



**AMBASSADE
DE FRANCE
AUX ÉTATS-UNIS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

SERVICE POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE

4101 Reservoir Road NW, Washington, D.C. 20007, États-Unis

Site internet : <http://www.france-science.com>

**« INTERVENTIONS » SUR LE CLIMAT :
ÉTAT DES LIEUX DES INITIATIVES AUX ÉTATS-UNIS**

RAPPORT D'AMBASSADE – JUILLET 2021

AUTEURS :

Slimane BEKKI, Directeur de recherche, LATMOS, Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS

Olivier BOUCHER, Directeur Adj. de l'Institut Pierre-Simon Laplace, Sorbonne Université / CNRS

Laurent JAMMES, Directeur Adj. Scientifique, Relations Industrielles, Innovation et valorisation, CNRS-INSU

Roland SÉFÉRIAN, Chercheur au CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS

Nicolas VIOVY, Directeur de recherche, LSCE, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA / UVSQ / CNRS

COORDINATEURS ET AUTEURS :

Julien BOLARD, Attaché adjoint pour la Science et la Technologie, Ambassade de France aux États-Unis

Stéphane RAUD, Attaché pour la Science et la Technologie, Ambassade de France aux États-Unis

Le présent document est strictement réservé à l'information des personnes et services auxquels il est adressé et ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation préalable du Ministère de l'Europe et des Affaires Étrangères.

Remerciements :

Les auteurs de ce rapport remercient tous les experts américains qui ont bien voulu partager leur analyse et leur vision et dont la liste figure en annexe.

Nous remercions en particulier :

Yves FRÉNOT, Conseiller pour la Science et la Technologie, Ambassade de France aux États-Unis ;

Alexandre DAMIENS, Conseiller Energie-Climat-Environnement, Ambassade de France aux États-Unis ;

Rémy RUAT, Rédacteur climat, développement, Ministère de l'Europe et des affaires étrangères

qui ont accepté de relire et commenter les différentes versions de ce rapport.

RESUME EXECUTIF

L'Accord de Paris sur le climat a été signé lors de la COP 21 en décembre 2015 par 196 Parties pour mettre en œuvre la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Il a pour objectifs de contenir le réchauffement climatique de notre planète à un niveau inférieur à 2°C par rapport au niveau préindustriel et de poursuivre les efforts pour limiter cette élévation de température à 1,5°C, ainsi que de renforcer les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques et de rendre les flux financiers compatibles avec un développement résilient et à faibles émissions. Cela nécessite une transformation à grande échelle de tous les secteurs de notre société (énergie, transports, bâtiments, etc.) dont on ne sait pas encore si elle pourra être suffisamment rapide pour tenir ces objectifs. Aux États-Unis, l'administration Biden a annoncé dès les premiers jours son objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050 par une approche « *whole-of-government* » qui mobilise l'ensemble des ministères concernés, les agences fédérales et le secteur privé. Si la question de la sobriété ou d'une consommation énergétique raisonnée est globalement absente du débat, nous observons depuis les années 2010 la structuration d'un écosystème composé d'acteurs académiques, de petites et grandes entreprises et de représentants de la société qui s'organisent et multiplient les initiatives pour transformer ces enjeux en opportunités économiques, y compris dans le domaine des méthodes moins conventionnelles d'intervention sur le climat.

Ce rapport distingue trois formes d'« intervention » climatique qui connaissent aux États-Unis des dynamiques très différentes : (1) le captage, l'utilisation et le stockage du CO₂ (*CO₂ Capture, Utilization and Storage*, CCUS), (2) les solutions fondées sur la nature (*Nature-Based Solutions*, NBS) ou d'autres techniques pour éliminer du dioxyde de carbone atmosphérique (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) mais également (3) des approches non-conventionnelles¹ telles que la modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management*, SRM).

1. Un lobbying et des investissements importants pour le déploiement des technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone.

Le captage, suivi de l'utilisation et le stockage du CO₂, est vu aux États-Unis comme une option prometteuse pour réduire les émissions de CO₂ et sa croissance dans l'atmosphère (voir Chap 2). Elle consiste à capter le CO₂ émis principalement de sources ponctuelles et de grand volume, puis à l'injecter dans des formations géologiques appropriées pour l'y stocker de façon permanente. Une alternative au stockage est l'utilisation du CO₂ capté pour fabriquer des produits manufacturés, avec un temps de stockage très variable selon les produits et les usages envisagés.

1.1. Des financements et un soutien fédéral en croissance depuis plusieurs années

Les États-Unis sont parmi les leaders mondiaux de la filière CCUS, avec plus de 4 Mds\$ investis de 2012 à 2018 pour la R&D mais également les infrastructures, l'entretien des installations, les programmes annexes des centrales thermiques, la restauration environnementale des sites... En 2021, le financement dédié à la R&D seule se stabilisait à environ 225 M\$. En complément, l'administration fédérale et de

1 Les méthodes dites « non-conventionnelles » sont des méthodes qui ne font pas partie du portefeuille de solutions utilisées pour construire les scénarios climatiques utilisés par le GIEC.

nombreux états américains s'efforcent de créer les conditions favorables à la croissance du secteur par la mise en place de réglementations (ex : *California Low Carbon Fuel Standard*, etc.) et de mécanismes financiers incitatifs, notamment un crédit d'impôt 45Q (actuellement de 20 à 30 \$/tCO₂ pour le stockage géologique), et la proposition de feuilles de route (ex : *National Petroleum Council*, etc.). Aujourd'hui, l'administration Biden réfléchit à la création de centres (*hubs*) carbone pour créer des synergies entre sources intensives (acier, chimie, ciment) et mutualiser les investissements.

1.2. Le développement bien engagé d'une filière intégrant tous les acteurs

Les résultats sont là puisqu'en 2019, les États-Unis comptabilisent 10 projets de taille industrielle (sur les 19 répertoriés dans le monde) pour le captage et le stockage géologique, totalisant 25 MtCO₂/an (sur un total mondial de 32 MtCO₂/an), alors que les émissions américaines sont d'environ 5 000 MtCO₂/an. Le CO₂ capté est principalement utilisé pour la récupération assistée d'hydrocarbures par l'industrie pétrolière (comptant pour 6% de la production totale) dont le CO₂ provient généralement de gisements naturels souterrains et non pas de captage. Un seul projet de taille commerciale injecte le CO₂ capté dans des aquifères (Archer Daniels Midland à Decatur II).

Les voies d'utilisation du CO₂ pour la fabrication de différents produits font aussi l'objet de beaucoup d'attention, avec la création de nombreuses startups (*Cemvita factory*, *Saratoga Energy*, etc.) souvent soutenues par les industriels émetteurs et des capitaux risqués. L'effort porte sur le développement de procédés avancés, de réacteurs et de catalyseurs, pour une conversion du CO₂ en carburants, produits chimiques, matériaux de construction, incluant systématiquement une analyse du cycle de vie pour s'assurer de la performance environnementale des différentes voies. L'agence *Lux Research* estime que le marché de l'utilisation du carbone pourrait atteindre 70 Mds\$ en 2030, tiré principalement par le marché des matériaux de construction.

1.3. Les BECCS et les DACCS bénéficient d'un soutien pour la construction des premiers prototypes industriels

L'Académie des Sciences américaine a publié une étude approfondie sur le potentiel de génération d'émissions négatives (captage du CO₂ atmosphérique), où sont analysées à la fois en termes de performance technico-économique et de potentiel deux voies importantes : le captage sur des installations utilisant de la biomasse (*Bio-energy with Carbon Capture and Storage*, BECCS) et le captage direct dans l'air (*Direct Air Capture*, DAC) associé au stockage géologique (*Direct Air Capture with Carbon Storage*, DACCS).

Aucune des centrales à biomasse actuellement en opération (soit 1,5% de l'électricité totale produite en 2016) n'est encore dotée d'un système de captage et de stockage de CO₂ mais l'Académie des sciences évalue le potentiel d'émissions négatives entre 500 et 1 500 MtCO₂/an à l'horizon 2040, fonction des quantités de sous-produits agricoles et de résidus d'exploitation forestières disponibles, et de la mise en place ou non de cultures énergétiques dédiées à cet usage.

Le coût du DAC dont les estimations oscillent entre 90 et 1000 \$/tCO₂ en fonction des sources d'énergies utilisées et sa pertinence comme technologie d'émissions négatives, hors utilisation pour la récupération assistée d'hydrocarbures, est encore incertain et sujet à controverses aux États-Unis. Cependant, 14 projets de R&D de DAC sont en cours pour la mise au point de nouveaux matériaux d'extraction du CO₂ (solvants/sorbants). Quatre prototypes industriels devraient voir le jour en 2021 avec

l'objectif d'un coût de captage de 100 \$/tCO₂. Enfin, en juin 2021, le DOE a annoncé un appel à projet de R&D sur le DAC financé à hauteur de 12 M\$. De 2015 à 2020, les annonces de financement des capitaux-risqueurs pour les projets DAC s'élevaient à 280 M\$.

1.4. L'engagement et le soutien de l'industrie pétrolière

A la demande du Secrétaire d'État à l'Énergie, le *National Petroleum Council* (NPC) a proposé fin 2019 une feuille de route pour le CCUS intitulée « *Meeting the Dual Challenge – A roadmap to At-Scale Deployment of CCUS* ». Elle adopte une approche en trois phases (« *Activation* », « *Expansion* » et « *At-scale deployment* »), avec pour objectif de capter et stocker 500 MtCO₂ d'ici 25 ans, jugé tout à fait atteignable du point de vue du stockage, le potentiel aux États-Unis étant évalué entre 3 000 et 8 600 GtCO₂ par le service de géologie (USGS). A titre de comparaison, aujourd'hui, les États-Unis émettent environ 5 GtCO₂ chaque année. Notons aussi que les États-Unis sont présents dans de nombreux programmes internationaux, collaborant en particulier avec l'Europe, la Chine, l'Inde et la Norvège.

2. Les Solutions fondées sur la Nature

Au-delà des solutions technologiques, l'autre voie d'élimination du carbone atmosphérique est d'utiliser la capacité naturelle des écosystèmes terrestres à piéger le carbone par la production de biomasse et son stockage dans les sols grâce à des solutions fondées sur la nature (*Nature-based solutions*, NBS, Chap. 3). Il s'agit soit de favoriser les puits naturels en les préservant ou en restaurant les habitats dégradés, soit de développer des filières techniques qui permettent d'améliorer la séquestration² du carbone dans les agroécosystèmes. D'autres solutions visent soit à incorporer directement du CO₂ dans le sol sous une forme stable (ex : *biochar*), soit d'épandre en surface des roches broyées qui vont soit directement fixer le carbone atmosphérique ou favoriser la productivité végétale (ex : roches phosphatées), jouant ainsi un rôle d'engrais. Dans un rapport intitulé "[*United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization*](#)", la Maison Blanche estimait en 2018 le potentiel de stockage naturel à environ 1 GtCO₂/an.

Contrairement au CCUS, les NBS ne supposent pas de développement industriel important. Elles reposent sur des initiatives localisées et de petite envergure de modification des sols mais déployées sur l'ensemble d'un territoire. Les solutions proposées aux États-Unis concernent principalement le secteur forestier et agricole. Pour le secteur forestier américain, il s'agirait de restaurer les forêts dégradées (ex : suite à un incendie) ou de planter des arbres sur des sols actuellement non forestiers. Pour le secteur agricole, il s'agit de changer les pratiques culturales pour accroître la séquestration de carbone dans les sols avec des techniques comme le labour réduit ou les cultures intermédiaires (au même titre que l'initiative *4 pour mille* en France). Il existe également des solutions mixtes comme la reconstitution de haies ou l'agroforesterie.

2.1. Des financements pour la recherche limités et disséminés sur quelques programmes de petite envergure

Ces dernières années, aucun grand programme structurant porté au niveau fédéral ne semble avoir émergé. Quelques projets ont été financés dans le cadre d'appels génériques tels que le projet "*Long*

2 Le terme 'séquestration' est généralement utilisé en France ainsi que par le GIEC lorsque l'on considère le stockage plus dynamique dans des réservoirs de carbone biologique, notamment le stockage NBS.

Term Ecological Research” soutenu à hauteur 1.1 M\$/an depuis plus de trente ans par la NSF ou le « *Landscape Carbon Sequestration for Atmospheric Recovery* » de seulement 80 \$k.

Cependant, en mars 2021, le Département de l’Agriculture américain a annoncé un nouvel appel à projets doté de 75 M\$ dans le cadre du *Regional Conservation Partnership Program’s (RCPP)* et de *l’Alternative Funding Arrangements (AFA)* pour soutenir des approches innovantes, non traditionnelles, de conservation à l’échelle locale et régionale des paysages. Une part significative de ce financement concerne le soutien de projets de recherche qualifiés de « *climate-smart* », notamment ceux présentant un fort potentiel de compensation par les marchés carbone.

