie. A l'inverse, de nombreux promoteurs des NET locales misent sur un modèle de développement public-privé et délocalisable. Toutefois, ils attendent des pouvoirs publics qu'ils soutiennent des programmes de développement industriels publics-privés. Ils réclament aussi qu'ils fixent des règles de marché devant garantir un retour sur investissement rapide. Par cet aspect, le développement des NET locales participe à l'« extension de la logique marchande » dans le domaine de l'environnement, qui se fait au nom de la promesse d'une « synergie » entre marché et résultats en matière de protection environnementale – qui est loin d'avoir fait ses preuves universellement.¹⁷

Les débats sur la géoingénierie sont déjà bien documentés et plutôt stabilisés. En revanche, il devient pressant que les sciences humaines & sociales se penchent sur le développement et la diffusion des NET locales, qui répondent au monde "plein" de la crise environnementale par un monde "encore plus plein" (en fait, par une colonisation potentiellement sans précédent d'un environnement devant rendre des services toujours croissants), et préludent à de nouveaux entrechoquements entre modèles agricoles-forestiers-alimentaires,¹⁸ de métropole, de "transition", de fabrique publique-privée des marchés, etc., et à de nouvelles reconfigurations "centre-périphérie" aux échelles régionale, nationale et mondiale. En outre, pour l'ensemble des technologies d'ingénierie climatique, des études comparatives mériteraient d'être menées dans différents contextes nationaux, afin de comprendre pourquoi les promesses y sont accueillies plus ou moins favorablement.

Quelles tendances se dessinent aujourd'hui ? Le recours aux émissions négatives est acté dans les documents de planification stratégique des métropoles urbaines comme dans les négociations internationales. L'Accord de Paris de décembre 2015 requiert de « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle (art. 4.1) ». Depuis la COP21 de Paris (2015), les États ont le loisir d'inclure les NET industrielles dans leurs promesses de réduction d'émissions, les INDC ('Intended Nationally Determined Contributions'). Pourtant, les NET opérationnelles sont presque inexistantes, et demeurent en recherche d'un modèle économique et politique viable. Certes, si le

¹⁷ Au nom de la promesse répétée d'une « synergie » entre marché et conservation de la biodiversité et des forêts, on a ainsi privilégié « une approche marchande » dans ces domaines. Les résultats observés sont maigres : en matière de conservation ; en matière de marché, puisque les outils de bioprospection et les dispositifs REDD ne donnent « que très marginalement lieu à des échanges marchands » (Foyer *et al.*, 2017 : 225-229). Dans le domaine de la réduction des émissions atmosphériques, les marchés d'émissions ('cap-and-trade') mis en place pour réduire le SO₂, les NO_x, le CO₂, etc. ont connu des fortunes diverses. Je ne peux résumer ici les débats foisonnants qu'ils ont suscités dans la littérature académique.

¹⁸ Voir l'introduction à cette problématique que propose Christian de Perthuis, qui combine enjeux de réorientation de l'offre (prix du carbone qui intégrerait au mieux l'agriculture, la forêt et les acteurs énergétiques dans un régime commun ; mécanismes de projets) et de la demande (modèle alimentaire) (Perthuis, 2010 : 139-171). Voir aussi l'article de Holly J. Buck, qui estime que le déploiement des NET considérées dans la littérature entre rarement en compétition directe avec les terres agricoles – que ce soit pour l'afforestation, ou pour la BECCS puisqu'il privilégierait les résidus agricoles ou forestiers, le panic raide, le miscanthus ou le peuplier –, mais que leur modèle social et économique reste à définir – quelles incitations financières ?; quel soutien aux agriculteurs dans leurs changements de pratiques d'usage des sols ?; à qui les bénéfiques iront-ils ?; etc. (Buck, 2016 : 163-165)