2.2. L’émergence de nombreuses start-up et les premiers investissements de grandes entreprises et fondations

Quelques startups déjà établies ou en développement (ex : *CarboCulture*) mettent en place sur site des solutions fondées sur la nature. Un plus grand nombre de petites entreprises (ex : *Climate Action Reserve, NORI*) offrent des services de mise en relation entre les acheteurs et les producteurs de crédits carbone, ou des services de vérification et standardisation des sites de stockage de CO₂ via les NBS.

On trouve ainsi plusieurs petites entreprises qui visent à mettre en relation des clients désirant acheter des crédits carbone avec des agriculteurs qui vont bénéficier de ces crédits en mettant en place des solutions permettant d’accroître le stock de carbone des cultures. Elles agissent donc comme une banque du carbone pour les clients de crédits carbone et les prestataires mettant en place une solution de stockage. La start-up intervient également en proposant un portefeuille de solutions et se charge de la labellisation et de la vérification *a priori* et *a posteriori* des crédits carbone de ces projets.

Ces derniers mois, plusieurs grands groupes ou fondations (ex : *Walmart, Bezos Earth Fund, Apple, etc.*) ont annoncé vouloir investir plusieurs centaines de millions de dollars pour le déploiement des NBS. Il peut s’agir d’un mécénat qui finance les initiatives en lançant des appels à projets ou des entreprises qui développent directement leurs propres solutions.

2.3. Un secteur peu structuré mais un lobbying porté par quelques ONG

Plusieurs organisations (ex : *The Nature Conservancy*) interviennent par la promotion ou le lobbying institutionnel, par la réalisation d’études scientifiques ou de feuilles de route visant la mise en place de solutions locales ou par un soutien financier direct à quelques projets. Autre exemple, le think-tank *Carbon180* a rédigé un livre blanc qui propose des actions prioritaires et notamment une optimisation des services en faveur de l’agriculture par un rapprochement ou une meilleure coordination des services du département de l’Agriculture avec d’autres agences fédérales, en particulier le Département de l’Intérieur qui est chargé de la gestion des forêts fédérales. Pour sa part, le *World Resources Institute* propose une feuille de route pour la restauration des forêts.

2.4. L’arrivée de l’administration Biden devrait renforcer les initiatives au niveau fédéral

La nouvelle administration envisage la mise en place d’une banque du carbone et la création d’emplois fédéraux autour de la re-plantation de forêts dégradées. Cependant, les experts pointent plusieurs problèmes spécifiques liés au déploiement des solutions fondées sur la nature :

- Une difficulté importante pour estimer de façon précise le carbone effectivement stocké dans le cadre d’un projet spécifique ;

- Le caractère instable et temporaire du stockage. D'une part, il peut être contrecarré par l'impact du changement climatique mais d'autre part il peut être annihilé par une nouvelle modification de l'usage des sols. Les protocoles en vigueur suggèrent une durée minimum du stockage effectif généralement fixée à 10 ans, ce qui reste très court. Ces incertitudes rendent difficile l'établissement de standards pour les crédits carbone. Des entreprises et sociétés de conservation financent la recherche dans ce domaine afin de précisément quantifier l'apport des solutions fondées sur la nature ;
- Les difficultés d'arbitrage pour l'utilisation des sols entre l'agriculture pour la sécurité alimentaire, la création de zones naturelles à protéger et la pratique du stockage du carbone ;
- Le risque de conflit entre l'objectif d'émission négative et celui de protection de la biodiversité et de l'ensemble des services écosystémiques autres que celui lié au stockage de carbone.

Ces différentes contraintes nécessitent probablement de considérer un prix de la tonne de carbone variable en fonction de sa "qualité", le terme "qualité" représentant ici à la fois la durée du stockage et le maintien de la biodiversité et des services écosystémiques.

Enfin, dans le cadre des négociations sur la loi agricole (*Farm Bill*), des discussions émergent sur les financements que pourrait apporter l'État fédéral aux agriculteurs en mesure de séquestrer du carbone par l'adoption des techniques mentionnées.

3. Approches de modification du rayonnement solaire

La stratégie de modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management, SRM, Chap 5*) vise à ralentir le rythme du réchauffement planétaire via la manipulation du bilan énergétique de la Terre. En conséquence, ces approches n'attaquent pas la cause première du réchauffement global, qui est l'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre, mais plutôt le déséquilibre radiatif positif qui résulte de cette augmentation, en particulier du CO₂. Pour cette raison, les problématiques du SRM sont très différentes de celles de l'élimination du dioxyde de carbone. C'est en ce sens que la SRM ne fait pas partie du portefeuille de solutions « conventionnelles » utilisées pour construire les scénarios climatiques évalués dans les rapports du GIEC. La littérature scientifique suggère que seules quelques approches de SRM ont le potentiel de réduire l'ampleur du réchauffement planétaire et à atténuer certains de ses effets (ex : vagues de chaleur). Ces techniques ne sont guère envisageables sur le très long terme et sont souvent présentés pour des scénarios de dépassement temporaire de l'objectif de 1,5°C ou 2°C de réchauffement. Le déploiement de telles technologies introduirait aussi des incertitudes et des risques potentiels nouveaux tels que des impacts climatiques incertains à l'échelle régionale ou un abrupt réchauffement climatique en cas d'arrêt du déploiement de ces techniques. Aux États-Unis comme dans beaucoup d'autres pays, ces risques sont à l'origine d'une forte opposition à leur déploiement, ce qui explique en partie la faiblesse des investissements R&D sur le sujet comparés au CCUS ou NBS.

3.1. Des activités limitées à la recherche en laboratoire et à la modélisation

Aux États-Unis, les activités SRM sont pour le moment cantonnées au domaine de la recherche. Les budgets de R&D sont très faibles (quelques dizaines de millions de dollars par an) et proviennent uniquement des organismes publics et des fondations. Cependant, dans son rapport publié en mars 2021,

l'Académie des Sciences américaine recommande de soutenir la recherche dans ce domaine à hauteur de 20 à 40 M\$/an sur les 5 prochaines années.

3.2. La mise en place d'une gouvernance internationale est une nécessité mais également un défi

Face à la résistance aux expériences en plein air pour tester des technologies SRM, les experts américains ont bien conscience de l'aspect global des enjeux et de la nécessité d'une gouvernance à l'échelle internationale. Mais les défis liés à la mise en place d'une gouvernance sont complexes et très difficiles à appréhender. Les experts américains s'interrogent quant à la diversité des aspects à aborder (scientifiques, technologiques, environnementaux, économiques, politiques, éthiques) et la dimension internationale des SRM complexifie considérablement la structuration de cette gouvernance.

4. Autres enjeux et perspectives de développement d'une intervention sur le climat

À noter que les experts américains ne souhaitent plus utiliser le terme de géo-ingénierie pour décrire les solutions et les approches qui visent une élimination du dioxyde de carbone de l'atmosphère ou la modification du rayonnement solaire.

4.1. La nouvelle administration Biden se mobilise

Les observations de ces derniers mois révèlent que la nouvelle administration Biden semble volontaire pour promouvoir la recherche et l'ensemble des technologies qui visent une réduction et élimination du CO₂ dans l'atmosphère. Par exemple, un nouvel instrument dédié aux solutions pour le climat, l'*Advanced Research Projects Agency for Climate* (ARPA-C) sera créé et le *Bureau des Énergies Fossiles* a été renommé *Bureau des Énergies Fossiles et de gestion du carbone*.

Par ailleurs, depuis 2020, les entreprises, les organisations et les gouvernements locaux ont multiplié les annonces d'objectif de neutralité carbone. Ces annonces, qui ne sont pas des engagements, devraient cependant favoriser l'émergence de marchés de crédits carbones spécifiques.

4.2. La loi de programmation *Energy Act of 2020*

Votée en décembre 2020, l'*Energy Act of 2020* prévoit 4,7 Mds\$ sur 5 ans pour le développement de technologies et de projets pilotes à grande échelle pour le captage du CO₂ dans l'industrie du charbon, du gaz naturel ou manufacturière. Un programme inter-agences d'évaluation de la capacité de stockage géologique du CO₂ aux États-Unis et d'identification des sites potentiels de démonstration pour les transformer en sites de stockage commerciaux sera alimenté à hauteur de 800 M\$ sur 5 ans. 281 M\$ sont prévus pour identifier et évaluer les nouvelles technologies d'utilisation du CO₂ à travers une variété de secteurs et la création d'un centre national de recherche dédié.

4.3. Des financements très importants en négociation pour les années à venir

Le budget 2022 proposé par la Maison Blanche comprend plusieurs lignes qui visent à soutenir la politique et le développement des technologies de décarbonation de l'économie américaine. Des augmentations de budget très importantes sont en négociation pour le Bureau des sciences du DOE ou

l'*Advanced Research Projects Agency-Energy* (ARPA-E), notamment pour soutenir les sciences du climat, la modélisation et la prédiction climatique ou les technologies CCUS. Les négociations en cours pourraient converger vers un budget R&D de 150 M\$ pour le captage, 117 M\$ pour le stockage, 63 M\$ pour le captage de CO₂ atmosphérique et enfin 38 M\$ pour l'utilisation du carbone.

La demande discrétionnaire prévoit également 161 M\$ pour l'USDA pour soutenir une initiative multi-agences visant le développement d'outils scientifiques pour mesurer, surveiller, et suivre la séquestration du carbone, la réduction des gaz à effet de serre, le suivi de la faune et de la flore, et d'autres services environnementaux au niveau de l'exploitation agricole et sur les terres fédérales.

4.4. Le plan infrastructure : une négociation laborieuse mais un soutien bipartisan aux technologies de captage du carbone

Le plan "infrastructure" de 1 200 Mds\$ en cours de négociation au congrès propose deux stratégies pour accélérer le déploiement du captage du carbone : (1) une amélioration de plusieurs incitations fiscales existantes afin de limiter les incertitudes financières liées au déploiement du CCUS et (2) un investissement direct dans des prototypes préindustriels de captage du carbone dans les secteurs de la sidérurgie, du ciment et dans l'industrie chimique. Une enveloppe totale de 15 milliards sur 8 ans devrait soutenir la R&D et le déploiement des technologies de captage, transport et séquestration du carbone. Des discussions sont également en cours au Congrès pour augmenter le crédit d'impôt 45Q de 50 à 120 \$/tCO₂ dans le cas du DAC.

4.5. Les fondations, des acteurs majeurs dans les années à venir

Ces derniers mois, plusieurs fondations liées aux plus grandes fortunes américaines ont dévoilé leurs programmes de financements de projets qui couvrent le spectre des solutions d'intervention sur le climat tels que le *Restore Fund de Apple* et *Conservation International* (200 M\$); le *Nature Conservancy project* (\$100 millions), le *World Wildlife project* (100 M\$) ou le *Environmental Defense project* (100 M\$) tous trois du *Bezos Earth Fund*, le programme *XPRIZE for Carbon Removal* (100 M\$) de la fondation Musk ainsi que le soutien de la fondation Gates à l'entreprise *Carbon Engineering* (montant non communiqué).

TABLE DES MATIERES

Résumé exécutif	4
1. Un lobbying et des investissements importants pour le déploiement des technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone.	4
1.1. Des financements et un soutien fédéral en croissance depuis plusieurs années	4
1.2. Le développement bien engagé d'une filière intégrant tous les acteurs	5
1.3. Les BECCS et les DACCS bénéficient d'un soutien pour la construction des premiers prototypes industriels	5
1.4. L'engagement et le soutien de l'industrie pétrolière	6
2. Les Solutions fondées sur la Nature	6
2.1. Des financements pour la recherche limités et disséminés sur quelques programmes de petite envergure	6
2.2. L'émergence de nombreuses start-up et les premiers investissements de grandes entreprises et fondations	7
2.3. Un secteur peu structuré mais un lobbying porté par quelques ONG	7
2.4. L'arrivée de l'administration Biden devrait renforcer les initiatives au niveau fédéral	7
3. Approches de modification du rayonnement solaire	8
3.1. Des activités limitées à la recherche en laboratoire et à la modélisation	8
3.2. La mise en place d'une gouvernance internationale est une nécessité mais également un défi	9
4. Autres enjeux et perspectives de développement d'une intervention sur le climat	9
4.1. La nouvelle administration Biden se mobilise	9
4.2. La loi de programmation <i>Energy Act of 2020</i>	9
4.3. Des financements très importants en négociation pour les années à venir	9
4.4. Le plan infrastructure : une négociation laborieuse mais un soutien bipartisan aux technologies de captage du carbone 10	10
4.5. Les fondations, des acteurs majeurs dans les années à venir	10
Table des matières	11
Introduction et éléments de cadrage du rapport	15
1. Contexte international	15
1.1. L'Accord de Paris : objectifs et principes fondateurs	15
1.2. Le rapport spécial du GIEC	15
1.3. En route vers le <i>Global Stocktake</i>	16
1.4. La contribution française	17
1.5. Une dynamique d'évolution rapide des enjeux technologiques et socio-économiques.	17
2. Contexte aux États-Unis	17
2.1. Un changement de posture de l'administration vis-à-vis de la question climatique	17
2.2. L'État fédéral intensifie son soutien à la recherche sur les questions énergétiques et climatiques	18
2.3. La gestion du carbone est au cœur de la loi de programmation énergétique	19
2.4. L'implication des États, des villes et des collectivités locales	19

2.5.	Une société qui prend conscience des enjeux climatiques mais évite le débat d'une consommation raisonnée	20
2.6.	Un lobbying pour le captage du carbone particulièrement bien structuré à Washington D.C.	21
3.	L'intérêt d'analyser les initiatives américaines	21
3.1.	L'importance stratégique pour la France de suivre l'évolution des initiatives américaines et les projets d'interventions sur le climat	21
1.1.	3.2 Définition et périmètre	22
3.2.	L'évolution du vocabulaire concernant les techniques d'intervention climatique dites non-conventionnelles	24
3.3.	La méthode de travail	24
3.4.	Impact attendu du rapport	25
	Techniques de captage, stockage et utilisation du dioxyde de carbone	26
1.	Descriptif et éléments de contexte	26
1.1.	La chaîne de valeur du Captage, Utilisation ou Stockage du CO ₂	26
1.2.	Les émissions stationnaires nationales	27
2.	État des lieux	28
2.1.	Le socle industriel – l'industrie pétrolière et gazière	29
2.2.	Les programmes de RD&D soutenus par l'État fédéral	29
3.	Des infrastructures de recherche dédiées	32
4.	Un intérêt croissant pour les émissions négatives	32
4.1.	Bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS</i>)	32
4.2.	Captage direct du CO ₂ dans l'air (<i>Direct Air Capture, DAC</i>)	32
5.	La dynamique de déploiement	35
5.1.	De nombreux projets en opération	35
5.2.	Un écosystème qui évolue	36
5.3.	Un environnement réglementaire en place	37
5.4.	Des mécanismes financiers facilitateurs	39
5.5.	La feuille de route du <i>National Petroleum Council</i> (NPC)	40
5.6.	La vision des autres acteurs	42
5.7.	Une réorientation progressive des financements fédéraux vers les technologies de captage direct dans l'air.	42
5.8.	Loi de programmation <i>Energy Act of 2020</i>	42
6.	Les partenariats multilatéraux et bilatéraux	44
	Les Solutions fondées sur la Nature	45
1.	Descriptif et éléments de contexte	45
2.	Différentes voies permettent d'améliorer le stockage du carbone dans les écosystèmes terrestres.	46
2.1.	Changer l'affectation des sols ou restaurer les écosystèmes dégradés qui stockeront plus de carbone dans la biomasse et dans les sols.	46
2.2.	Modifier les pratiques de gestion des écosystèmes afin d'améliorer le stockage du carbone dans les écosystèmes anthropisés.	47
2.3.	Incorporer au sol des matériaux riches en carbone ou facilitant la fixation du carbone.	47

3.	Un potentiel de stockage bien identifié mais un faible soutien institutionnel.	48
4.	Mais un écosystème de lobbies et d'ONG dynamique	49
5.	Des grands groupes industriels et des fondations qui investissent	50
6.	Des startups qui commencent à développer des projets opérationnels.	51
6.1.	Climate Action Reserve	51
6.2.	<i>Nori</i> , une marketplace de crédits carbone utilisant la technologie blockchain	51
6.3.	<i>CarboCulture</i> , le biochar pour des infrastructures urbaines plus vertes.	53
7.	Un intérêt pour les solutions fondées sur la nature qui attirent de plus en plus de capitaux publics et privés.	54
8.	Les solutions fondées sur la nature pourraient connaître un essor ces prochaines années	55
8.1.	Le secteur des NBS à un stade embryonnaire	55
8.2.	De nouvelles perspectives avec l'administration Biden	55
8.3.	Les ONG essaient de se faire entendre	55
8.4.	La place des actifs forestiers dans les marchés carbonés.	55
8.5.	Les NBS se développent majoritairement par la finance du carbone forestier et les marchés de crédits carbonés. 56	
8.6.	La question fondamentale de la durée de stockage reste en suspens.	57
8.7.	Des bénéfices multiples pour la biodiversité	57
	Techniques de modification du rayonnement solaire	59
1.	Descriptif et éléments de contexte	59
2.	Incertitudes des différentes approches de SRM	59
3.	Les risques potentiels	62
3.1.	Des impacts climatiques incertains à l'échelle régionale	62
3.2.	Abrupt réchauffement climatique en cas d'arrêt du SRM	63
3.3.	Des impacts indésirables spécifiques à certaines approches	64
4.	Enjeux pour la recherche sur les SRM aux États-Unis	64
4.1.	Quelques programmes de recherche en cours	64
4.2.	Une gouvernance de la recherche à préciser, dans un contexte de résistances aux expérimentations en plein air 65	
5.	Contexte, financement et gouvernance des approches SRM	66
5.1.	Quelques auditions d'experts au Capitole et un rapport de l'académie des sciences	66
5.2.	Une opposition au déploiement du SRM qui persiste	67
5.3.	Des financements pour la recherche très limités	67
5.4.	L'immense défi de la gouvernance du SRM	68
6.	L'avenir du SRM aux Etats-Unis demeure très incertain	68
	Autres enjeux et perspectives de développement d'interventions sur le climat aux Etats-Unis	70
1.	L'arrêt de l'utilisation du terme impropre de géo-ingénierie	70
2.	Une interrogation quant à la durée du stockage	70
3.	Le rôle décisif des fondations et des investisseurs privés	70
4.	L'influence des think-tanks et des organisations non gouvernementales.	71

4.1.	Une augmentation marquée de l'activité des think-tanks sur les CDR et SRM.	71
4.2.	Des priorités différentes en fonction des think-tanks	72
5.	Budget fédéral 2022 : des centaines de M\$ en discussion	73
5.1.	Le rôle stratégique du Département de l'Énergie	73
5.2.	Le Département de l'Agriculture	74
6.	Une enveloppe de 15 milliards du plan infrastructure devrait soutenir l'industrie de captage, transport et stockage du carbone.	74
7.	Le développement de l'industrie du CCUS ne fait pas l'unanimité aux États-Unis.	75
	Annexe 1 – Liste des rencontres d'expert	77
	Annexe 2 – Table des illustrations	80
	Annexe 3 – Acronymes	82

INTRODUCTION ET ELEMENTS DE CADRAGE DU RAPPORT

1. Contexte international

1.1. L'Accord de Paris : objectifs et principes fondateurs

Un des objectifs de l'Accord de Paris, conclu en décembre 2015 et ratifié depuis par la quasi-totalité des pays, est de contenir le réchauffement climatique sous les 2°C tout en poursuivant les efforts pour limiter l'augmentation de température à 1,5 °C. Il repose sur les "Contributions déterminées au niveau national" des États pour diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre "de façon à 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" (Article 4 de l'Accord de Paris). L'Accord de Paris prévoit un processus de révision des contributions volontaires des États tous les 5 ans de manière à monter en ambition leur effort à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Enfin, un processus d'évaluation appelé le Bilan mondial (*Global Stocktake*) mis en place dans l'Article 14 de l'Accord de Paris vise à suivre les progrès des États dans l'implémentation de leurs contributions nationales.

1.2. Le rapport spécial du GIEC

Suite à l'adoption de l'Accord de Paris, la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a saisi le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour réaliser une évaluation scientifique des objectifs de l'Accord de Paris. Cette évaluation a pris substance dans le rapport spécial du GIEC pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C (SR15). Ce rapport, publié en octobre 2018, a clairement démontré que les contributions volontaires des États soumises en 2015 représentent une avancée vers la décarbonation mais restent encore largement insuffisantes pour ramener les émissions à l'échelle du monde sur une trajectoire compatible avec les objectifs de 1,5 et 2°C. Des différentes caractéristiques des trajectoires d'émissions de CO₂, celles mettant en lumière le besoin d'un abattement de 40% des émissions anthropiques de CO₂ en 2030 par rapport à 2010, et d'arriver à niveau nul d'émissions nettes de CO₂ (*net zero emissions*) en 2050 suivi d'un certain niveau d'émissions négatives, restent les plus emblématiques des défis qui se posent aux États.

Contributions aux émissions nettes de CO₂ dans 4 trajectoires d'atténuation caractéristiques

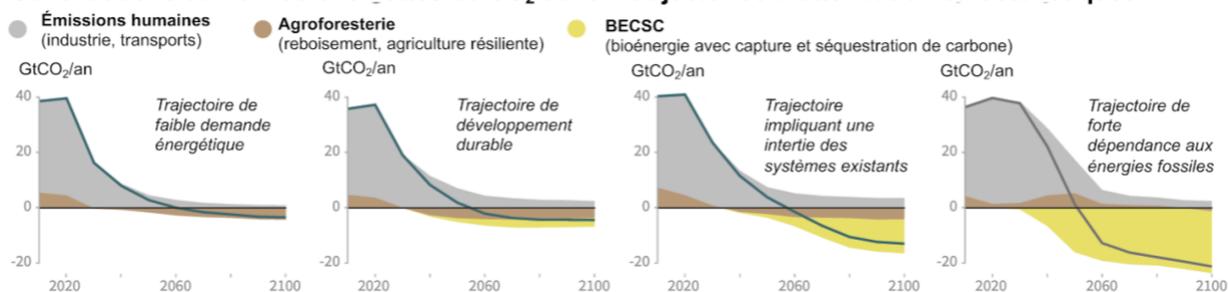


Figure 1 - Emissions mondiales de CO₂ dans quatre trajectoires d'atténuation caractéristiques compatibles avec l'objectif de 1,5 °C avec différents degrés de recours à la séquestration par les écosystèmes et aux émissions négatives via la technique de bioénergie avec captage et séquestration de carbone (BECCS). Source : figure adaptée du rapport SR15 de l'IPCC 2018.

Le SR15 met en évidence qu'il sera nécessaire de déployer une gamme de solutions pour arriver à limiter le réchauffement global à 2°C voire 1,5°C. Comme illustrées sur la Figure 1, ces solutions visent d'abord à réduire fortement les émissions anthropiques de CO₂ mais aussi à compenser les émissions

résiduelles en particulier celles dues à l’agriculture ou à d’autres secteurs plus difficiles à décarboner (*hard-to-decarbonize sectors*). Le SR1.5 souligne notamment les contraintes de faisabilité et de soutenabilité afférentes au déploiement de l’élimination du CO₂ à large échelle et qu’il est possible (notamment dans le 1^{er} des 4 scénarios) de limiter le recours à ces techniques en priorisant l’action sur la maîtrise de la demande et les réductions d’émissions.

Enfin, très clairement noté dans son résumé pour décideurs, les trajectoires d’atténuation du SR15 ont été construites sans mettre en œuvre de techniques d’intervention climatique non conventionnelles de type “modification du rayonnement solaire” (Solar radiation management, SRM). Seul le Chapitre 4 du SR15 présente et évalue cette famille de techniques non-conventionnelles complémentaires au déploiement de méthodes d’atténuation des émissions de CO₂ (Figure 2).

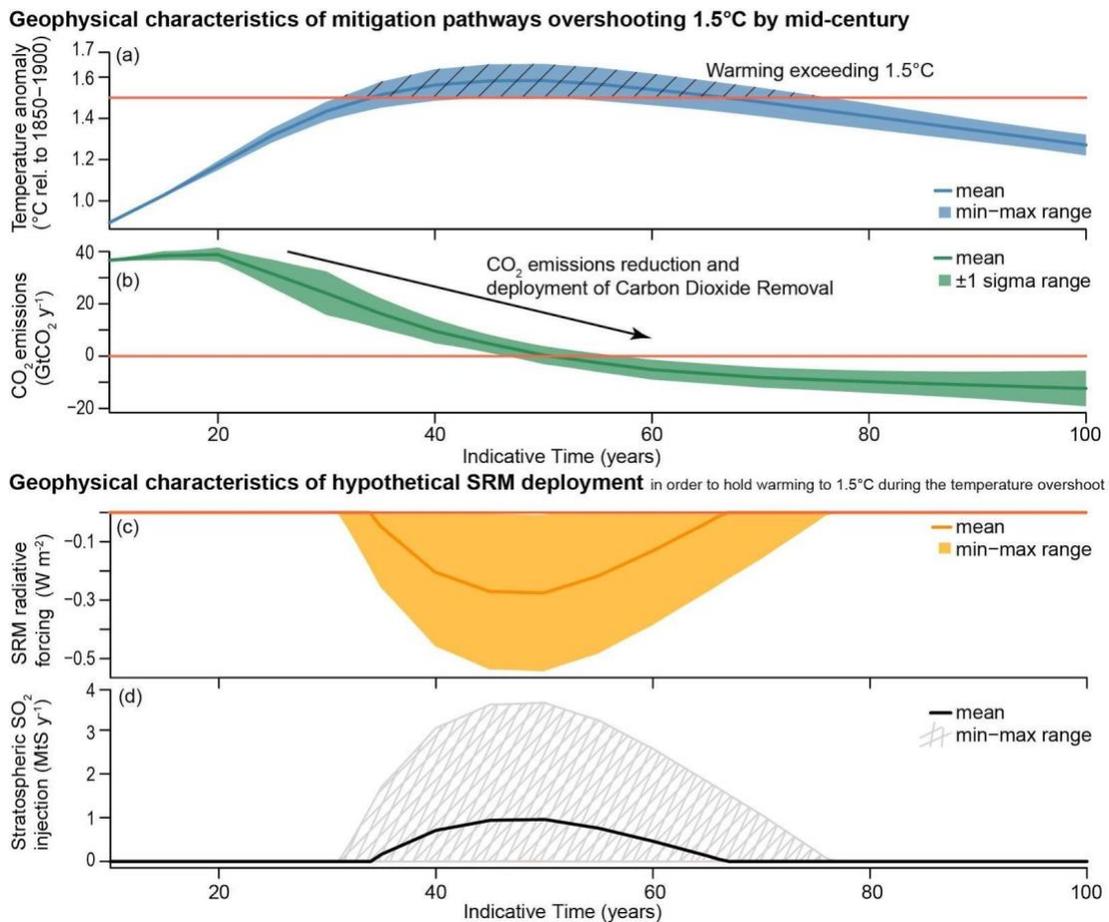


Figure 2 - Scénario faisant intervenir un hypothétique déploiement de techniques de modification du rayonnement solaire en combinaison avec des méthodes de captage et de stockage du CO₂ pour éviter un dépassement de la limite de réchauffement à 1.5°C (scénario dit de *peak shaving*). Figure issue de De Coninck et al. (2018).