prix du carbone venait à flamber, elles pourraient attirer des investisseurs, y compris les plus coûteuses comme le DAC. Mais, le cas échéant, seraient-elles encore d'une nécessité impérieuse, dans la mesure où l'atténuation accélérerait elle aussi nécessairement ? En outre, les promoteurs des NET devront asseoir un « soutien sociétal » qui est « faible » aujourd'hui : un soutien aux NET elles-mêmes et un soutien aux technologies-sœurs de CCS, dont plusieurs projets ont dû être annulés au cours des dernières années « faute de soutien politique fort ou à cause de résistances citoyennes » (van Vuuren *et al.*, 2017). Même s'il parvient à passer outre l'opposition de principe de certains acteurs (dont je répète qu'elle est tout à fait audible), le déploiement des NET appellera des compromis, en lien notamment avec les hauts niveaux d'énergie renouvelable et/ou les grandes quantités de terres qu'il requiert (Smith *et al.*, 2016 ; Anderson et Peters, 2016).¹⁹ Enfin, les NET demeureront toujours au moins partiellement en concurrence avec les autres approches de décarbonation, dont plusieurs se révèlent déjà efficaces et/ou prometteuses.

En ce qui concerne la géoingénierie, elle garde mauvaise presse. La mobilisation de la société civile a stoppé les travaux du projet anglais SPICE, qui visait *in fine* à injecter des particules réfléchissantes dans la stratosphère, avant même ses exercices de terrain liminaires avec de la vapeur d'eau. La communauté internationale a par ailleurs adopté plusieurs mesures interdisant de réaliser des expériences de fertilisation des océans à grande échelle (la plus large, SOFeX, a été déployée en 2002 sur 225 km²) : en 2013, un amendement à la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion des déchets a été adopté afin d'interdire la presque totalité des expériences de géoingénierie marine, dont la fertilisation des océans ; auparavant, en 2008, un moratoire de la Convention sur la diversité biologique avait été prononcé à son sujet, qui avait été étendu en 2010 à l'ensemble des activités géoingénieriques pouvant porter atteinte à la biodiversité. La géoingénierie conserve toutefois une actualité certaine. Le regain d'affirmation des intérêts nationaux dans la bouche de dirigeants autocrates ne plaide pas en faveur d'efforts soutenus de restriction des émissions de gaz à effet de serre domestiques, et fait également craindre des prises d'initiatives unilatérales de recherche et de déploiement géoingénieriques.

Remerciements : Je tiens à remercier chaleureusement Daniel Compagnon, Amy Dahan, Sébastien Dutreuil et Hélène Guillemot pour leurs remarques fécondes, ainsi que les deux recenseurs anonymes de la version primitive de cet article.

¹⁹ Soit des arbitrages qui ressemblent à ceux analysés dans la littérature sur les biocarburants et sur les projets de carbone forestier déjà mis en œuvre (voir Buck, 2016).

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, Kevin 2015, "Duality in climate science", *Nature Geoscience*, 8, p. 898-900

ANDERSON, Kevin et PETERS, Glen 2016, "The trouble with negative emissions", *Climatic Change*, n°6309, p. 182-183

ASAFU-ADJAYE, John, BLOMQUIST, Linus, BRAND, Stewart, BROOK, Barry, DEFRIES, Ruth, ELLIS, Erle, FOREMAN, Christopher, KEITH, David, LEWIS, Martin, LYNAS, Mark, NORDHAUS, Ted, PIELKE, Roger, PRITZKER, Rachel, ROY, Joyashree, SAGOFF, Mark, SHELLENBERGER, Michael, STONE, Robert & TEAGUE, Peter, 2015, *An Ecomodernist Manifesto*, 10.13140/RG.2.1.1974.0646

BELTER, Christopher et SEIDEL, Dian 2013, "A bibliometric analysis of climate engineering research", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, n°4(5), p. 417-427

BERNIE, Dan et LOWE, Jason, 2015, "Overshoot scenarios and their climate response", report n°1104872 / AVOID 2 WPA.3 Report 1, 17 April 2015, <http://avoid-net-uk.cc.ic.ac.uk/wp-content/uploads/delightful-downloads/2015/09/Overshoot-scenarios-and-their-climate-response-AVOID-2_WPA3_v1.2.pdf>

BONNEUIL, Christophe et FRESSOZ, Jean-Baptiste, 2013, *L'évènement Anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*, Seuil

BONNEUIL, Christophe et JOLY, Pierre-Benoît, 2013, *Sciences, techniques et société*, La Découverte

BOURDEAU, Michel 2009, « Agir sur la nature : la théorie positive de l'industrie », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, p. 439-456

BOURG, Dominique et HESS, Gérald 2010, « La géo-ingénierie : réduction, adaptation et scénario du désespoir », *Natures Sciences Sociétés*, 18, p. 298-304