1.3. En route vers le *Global Stocktake*

Entre l’entrée en vigueur de l’Accord de Paris (novembre 2016) et aujourd’hui, le contexte international a bien évolué. D’abord les États-Unis, sortis de l’Accord de Paris sous l’administration Trump, l’ont réintégré en février 2021 sous l’administration Biden. D’autre part, les premières contributions nationales déposées en 2015 ont été revues à partir de décembre 2020 par plus d’une centaine d’États.

En effet, en 2019, seuls deux pays du G20 (la France et le Royaume-Uni) avaient traduit l'objectif ultime de l'Article 4 de l'Accord de Paris (neutralité carbone) dans leur législation nationale. Depuis d'autres pays, dont les États-Unis, sont en train de discuter leur traduction dans leurs législations nationales ou fédérales.

La 26^{ème} Conférence des Parties (COP26) qui devait se tenir à Glasgow en 2020 a été décalée d'un an à cause de la crise sanitaire. Elle devrait constituer la première étape permettant de vérifier la mise en œuvre et l'efficacité de l'Accord de Paris. Durant cette conférence, les Parties devront présenter leur seconde feuille de route concernant leurs contributions à cet objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, dont leurs stratégies révisées de développement bas-carbone pour 2050.

Le *Global Stocktake*, prévu pour 2023, aura pour objectif d'évaluer les progrès des États dans l'implémentation de leurs contributions nationales.

1.4. La contribution française

Depuis 2015, la contribution déterminée au niveau national de la France (en 19^{ème} position dans les émetteurs de CO₂ mondiaux, en 59^{ème} position pour les émissions rapportées au nombre d'habitants) s'aligne sur l'engagement européen à réduire ces émissions de CO₂ avec en ligne de mire la neutralité climatique d'ici 2050. Cette contribution nationale prend la forme de la "Stratégie Nationale Bas Carbone" (SNBC). Cette stratégie a été révisée en 2018-2019 pour mieux tenir compte du consensus scientifique et viser la neutralité carbone en 2050 tout en disposant de points de passage (budget carbone) pour les périodes 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033.

D'importance pour le présent rapport, la SNBC, dans son annexe 5, stipule que le scénario de référence envisage "qu'environ 5 MtCO₂/an pourraient ainsi être évitées dans l'industrie en 2050, et qu'une dizaine de MtCO₂ d'émissions négatives pourraient au total être produites annuellement grâce aux techniques de bioénergie avec captage et séquestration de carbone (BECCS)". De même, le PNACC2 (Plan National d'Adaptation au Changement Climatique) préconise l'utilisation de solutions basées sur la nature pour l'adaptation des territoires aux changements climatiques.

1.5. Une dynamique d'évolution rapide des enjeux technologiques et socio-économiques.

Une veille climatique, politique et socio-économique est primordiale pour comprendre les avancées vers la neutralité carbone et les moyens mis en œuvre pour y parvenir, et pour mieux apprécier les besoins en politiques d'adaptation. Enfin, bien qu'il n'en soit pas question dans l'Accord de Paris, le spectre des méthodes d'intervention non-conventionnelles³ sur le climat reste présent compte-tenu notamment des incertitudes sur la réussite des politiques climatiques.

2. Contexte aux États-Unis

2.1. Un changement de posture de l'administration vis-à-vis de la question climatique

Pendant quatre années, l'administration Trump a structuré sa politique en matière de climat et d'environnement à contre-courant de l'agenda international tout en limitant, voire annulant, la portée des nombreuses normes anti-pollution et de protection de l'environnement. Cependant, le processus

3 Les méthodes dites « non-conventionnelles » sont des méthodes qui ne font pas partie du portefeuille de solutions utilisées pour construire les scénarios climatiques futurs utilisés par le GIEC.

législatif aux États-Unis, qui nécessite le soutien du Congrès, aura limité le nombre des mesures finalement promulguées. Les baisses de budget pour la recherche environnementale et climatique réclamées par la Maison Blanche (parfois jusqu'à -30%), n'auront jamais abouti. Malgré tout, la présidence Trump aura contribué à fragiliser l'expertise scientifique, voire même à déstabiliser le monde académique et le fonctionnement interne de certaines agences fédérales dédiées à la science ou à la protection de l'environnement (ex : l'*Environmental Protection Agency*, la *National Science Foundation*, l'*U.S. Geological Survey*, etc.).

L'élection de Joe Biden a marqué un changement radical de la politique fédérale en matière de climat et d'environnement. De nombreux dossiers relatifs au changement climatique, à la protection de la biodiversité et des ressources naturelles, à la pollution de l'air et des sols, ainsi que de nouvelles réglementations fiscales et des règles comptables au sein des agences fédérales ont été rouverts dans les premières semaines de son mandat. Les États-Unis ont rejoint l'Accord de Paris et le Président a signé le 27 janvier 2021 un *Executive Order* faisant de la crise climatique une priorité nationale et de politique étrangère. L'administration Biden adopte une posture systémique et holistique face à la crise climatique en déployant une approche « *whole-of-government* » afin de coordonner l'action de l'ensemble des départements concernés. C'est un changement profond pour l'exécutif qui mobilise l'ensemble des agences fédérales et des acteurs sur la question.

Par ailleurs, l'administration Biden vient de relancer le processus de coordination et de rédaction du cinquième Rapport National sur le Climat (*National Climate Assessment*) qui avait été bloqué par l'administration Trump. Sa publication initialement prévue pour 2021 devrait finalement aboutir en 2023. Tous les 4 ans, ce rapport est initié et coordonné dans le cadre du *Programme de Recherche Américain sur le Changement Global* (*U.S. Global Change Research Program*). Un groupe de travail inter-agences est alors constitué avec la mission d'évaluer le risque climatique sur le territoire américain et de proposer quelques orientations stratégiques d'atténuation et d'adaptation.

2.2. L'État fédéral intensifie son soutien à la recherche sur les questions énergétiques et climatiques

L'État fédéral dispose de deux outils de fléchage des investissements fédéraux vers les programmes relatifs aux questions énergétiques et climatiques :

1. **les projets de loi de finance**, via les négociations budgétaires annuelles, qui cadrent les dépenses discrétionnaires (*appropriation bills*, environ 1 500 Mds\$ en 2021) ;
2. **les plans de relance (*stimulus packages*)** débloqués suivant des chaînes de décision plus courtes en réponse à des événements exceptionnels comme la crise financière de 2008 avec l'*American Recovery and Reinvestment Act of 2009* (ARRA, environ 800 Mds\$) ou la pandémie de COVID-19 avec l'*American Rescue Plan* (environ 1 900 Mds\$).

En 2018, le budget total pour la recherche et développement aux États-Unis est estimé à 580 Mds\$, dont plus de 70% financés par le secteur privé et 23% par le gouvernement fédéral, soit 135,7 Mds\$. Pour 2021, le budget fédéral pour la recherche et développement s'élève à 165 Mds\$, selon la répartition suivante :

- 80 Mds\$ investis dans les applications militaires (*Department of Defense, DOD*) ;
- 40 Mds\$ pour la santé (*National Institutes of Health, NIH*) ;
- 21 Mds\$ pour l'énergie (*Department of Energy, DOE*) ;

- 13 Mds\$ pour le secteur spatial (*National Aeronautics and Space Administration, NASA*).

Les activités de recherche et développement au niveau fédéral sont coordonnées par les directions scientifiques et technologiques des diverses agences et départements. A titre d'exemple, le budget de la *National Science Foundation (NSF)* est de 6,7 Mds\$ pour l'année 2021. Au Département de l'Énergie, le Bureau pour la Science dispose de 7 Mds\$ pour la recherche fondamentale transdisciplinaire.

Sur les questions énergétiques, la majorité de la recherche fédérale est financée par le DOE, à hauteur de 3,6 Mds\$ pour l'année 2021. Près de 1,5 Mds\$ iront vers la recherche appliquée pour des technologies bas carbone (incluant le captage, l'utilisation et le stockage de CO₂), de stockage de l'énergie et de résilience des réseaux.

A titre d'indicatif pour l'année 2021, le directoire *Earth Science* de la NASA est doté de 2 Mds\$ de budget, tandis que le bureau *Office of Oceanic and Atmospheric Research (OAR)* de la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* est doté de 594 M\$. Sur les questions climatiques, la recherche est disséminée à travers les agences telles que la NSF (y compris le *National Center for Atmospheric Research, NCAR*), la NOAA, la NASA ainsi que le DOE⁴. Certains projets relatifs aux sciences climatiques peuvent être soutenus par le Directoire pour les Géosciences de la NSF dont les dotations globales ont légèrement augmenté ces dernières années pour atteindre les montants suivants en 2021 :

- Bureau des sciences atmosphériques : 303 M\$;
- Sciences de la Terre : 182 M\$;
- Sciences océaniques : 370 M\$.

2.3. La gestion du carbone est au cœur de la loi de programmation énergétique

Par ailleurs, la loi de programmation pluriannuelle *Energy Act of 2020*, promulguée par le président Trump le 27 décembre 2020, a posé les bases d'une action fédérale structurée sur la gestion du carbone, incluant les technologies de captage et de stockage. Perçue comme une avancée historique, cette loi de programmation planifie un investissement en RDD&CA⁵ sur 5 ans de 35 Mds\$, qui couvre plusieurs filières dont l'hydrogène, le nucléaire, les nouvelles énergies renouvelables et la gestion du CO₂. Ce montant reste néanmoins soumis aux votes budgétaires annuels et n'est donc à ce stade que programmatique. Le Titre 4 de l'*Energy Act* soutient le développement de la filière existante de captage de carbone à la source. Il soutient l'amélioration des performances industrielles ainsi que le financement des infrastructures de transport de CO₂. Le Titre 5 quant à lui va financer la recherche sur les technologies de captage de carbone atmosphérique dans les laboratoires nationaux. Au total, ce sont plus de 1 Mds\$ de dépenses autorisées par le Congrès sur ces postes.

2.4. L'implication des États, des villes et des collectivités locales

Suite de l'annonce en juin 2017 du Président Trump de son intention de quitter l'Accord de Paris, Michael Bloomberg et le gouverneur de Californie Jerry Brown ont lancé l'initiative *America's Pledge* en juillet 2017. Un nombre sans précédent de villes, d'États, d'entreprises et d'acteurs de la société civile

4 <https://www.globalchange.gov/agencies>

5 Recherche, Développement, Démonstration et Commercialisation. Aujourd'hui, le DOE est embarqué dans toutes les phases des projets.

américaine ont alors réaffirmé leur engagement de participer à l'atteinte des objectifs climatiques dans le cadre de l'Accord de Paris. En février 2021, l'initiative *America's Pledge* a fusionné avec la coalition *America is all in* pour prolonger le dynamisme des communautés engagées en faveur du climat.

En juin 2017, la *United States Climate Alliance* a été créée par un groupe d'États et de territoires qui se sont engagés à respecter l'Accord de Paris sur le climat, en atteignant l'objectif américain de réduire d'ici à 2025 les émissions de 26 à 28% par rapport aux niveaux de 2005. Au 1^{er} janvier 2020, l'alliance comprend 26 membres (24 États et 2 Territoires : Puerto Rico et les îles Samoa) et semble vouloir poursuivre ses engagements avec des perspectives jusqu'en 2030.