BRASSEUR, Guy et GRANIER, Claire 2013, "Mitigation, Adaptation or Climate Engineering?", *Theoretical Inquiries in Law*, 14 (1), p. 1-20

BRIDAY, Régis 2015, « *Les apprentis sorciers du climat. Raisons et déraisons de la géo-ingénierie de Clive Hamilton* », *Natures Sciences Sociétés*, n°23, Supplément, recension d'ouvrage, S135-138

BRIDAY, Régis 2014, « Qui alimente les études sur la géoingénierie ? Une perspective d'historien des sciences », *Natures Sciences Sociétés*, n°22, p. 124-131

BUCK, Holly Jean 2016, "Rapid scale-up of negative emissions technologies: social barriers and social implications", *Climatic Change*, n° 139, p. 155-167

BURNS, Wil 2017, "Climate Justice: Examining Recent Developments", Lecture at the Environmental Law Institute, March 10, 2017, <climatealert.info/2017/03/24/bio-energy-carbon-capture-and-storage-beccs-negative-emissions-with-negative-impacts>

CHICHILNISKY, Graciela 2016, "There is a solution to climate change – and it is carbon negative technology", *Rozenberg Quarterly. The Magazine*, <<http://rozenbergquarterly.com/there-is-a-solution-to-climate-change-and-it-is-carbon-negative-technology/Graciela-Chichilnisky>>

CRUTZEN, Paul 2006, "Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?", *Climatic Change*, n° 77, p. 211-219

CRUTZEN, Paul et STOERMER, Eugene 2000, "The Anthropocene", *Global Change Newsletter*, n°41, IGBP, p. 17-18.

EASAC (European Academies' Science Advisory Council), 2018, *Negative emission technologies: what role in meeting Paris Agreement targets?*, AESAC policy report 35, Feb. 2018, <https://www.knaw.nl/shared/resources/actueel/bestanden/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf>

EDGERTON, David, 2012, *Quoi de neuf ? Du rôle des techniques dans l'histoire globale*, Seuil

EDWARDS, Paul, 2010, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, MIT Press

ELIOTH, 2017, *Paris change d'ère. Vers la neutralité carbone en 2050*, rapport d'étude, <paris2050.elioth.com>

ENSAIA, 2017, « La méthanisation pour valoriser le CO₂. Présentation du Projet VALORCO », <<http://ensaia.univ-lorraine.fr/fr/content/la-methanisation-pour-valoriser-le-co2>>

FOYER, Jean, VIARD-CRETAT, Aurore et BOISVERT, Valérie, 2017, « Néolibéraliser sans marchandiser ? La bioprospection et les REDD dans l'économie de la promesse » in COMPAGNON, Daniel et RODARY, Estienne (Dir.), 2017, *Les Politiques de la biodiversité*, les Presses de Sciences Po, p. 225-249.

FRESSOZ, Jean-Baptiste 2013, « Pour une histoire désorientée de l'énergie », *Entropia*, 15, p. 173-187

FUSS, Sabine, et al. 2014, "Betting on negative emissions", *Nature Climate Change*, vol. 4, p. 850-853

GLOBAL CCS INSTITUTE, 2016, "The Global Status of CCS: 2016. Summary Report", <<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/201158/global-status-ccs-2016-summary-report.pdf>>

HAMILTON, Clive, 2013, *Les apprentis sorciers du climat. Raisons et déraisons de la géo-ingénierie*, Seuil

HARDY, Quentin, 2014, « Introduction. L'École de Bordeaux de critique de la technique, une pensée source de l'écologie politique », dans CHARBONNEAU, Bernard et ELLUL, Jacques, 2014 (1935-45), *Nous sommes des révolutionnaires malgré nous. Textes pionniers de l'écologie politique*, Seuil, p. 7-45

HULME, Mike, 2014, *Can science fix climate change? A case against climate engineering*, Polity Press

IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Contribution of Working group III to the Third assessment report of IPCC, Cambridge University Press

IPCC, 2001, *Climate Change 2001: Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Third assessment report of IPCC, Cambridge University Press

JOLY, Pierre-Benoît 2013, "On the Economics of Techno-scientific Promises", dans AKRICH, Madeleine, et al. (dir.), *Débordements. Mélanges offerts à Michel Callon*, Presses des Mines, p. 203-221