2.5. Une société qui prend conscience des enjeux climatiques mais évite le débat d'une consommation raisonnée

Avant d'aborder les solutions envisagées aux États-Unis pour réduire la quantité de CO₂ et autres gaz à effet de serre de l'atmosphère ou gérer les conséquences du changement climatique, il peut être utile de rappeler le contexte dans lequel ses approches sont envisagées.

Le *Pew Research Center*, un institut américain d'étude d'opinion, a publié en juin 2020 les résultats d'un sondage sur la perception du changement climatique par la population américaine. Parmi les adultes interrogés, 63% disent observer les conséquences du changement climatique sur leur communauté. Concernant l'action du gouvernement (sous l'administration Trump), 65% des sondés décrivent un manque d'effort de la part de l'exécutif. Le sondage met en lumière un fort soutien pour certaines stratégies de décarbonation : le reboisement et les crédits d'impôts pour les technologies de captage de carbone.

Et pourtant, avec 4,9 GtCO₂ émis en 2019, les États-Unis sont le deuxième pays émetteur au monde après la Chine⁶. Parmi les grands pays émetteurs, les Américains sont individuellement parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre par habitant (derrière le Qatar, l'Arabie Saoudite, l'Australie et le Canada). Selon un sondage du 20 avril 2021 de CBS⁷, 56% des Américains souhaitent que les États-Unis prennent des mesures immédiates contre le changement climatique et 48% pensent qu'ils doivent être le leader international dans cette bataille.

Cependant, ils n'envisagent pas de revoir leur modèle économique et de consommation. Le rapport de l'Académie des sciences qui préconise plusieurs solutions pour "décarboner l'économie et le secteur de l'énergie" n'évoque pas la piste d'une réflexion sur les modes de consommation. Rares sont les ONG ou autres acteurs qui réclament une inflexion de la consommation nationale d'énergie et de produits manufacturés. Le débat sur la "sobriété" est globalement absent des médias. Certains de nos interlocuteurs, dont certains travaillent régulièrement avec le Congrès, laissent entendre que les élus n'abordent pas le sujet afin de préserver leurs chances de réélection. Autrement dit, une grande majorité des Américains n'est pas prête à revoir son modèle de consommation.

Dans ce contexte, l'État fédéral américain se concentre sur les solutions dites d'atténuation, principalement sous le prisme de la décarbonation des sources d'énergie et l'augmentation de l'efficacité énergétique. Dans le même temps, les collectivités locales semblent privilégier les solutions d'adaptation

6 <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/essd-12-3269-2020.pdf>

7 <https://www.cbsnews.com/news/climate-change-opinion-poll-04-18-2021/>

en espérant mobiliser les milliards de dollars nécessaires pour renforcer les côtes, reconstruire les réseaux d'égouts, revoir les pratiques agricoles pour se protéger contre les inondations, et se prémunir des incendies de forêt et des vagues de chaleur.

2.6. Un lobbying pour le captage du carbone particulièrement bien structuré à Washington D.C.

Depuis plusieurs années et en particulier ces deux dernières années, le lobbying est omniprésent autour du Capitol à Washington D.C. afin de promouvoir les techniques de captage, stockage et utilisation du dioxyde de carbone (*Carbon Capture, Utilization and Storage*, CCUS) et de structurer une industrie émergente sur le sujet. Plusieurs *think-tanks* et associations (ex : *Carbon Utilization Research Council*, *Carbon Capture coalition*, *Global CCS Institute*, *Bipartisan Policy Center*, *Atlantic Council*, etc.) multiplient les événements de promotion en sollicitant des experts qui s'expriment avec des responsables politiques (sénateurs, représentants) et des industriels pour promouvoir ces différentes technologies.

A titre d'exemple, le 3 mars 2020, le *Global CCS Institute* réunissait plus de 150 experts de la thématique à Washington, D.C. La rencontre a permis à des industriels, entrepreneurs, financiers, chercheurs, juristes et leaders d'opinion d'échanger sur les enjeux du développement d'une industrie CCUS aux États-Unis. Les différents intervenants sont convenus de la nécessité de constituer une "coalition d'acteurs" qui fédère les scientifiques, les financiers, les industriels, les gouvernements sans oublier la question du soutien des citoyens, ceci afin de structurer une filière pour le déploiement de technologies innovantes mais également de mobiliser des investisseurs motivés par des risques économiques limités.

Depuis mars 2021, l'*American Petroleum Institute*, plus gros lobby pétrolier du monde, milite pour l'instauration d'un prix du carbone⁸. L'objectif serait de faciliter l'atteinte des seuils de rentabilité au sein de la filière CCUS.

3. L'intérêt d'analyser les initiatives américaines

3.1. L'importance stratégique pour la France de suivre l'évolution des initiatives américaines et les projets d'interventions sur le climat

Depuis deux années, les services de l'Ambassade de France ont observé un lobbying très important à Washington, D.C., et l'implication de grands groupes industriels, visant à promouvoir les techniques de captage, de stockage ou d'utilisation du CO₂ (CCUS). En revanche, les « solutions écologiques fondées sur la nature » (*Nature-Based Solutions*, NBS) telles que l'afforestation, l'augmentation de la capacité d'absorption des sols ou l'utilisation des zones humides ne bénéficient pas d'un soutien structuré à l'échelle fédérale. Enfin, les techniques de modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management*, SRM) suscitent un débat vif quant aux risques environnementaux encourus.

Face à ces initiatives aux États-Unis et la perspective des grands rendez-vous internationaux à venir (CBD COP 15 à Kunming ; CCNUCC COP 26 à Glasgow), le Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis a pris l'initiative de mobiliser cinq experts français afin de réaliser

8 <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2021/03/25/carbon-tax-biden/>

un état des lieux des initiatives américaines pour capter, utiliser ou stocker le CO₂, générer des « émissions négatives » ou réfléchir le rayonnement solaire incident à l'échelle de la planète.

3.2. Définition et périmètre du rapport

Ce rapport a pour objectif de réaliser un état des lieux non-exhaustif et une comparaison des politiques de recherche et des investissements en cours aux États-Unis pour développer des nouvelles approches visant à lutter contre le changement climatique. Le périmètre du rapport est relativement large dans la mesure où il traite à la fois d'un portefeuille de nouvelles solutions visant à réduire et éliminer les émissions anthropiques de CO₂ telle que les technologies de captage, utilisation et stockage du CO₂, des approches de restauration de l'environnement ou des techniques non-conventionnelles telle que l'injection d'aérosols réfléchissants dans l'atmosphère (Figure 3).

Ce périmètre a pour objectif de mettre côte à côte des techniques bien établies et incluses dans les trajectoires d'atténuation compatibles avec des niveaux de réchauffement de 1,5°C ou 2°C et des approches non-conventionnelles, étudiées dans la communauté académique mais ne faisant pas partie du portefeuille de solutions utilisées dans les scénarios évalués par le GIEC.

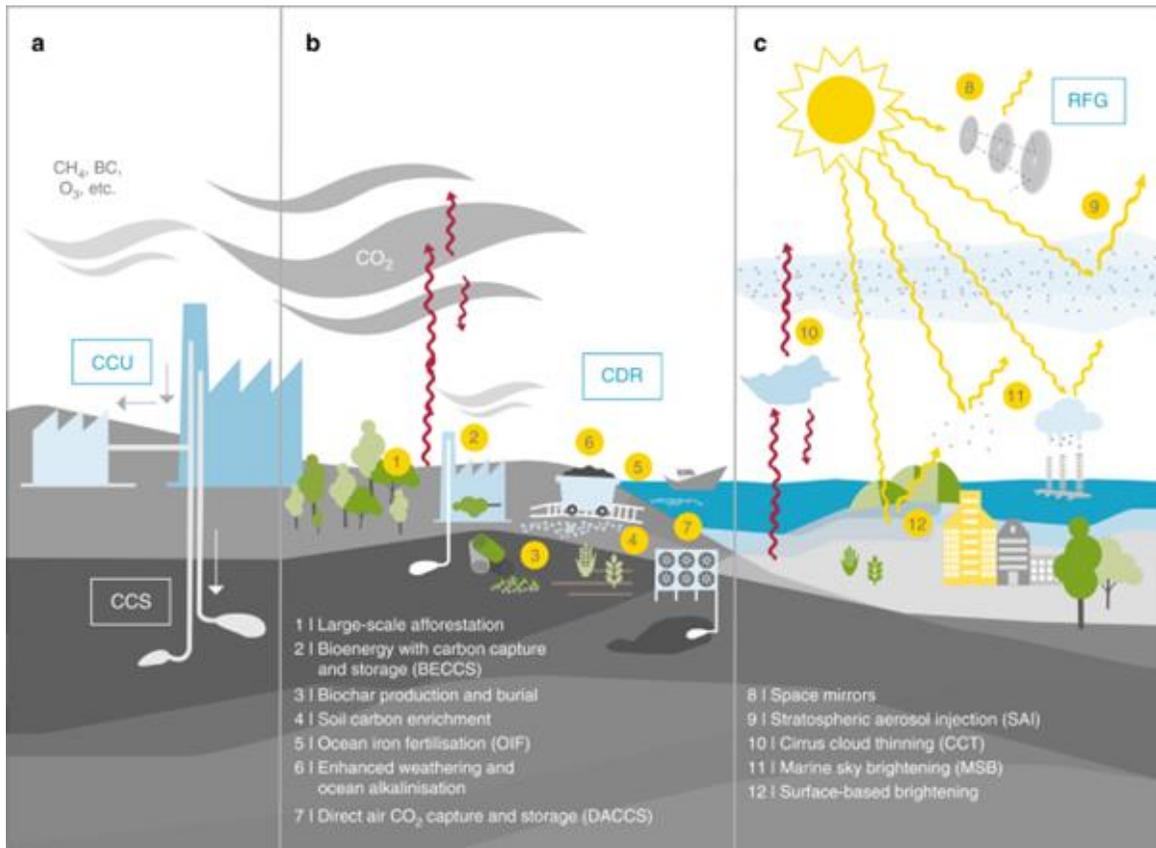


Figure 3 - Schéma conceptuel des différentes approches d'intervention climatique discutées dans ce rapport, allant de (a) techniques de captage, utilisation et stockage de carbone, (b) technique de retrait de carbone de l'atmosphère ou approches basées sur la nature et (c) approches non-conventionnelles basées sur la modification du rayonnement solaire. Cette Figure est issue de Lawrence et al. (2018). Des différentes approches présentées sur cette figure, seules les approches 5, 6, 8 et 12 ne sont pas discutées dans le présent rapport. Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H. et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of Paris Agreement temperature goals. Nat Commun 9, 3734 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>

Nous montrerons que si les premières disposent généralement d'un bon substrat de développement avec les marchés carbone et les subventions nationales ou régionales en lien avec l'accomplissement des Objectifs de Développement Durable (ODD), ce n'est pas le cas pour les secondes. Ces dernières techniques, sujettes à controverses, ne bénéficient pas de réelles structures de gouvernance à l'échelle internationale. Toutefois, plusieurs structures (ONG, Académie des Sciences américaine) plaident pour la mise en place d'une vraie structure de gouvernance internationale pour faire progresser la recherche sur ces approches non-conventionnelles visant à lutter contre le changement climatique.

Suivre l'évolution de la terminologie des « interventions » sur le climat est un défi. Le champ couvert par un terme peut changer du fait de l'évolution des connaissances. De plus, certaines communautés peuvent utiliser les mêmes termes pour désigner des champs d'interventions différents. La situation se complique encore avec l'utilisation des termes de manière parfois très approximative dans les médias. La terminologie du rapport tend à suivre celle du GIEC comme présentée dans le diagramme ci-dessous (Figure 4). Les approches 'Space mirrors' et 'Surface-based brightening' ne sont pas indiquées dans le diagramme car elles ne sont plus vraiment considérées. Notons que le CDR (Carbon Dioxide Removal) couvre des approches très différentes et que les contours de son champ peuvent varier dans la littérature. Le rapport se focalise sur le CCUS, NBS et SRM (en rouge sur Figure 4) car ce sont les approches les plus considérées aux Etats-Unis.

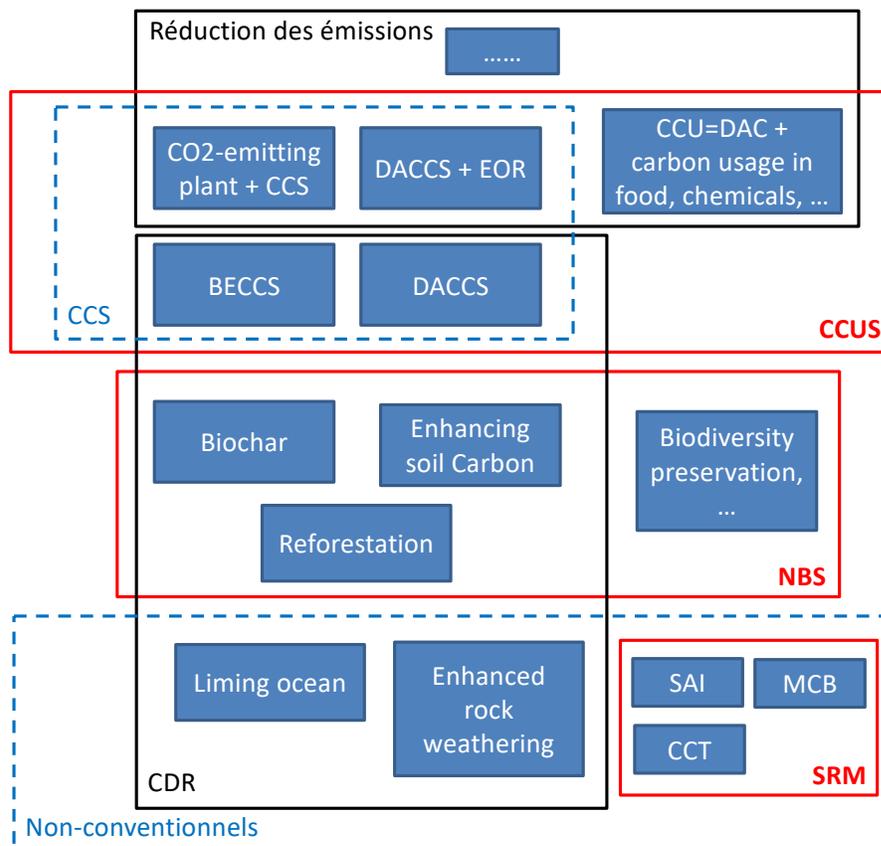


Figure 4 Les différentes catégories et sous-catégories des interventions sur le climat. Les cases en rouges indiquent les approches discutées dans le rapport.

Le périmètre du rapport est une opportunité pour motiver l'abandon du terme "géo-ingénierie" dans la mesure où ce mot valise englobe un spectre trop large de techniques et d'approches qui sont fondamentalement différentes. Ce positionnement est non seulement en accord avec la terminologie utilisée par les acteurs américains interviewés mais aussi en accord avec le consensus scientifique qui tend à clairement séparer les approches, avec d'une part les techniques d'élimination du CO₂, y compris les solutions fondées sur la nature, et d'autre part les techniques non-conventionnelles qui ne sont pas incluses dans les trajectoires d'atténuation évaluées par le GIEC.

Il est à noter que nous utilisons dans ce rapport le terme de NBS pour décrire les méthodes de séquestration de carbone dans les écosystèmes car c'est le terme largement utilisé aux États-Unis. Cependant il ne fait pas consensus au niveau mondial (et en France en particulier). En effet la définition qu'en donne l'IUCN (International Union for Conservation of Nature) est plus large puisque les NBS incluent « *les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité* ». Or les méthodes proposées pour la séquestration peuvent être source d'effets indésirables sur la biodiversité ou de bien être humain. On constate donc une vision très différente de la notion des solutions basées sur la nature qui aux États-Unis décrit simplement une méthode permettant de rendre un service écosystémique donné alors qu'il désigne, En Europe la définition beaucoup plus stricte de IUCN qui doit inclure un bénéfice pour la biodiversité et le bien être humain.

3.2. L'évolution du vocabulaire concernant les techniques d'intervention climatique dites non-conventionnelles

Dans le paysage des techniques non-conventionnelles, on peut compter des technologies d'intervention climatique (*climate intervention*) qui visent à refroidir le climat artificiellement en modifiant le bilan radiatif de la planète ou en favorisant les puits de carbone. Ces techniques sont très diverses et sont étudiées par la communauté scientifique aux États-Unis et dans le monde au cas où les politiques de réduction des émissions s'avèrent être insuffisantes. L'évolution de la terminologie associée à la « géo-ingénierie », « d'ingénierie climatique » à « intervention climatique » non-conventionnelle est principalement guidée par la reconnaissance de la communauté scientifique des incertitudes entourant ce type d'approches et des impacts qu'elles pourraient engendrer. Les États-Unis sont bien présents sur ce domaine mais l'activité reste essentiellement limitée à la recherche académique, avec relativement peu de financements publics mais quelques financements de type philanthropique. Les ONG et les sociétés savantes se sont positionnées sur la question des technologies d'intervention climatique et le besoin ou non de mener une activité de R&D et pointent un manque de cadre légal autour des méthodes d'intervention climatique non-conventionnelles. Mais celles-ci ne sont pas vraiment discutées dans la sphère politique ou industrielle, à la différence des techniques CCUS.

3.3. La méthode de travail

Ce rapport part d'une analyse de la littérature scientifique et technico-économique, des publications professionnelles et des journaux spécialisés aux États-Unis. Les premières conclusions ont été confrontées aux données récentes et affinées à la suite de discussions avec plus d'une quarantaine d'experts américains rencontrés lors de 25 réunions virtuelles organisées du 1^{er} au 17 mars 2021. Le panel très diversifié d'acteurs américains consultés (chercheurs, décideurs, influenceurs, ONG, industriels, entrepreneurs, spécialistes des politiques publiques, etc.) a permis d'établir un état des lieux des

programmes de recherche et de développement, du déploiement de certaines technologies, des financements disponibles, des évolutions législatives en cours et à venir mais aussi de la gestion des enjeux sociétaux. La liste des entretiens et des experts rencontrés est disponible en Annexe 1.

3.4. Impact attendu du rapport

Le rapport dresse un état des lieux et analyse les politiques de recherche et des investissements en cours pour développer des technologies sophistiquées de captage du carbone pour son stockage ou son utilisation, en comparaison aux approches plus écologiques qui utilisent la nature ou encore des techniques de modification du rayonnement solaire. Une bonne connaissance des orientations, des priorités et de la stratégie américaine peut alimenter la réflexion des acteurs et des instances françaises qui doivent programmer leurs actions et les financements de recherche pour les années à venir.

Par ailleurs, les interventions sur le climat, dont la modification du rayonnement solaire, sont des approches globales qui nécessiteront une coordination, voire une gouvernance internationale en cas de déploiement, tout comme pour les activités de recherche plus fondamentales. Une bonne connaissance des positions américaines facilitera la préparation côté français des éventuelles négociations à venir dans ce domaine. Ce rapport peut aussi venir informer les programmes français en R&D sur ces sujets.

TECHNIQUES DE CAPTAGE, STOCKAGE ET UTILISATION DU DIOXYDE DE CARBONE

1. Descriptif et éléments de contexte

1.1. La chaîne de valeur du Captage, Utilisation ou Stockage du CO₂

Le Captage, Stockage et Utilisation du CO₂ (*Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS*) est identifiée comme étant une option importante de réduction des émissions de CO₂ d'origine anthropique. Cette technologie consiste à capter le CO₂ émis plutôt par des sources industrielles ponctuelles et de grand volume, le purifier et le conditionner puis le transporter, et l'injecter dans des formations souterraines profondes pour le stocker de façon permanente. Une alternative au stockage est l'utilisation (ou la valorisation) du CO₂ pour la fabrication de produits à valeur ajoutée.

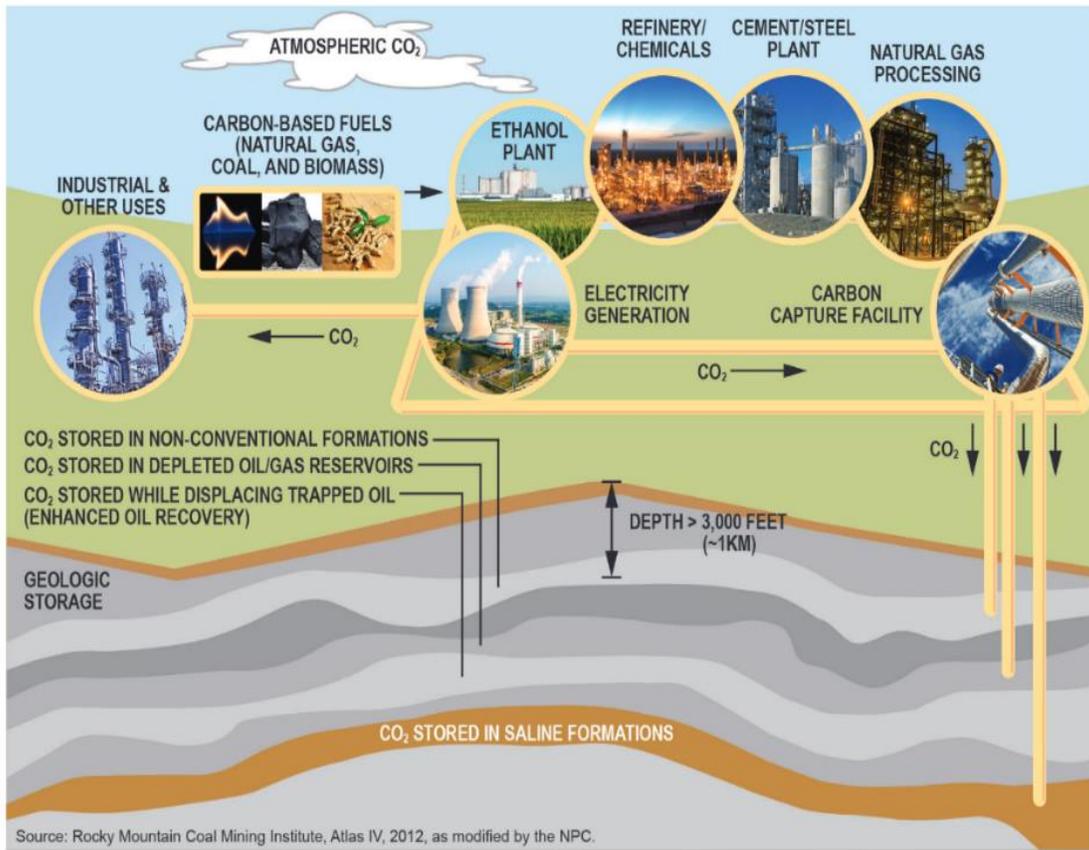
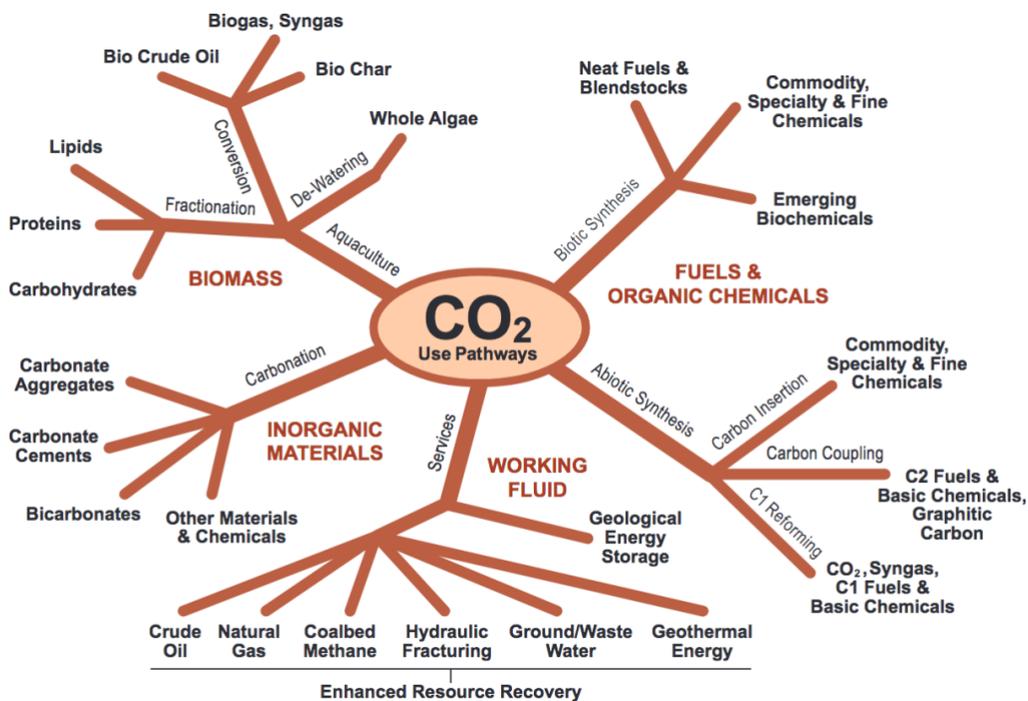


Figure 5 - Chaîne de valeur du Captage et du Stockage du CO₂

Les sources habituellement considérées sont les centrales thermiques fonctionnant au charbon ou au gaz naturel, les usines de production ou de transformation comme les cimenteries, les aciéries, les usines de traitement du gaz et les raffineries, les usines chimiques ou celle de production de biocarburants comme l'éthanol. Les technologies de captage varient en fonction des caractéristiques de la source (solvants, sorbants, membranes, etc.). Le transport du CO₂ se fait par canalisation ou par bateau. Les

formations géologiques visées pour le stockage sont surtout les réservoirs de pétrole ou de gaz déplétés (ayant été exploités), ou des aquifères salins profonds, habituellement situés à des profondeurs suffisamment grandes (supérieures au km) pour que le CO₂ puisse y être stocké dans un état suffisamment dense. Ces conditions géologiques sont choisies pour piéger le CO₂ de façon permanente, de par leur structure (piégeage structural), les propriétés d'écoulement (piégeage en phase résiduelle), ou grâce aux interactions du CO₂ avec les fluides ou la roche (piégeage par dissolution ou par minéralisation). La figure ci-dessous présente un schéma simplifié de la chaîne de valeur du Captage et du Stockage de CO₂ :

Comme mentionné ci-dessus, une alternative au stockage de CO₂ est son utilisation selon différentes voies technologiques présentées dans la figure ci-dessous. En termes de flux, la principale voie d'exploitation du CO₂ émis est la récupération assistée de ressources énergétiques, en particulier de pétrole (*Enhanced Oil Recovery* ou EOR). Viennent ensuite la production de produits chimiques, de carburants de synthèse, ou de matériaux divers, par exemple des matériaux de construction, des bio-produits à partir d'algues ou simplement du carbone solide (nano-tubes).