KELLOGG, William et SCHNEIDER, Stephen 1974, "Climate stabilization: For better or for worse?", *Science*, n°186, p. 1163-1172

LIEBOWITZ, Stan et MARGOLIS, Stephen (Ed.), 2014, *Path Dependence and Lock-in*, Edward Elgar

FOE (FRIENDS OF THE EARTH) *England, Wales & Northern Ireland*, 2011, "Negatonnes – an initial assessment of the potential for negative emission techniques to contribute safely and fairly to meeting carbon budgets in the 21st century", Report by Duncan McLaren for FoE, <<https://www.foe.co.uk/sites/default/files/downloads/negatonnes.pdf>>

MINX, Jan, *et al.* 2017, "Fast growing research on negative emissions", *Environmental Research Letters*, n°12, 035007, p. 1-10

NEGAWATT, 2017, *Scénario négaWatt 2017-2050*, Dossier de synthèse, <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf>

NEGAWATT, 2016, <<https://negawatt.org/Transitions-energetiques-en-Europe>>

NEMET, Gregory 2016, "6 ways to accelerate negative emissions technology", October 5, 2016, <<https://www.greenbiz.com/article/6-ways-accelerate-negative-emissions-technology>>

OECD, 2017, *Investing in Climate, Investing in Growth*, OECD Publishing

PERTHUIS (de), Christian, 2010, *Et pour quelques degrés de plus... Changement climatique : incertitudes et choix économiques*, Pearson, 2^{ème} édition

PESTRE, Dominique, 2006, *Introduction aux Science Studies*, La Découverte

SCHÄFER, Stefan 2013, "The Slippery Slope(s) in Climate Engineering", speech delivered at the 'Workshop on Geoengineering, Path-Dependence and Lock-in', University College London, 25 Oct. 2013, <<http://geoengineering-governance-research.org/perch/resources/stefan-schferthe-slippery-slopes-in-climate-engineering.pdf>>

SELOSSE, Sandrine et RICCI Olivia, 2014, "Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: new insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model", *Energy*, vol. 76(C), p. 967-975

SMITH, Pete, *et al.* 2016, "Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions", *Nature Climate Change*, vol. 6, p. 42-50

STILGOE, Jack, OWEN, Richard et MACNAGHTEN, Phil, 2013, "Developing a framework for responsible innovation", *Research Policy*, 42 (9), p. 1568-1580

STOLARK, Jessie, 2017, "ADM Deploys Carbon Capture and Sequestration Project at Illinois Ethanol Plant", *Environmental and Energy Study Institute*, 13 April 2017, <<https://www.eesi.org/articles/view/adm-deploys-carbon-capture-and-sequestration-project-at-illinois-ethanol-pl>>

TELLER, Edward, WOOD, Lowell et HYDE, Roderick 1997, "Global warming and Ice Ages: I. Prospects for physics-based modulation of global change", *UCRL-JC-128715*, Lawrence Livermore National Laboratory

VAN HEMERT, Mieke 2017, "Speculative promise as a driver in climate engineering research: the case of Paul Crutzen's back-of-the-envelope calculation on solar dimming with sulfate aerosols", *Futures*, 92, p. 80-89

VAN VUUREN, Detlef, HOF, Andries, VAN SLUISVELD, Mariësse et RIAHI, Keywan 2017, "Open discussion of negative emissions is urgently needed", *Nature Energy*, 2 (12), p. 902-904

VAUGHAN, Naomi et GOUGH, Clair 2016, "Expert assessment concludes negative emissions scenarios may not deliver", *Environmental Research Letters*, n°11, 095003

WOELCKE, Johannes 2012, "More than just hot air: carbon market access and climate-smart agriculture for smallholder farmers", International Finance Corporation, World Bank Group, January 2012, https://wbcarbonfinance.org/docs/Mor_ThanHotAir.pdf

YEO, Sophie et PEARCE, Rosamung, 2016, "Analysis: Negative emissions tested at world's first major BECCS facility", carbonbrief.org, 31 May 2016, <<https://www.carbonbrief.org/analysis-negative-emissions-tested-worlds-first-major-beccs-facility>>

ZÜRN, Michael et SCHÄFER, Stefan 2013, "The Paradox of Climate Engineering", *Global Policy*, n° 4, p. 266-277