Source: JM Energy Consulting, Inc, 2019.

Figure 6 - Les voies possibles pour l'utilisation du CO₂. Source : JM Energy Consulting, Inc. 2019

Selon la source du CO₂ (industrielle ou issue de la biomasse ou de l'atmosphère) et la finalité (stockage ou utilisation), le CCUS peut être une simple technique de réduction des émissions industrielles ou peut conduire à une réduction de la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère s'il est stocké de façon permanente (aussi appelé émission négative).

1.2. Les émissions stationnaires nationales

En 2017 aux États-Unis, les émissions stationnaires de CO₂, donc susceptibles d'être captées, s'élevaient à 2,6 Gt CO₂/an, provenant pour près des deux tiers de la production d'électricité à partir du charbon et du gaz naturel (centrales thermiques au charbon ou au gaz) (Figure 7).

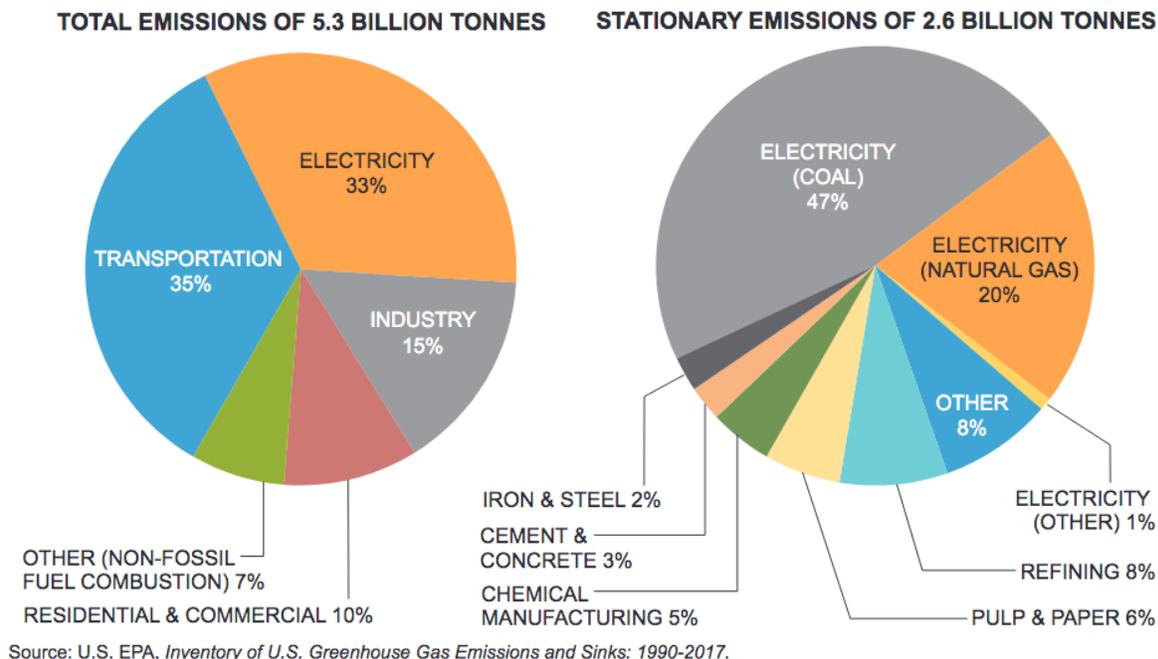


Figure 7 - Émissions de CO₂ par secteur (gauche) et émissions de CO₂ stationnaires par type d'industrie (droite) en GtCO₂/an.

2. État des lieux

Les États-Unis se positionnent comme les leaders mondiaux de la filière CCUS, dans une approche à la fois « *technology push* » (investissements massifs dans les activités de Recherche, Développement et Démonstration ou de *Research, Design and Development*, RD&D) et « *market pull* » (mise en place de mécanismes incitatifs – réglementations, aides publiques au financement – permettant d’assurer la viabilité économique des premiers projets).

Les États-Unis peuvent capitaliser sur une industrie pétrolière et gazière de classe-mondiale qui possède une expérience de plus de 40 ans d'utilisation du CO₂ pour la récupération assistée d’hydrocarbures, avec un total de plus de 600 MtCO₂ injectées et stockées, et environ 7 250 km de canalisations transportant le CO₂, essentiellement pour ces opérations. Jusqu’à présent, la plupart du CO₂ utilisé pour la récupération du pétrole vient de gisements naturels souterrains.

Les États-Unis ont mis en place il y a plus de 20 ans un programme de RD&D d’envergure, géré par le Département de l’Énergie (DOE), et impliquant l’industrie, les universités et les laboratoires nationaux. Les objectifs de ce programme sont de développer non seulement les technologies mais aussi les compétences scientifiques et techniques des différents acteurs du domaine, qu’ils soient privés et publics. Il a permis de financer la réalisation de nombreux projets pilotes et démonstrateurs, assurant la montée en maturité des technologies (augmentation du *technology readiness level*, TRL).

Ces premières réalisations effectives ont été l’occasion de mettre en place l’environnement réglementaire nécessaire au déploiement de la filière CCUS, avec par exemple, en 2010, la réglementation sur les puits d’injection de CO₂ (Classe VI) de l’*Environmental Protection Agency* (EPA), et les mécanismes financiers incitateurs (crédit d’impôt 45Q et *California Clean fuel Standard*).

Les résultats sont là puisque c'est aux États-Unis que l'on compte le plus de projets CCUS de taille commerciale en opération. Ce positionnement de leader leur permet de nouer de nombreux partenariats internationaux avec la plupart des pays engagés dans le développement et le déploiement de ces technologies.

2.1. Le socle industriel – l'industrie pétrolière et gazière

Les États-Unis sont le premier producteur de pétrole et de gaz naturel au monde, avec une production de pétrole attendue autour de 11,1 millions de barils par jour (Mb/j) en 2021, pour autant en baisse depuis 2019 (12,2 Mb/j), principalement en raison de la crise de la Covid-19. La production de gaz naturel a aussi subi les effets de la crise et est attendue en légère baisse, à 95,9 milliards de pieds cubes par jour en 2021.

La production de pétrole assistée par injection de CO₂ représente près de 6% de la production pétrolière américaine à terre, soit 350 000 barils par jour. Jusqu'à présent, la plupart du CO₂ utilisé pour la récupération assistée ne vient pas du captage mais de gisements naturels souterrains. Par conséquent, la majorité du CO₂ stocké de cette manière ne correspond pas à une réduction nette des émissions de CO₂.

La Société des Ingénieurs Pétroliers⁹, principale société professionnelle internationale du secteur, forte de 156 000 membres et basée à Houston, a mis en place en 2014 un groupe de travail dédié au CCUS pour s'assurer que cette technologie est correctement couverte dans tous ses programmes et pour fournir une expertise en ingénierie pour le développement des technologies, des normes et des réglementations associées. Le comité travaille au sein de cinq sous-groupes : événements, publications, normes, renforcement des capacités, relations avec d'autres organisations.

2.2. Les programmes de RD&D soutenus par l'État fédéral

Le Département de l'Énergie américain a lancé en 1997 un programme ambitieux de RD&D sur les différentes briques de la filière CCUS, pour un montant total investi de 4 Mds\$ entre l'année fiscale 2012 et 2018¹⁰. Ces 4 Mds\$ couvrent les financements de la R&D mais aussi les frais d'entretiens des installations, la recherche transversale sur le CO₂, les programmes annexes des centrales thermiques, la restauration environnementale des sites, etc. La recherche est effectuée au sein du *National Energy Technology Lab* (NETL) et administrée par le Département de l'Énergie.

Pour l'année fiscale 2021, les financements alloués par le DOE aux seuls programmes de R&D pour le CCUS ont connu une légère inflexion pour atteindre plus de 225 M\$ (voir Figure 9) cumulés sur les lignes budgétaires captage, stockage et utilisation. Le financement du programme sur l'utilisation de l'année 2021 s'établit à 23 M\$, plus du double de son niveau de 2018.

2.2.a) Captage

Le programme de RD&D sur les technologies de captage vise avant tout à réduire les coûts et les besoins énergétiques des solutions technologiques actuellement disponibles, avec pour objectif de les appliquer aux centrales thermiques et aux installations industrielles émettrices. Le but affiché est de

9 <https://www.spe.org/en/>

10 <https://fas.org/sgp/crs/misc/IF10589.pdf>

soutenir le secteur des combustibles fossiles et de maintenir le leadership américain dans les technologies de production d'électricité à partir du charbon à haut rendement et à faibles émissions (*High-Efficiency Low-Emissions*, HELE¹¹).

Les efforts de RD&D portent sur le développement de quatre technologies clés : les solvants, les matériaux sorbants, les membranes et les nouveaux concepts.

Ce programme comprend deux domaines de recherche, dédiés au captage postcombustion et précombustion, avec des projets allant de la conception de nouveaux matériaux à l'ingénierie conceptuelle, et à des essais pilotes de puissance équivalente à 25 MWe. Des recherches sont aussi menées sur les filières dites à « émissions négatives » et sur le captage du CO₂ dans l'air (*Direct Air Capture*, DAC) (voir ci-dessous).

2.2.b) Stockage

Les activités de RD&D sur le stockage ont été menées dans le cadre des différentes phases du programme « *Regional Carbon Sequestration Partnerships* » impliquant 40 États et 4 provinces canadiennes, maintenant prolongées par le programme CARBONSAFE (CARBON Storage Assurance Facility Enterprise). La phase 1 des partenariats régionaux a commencé en 2003 par une première étape de caractérisation du potentiel de stockage dans différentes formations géologiques (phase 1 dite de Caractérisation), suivi à partir de 2005 par la réalisation de 19 pilotes d'injection de petite échelle (phase 2 dite de Validation), et enfin par la réalisation, à partir de 2008, de 6 projets d'injection à grande échelle (au moins 1 million de tonnes de CO₂ injecté par projet - phase 3 dite de Développement). Ces différents projets ont permis d'établir les connaissances requises pour traiter notamment des enjeux de confinement (géologique et puits) et d'injectivité, de valider les modèles et les protocoles de monitoring de surveillance. Le programme CARBONSAFE a pour objet la réalisation d'un complexe de stockage (de plus de 50 millions de tonnes de CO₂ de capacité) - sa construction, sa mise en service et le suivi des opérations -, avec pour objectif de tester et de valider les différentes briques technologiques, les méthodologies opérationnelles (par exemple de gestion des risques) ainsi que la réglementation de l'*Environmental Protection Agency* (EPA).

2.2.c) Utilisation

Ce programme du DOE vise à étudier les voies de transformation du CO₂ en produits à valeur ajoutée, d'une manière efficace, économique et respectueuse de l'environnement. L'effort porte sur le développement de procédés avancés, de réacteurs et de catalyseurs, pour une conversion du CO₂ en carburants, produits chimiques, matériaux de construction, incluant systématiquement une analyse en cycle de vie pour s'assurer de la performance environnementale des différentes voies. Les recherches portent aussi sur l'utilisation du CO₂ pour la récupération assistée des ressources (par exemple, pétrole, gaz, eau et énergie géothermique), le stockage d'énergie, le traitement des eaux usées, etc.

Les niveaux de maturité des différentes technologies sont synthétisés dans la figure 8 ci-dessous :

11 <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-high-efficiency-low-emissions-coal-fired-power-generation>

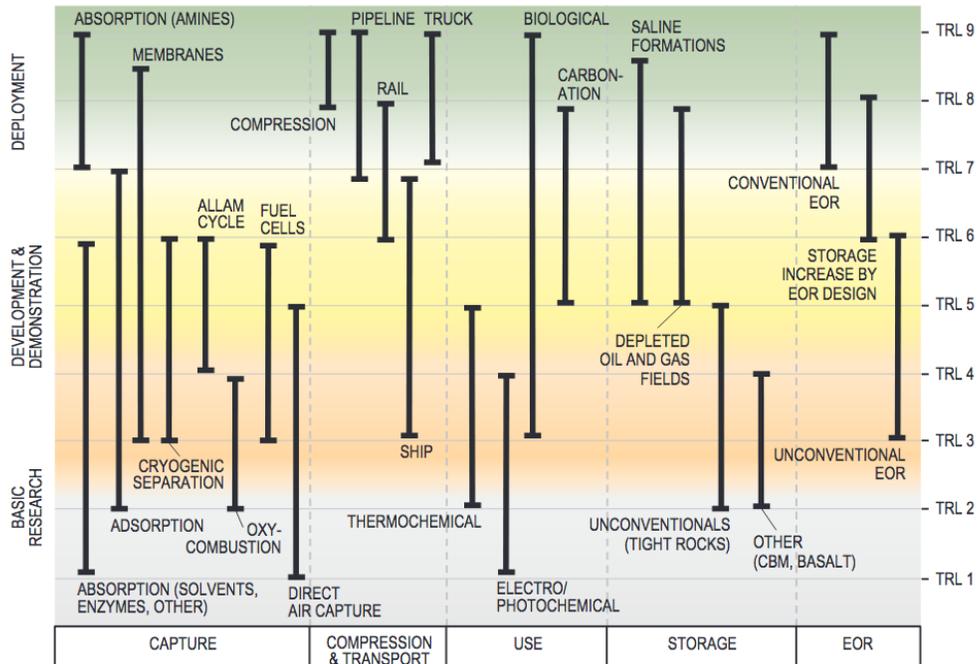


Figure 8 - Niveau de maturité (TRL) des technologies CCUS : Captage, compression et transport, utilisation, stockage et récupération assistée de ressources (source : Meeting the dual challenge – A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage, NPC)

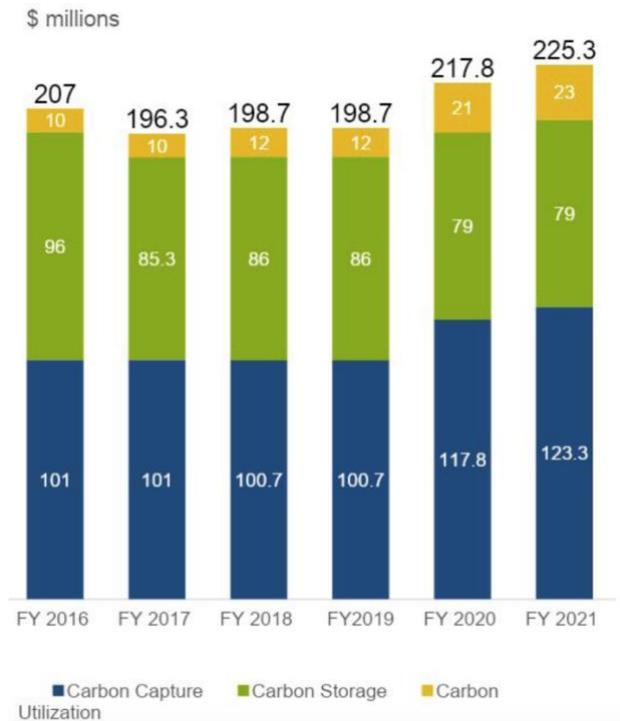


Figure 9 - Budget alloué par le DOE à la Recherche, Développement et Démonstration dans le domaine du CCUS, pour les programmes de Captage (bleu), Stockage (vert) et utilisation (jaune). Source : Department of Energy.

3. Des infrastructures de recherche dédiées

Le DOE a aussi financé la mise en place d'une infrastructure dédiée à la R&D sur le captage du CO₂ : le « *National Carbon Capture Center (NCCC)* », exploité par Southern Co. Services et hébergé à Plant Gaston, AL. Cette installation permet de tester des technologies de captage de CO₂ provenant de la combustion du charbon ou du gaz, ainsi que des dispositifs de captage dans l'air (DAC). Le DOE finance 80% des coûts opérationnels de cette installation.

Depuis 10 ans, ce centre a permis de tester plus de 30 technologies de captage en postcombustion, et plus de 20 en précombustion, totalisant plus de 100 000h de test. Cette infrastructure est ouverte aux projets des sociétés étrangères (par exemple Total).

4. Un intérêt croissant pour les émissions négatives

L'Académie des sciences américaine a publié en 2019 un rapport de référence sur les voies d'émissions négatives intitulé « *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda* », qui analyse 6 voies possibles, dont 4 entrent dans le périmètre du CCUS, et qui propose des programmes de RD&D pour chacune.

4.1. Bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS*)

Cette voie conduit en principe à un bilan négatif puisque le carbone capté lors de la photosynthèse est stocké et non pas relâché dans l'atmosphère. Deux voies sont habituellement considérées : 1) la production d'électricité et de chaleur par combustion de la biomasse dans les centrales thermiques et 2) la production de carburant par fermentation, avec dans les deux cas captage et stockage géologique du CO₂.

Aucune des centrales à biomasse actuellement en opération (qui représentaient 1,5% de l'électricité totale produite soit 62 TWh en 2016) n'est dotée d'un système de Captage et de Stockage de CO₂. Une seule usine produisant de l'éthanol, appartenant à *Archer Daniels Midland* et située à Decatur, IL, injecte une fraction du CO₂ pur produit par le procédé de fermentation dans un aquifère de très grand volume, le Mont Simon Sandstone, presque directement sous l'usine.

Les travaux de recherche portent sur l'évaluation de la ressource et les conséquences de son utilisation, sur la co-combustion, sur l'adaptation des technologies de captage, la gazéification, les économies d'échelle. Le rapport de l'Académie des sciences évalue le potentiel d'émissions négatives par l'usage de la biomasse entre 500 et 1,500 MtCO₂/an, fonction des quantités de sous-produits agricoles et de résidus d'exploitation forestières disponibles, et de la mise en place ou non de cultures énergétiques dédiées à cet usage.

4.2. Captage direct du CO₂ dans l'air (*Direct Air Capture, DAC*)

L'intérêt du captage direct du CO₂ réside dans la possibilité d'installer le système de captage proche de la zone de stockage et/ou du système de production d'énergie, minimisant les besoins en transport et le coût associé. Le principal problème est la concentration du CO₂ dans l'air (0,04%), environ 300 fois plus faible que dans les gaz de cheminée d'une centrale à charbon, ce qui augmente significativement les coûts de CO₂ éliminé (net), estimés entre 89 et 877 \$/tCO₂ en utilisant des sorbants,

et entre 156 et 506 \$/tCO₂ en utilisant des solvants. Ces coûts sont principalement fonction des vecteurs énergétiques choisis pour générer l'électricité et la chaleur requise. Le coût du DAC et sa pertinence comme technologie d'émissions négatives, hors utilisation pour la récupération assistée d'hydrocarbures, sont encore incertains et sujet à controverse.

Cependant, plusieurs compagnies travaillent au développement et à la commercialisation de tels systèmes, les plus avancées étant *Carbon Engineering* (Canada), *Climeworks* (Suisse) et *Global Thermostat* (États-Unis), avec des installations pilotes captant de quelques centaines à 1 000 tCO₂/an. Toutes ces sociétés utilisent des systèmes de captage basés sur des sorbants solides, à l'exception de *Carbon Engineering* qui utilise un solvant liquide, qui requiert une température de chauffe beaucoup plus élevée, fournie par combustion du gaz naturel. La figure ci-dessous présente un schéma conceptuel d'un tel dispositif :

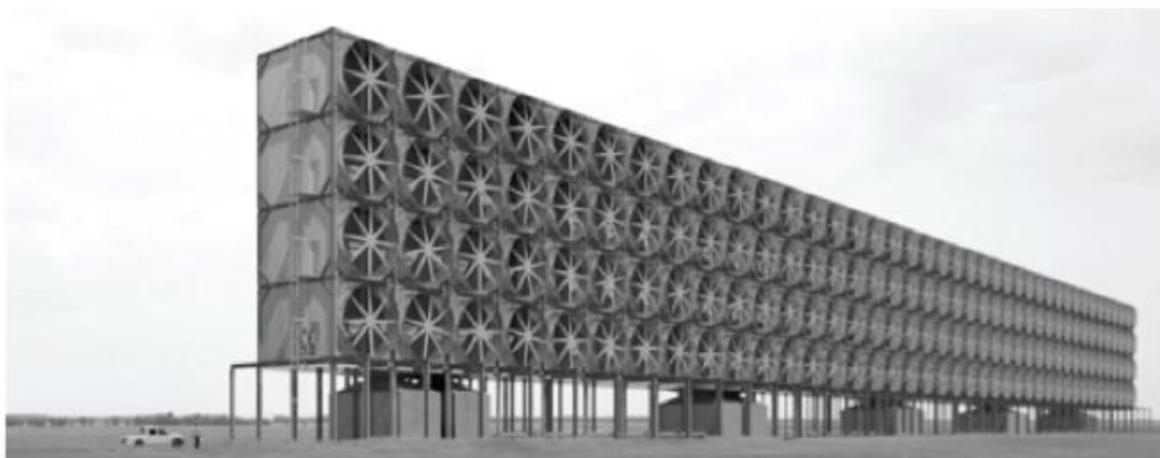


Figure 10 - Schéma conceptuel d'un dispositif de captage direct de CO₂ dans l'air utilisant un solvant liquide (source Holmes et Keith, 2012)

Quatorze projets de R&D sont en cours, visant à développer de nouveaux matériaux pour faciliter l'extraction du CO₂ (solvants / sorbants), actuellement testés à l'échelle du laboratoire, et à améliorer l'intégration système des différents composants, se focalisant sur l'utilisation d'énergie renouvelable. Quatre projets conduisent des essais intégrés sur le terrain. 2021 verra de nouvelles opportunités de financement, avec un objectif de montée en volume (100 000 tCO₂/an capté) et à terme un objectif affiché de démonstration d'un coût de captage de 100 \$/tCO₂. La priorité est donc mise sur le développement de la technologie et l'amélioration de l'efficacité. Ainsi l'Académie des Sciences recommande dans son rapport de 2019 le soutien financier suivant (Figure 11), fonction des efforts (Recherche, Développement, Démonstration et Déploiement).

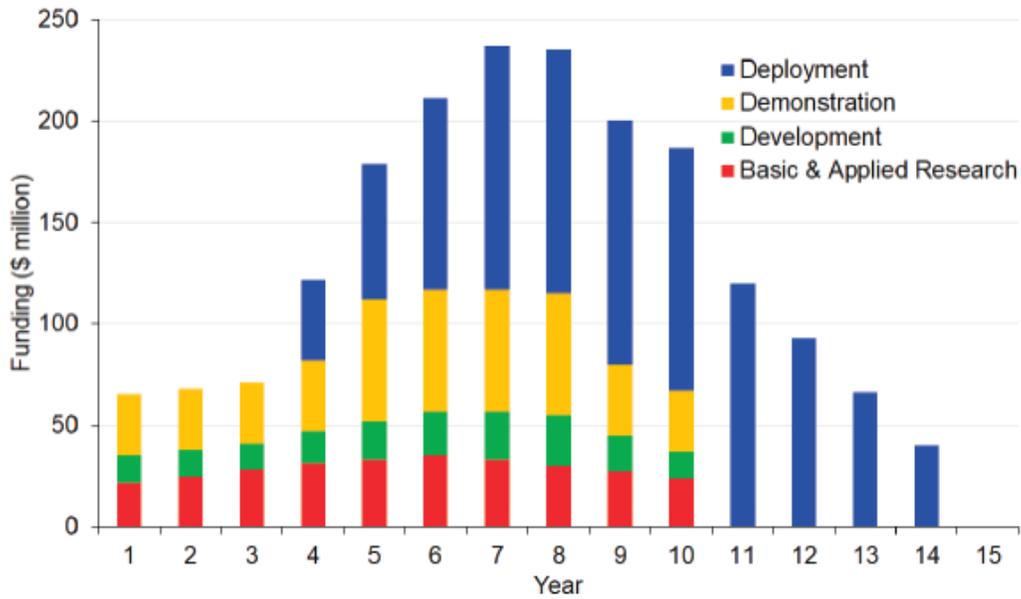


Figure 11 - Allocations annuelles de financement fédérales américaines recommandées par l'Académie des Sciences pour la recherche, le développement, la démonstration et le déploiement de la technologie de captage direct du CO₂ dans l'air.

Notons l'ambition de la société *Occidental* de construire dans les toutes prochaines années une installation de captage d'1 MtCO₂/an, avec utilisation du CO₂ pour la récupération assistée d'hydrocarbures, opération présentée comme rentable avec les aides actuellement disponibles (45Q et CLCFS – voir ci-dessous).

	Climeworks	Global Thermostat	Carbon Engineering
Localisation	Suisse	Etats-Unis	Canada
Type de technologie	Sorbant solide	Sorbant solide	Solvant liquide
Température de fonctionnement	80-120°C	80-100°C	900°C
Source d'énergie thermique	Non-fossile (géothermie, chaleur perdue, etc.)	Pas de spécificité	Gaz naturel équipé de CCS
Projets	Applications commerciales avec 16 usines dans le monde, capacité collective de 2 000 t de CO ₂ /an.	Usine pilote en Oklahoma et Colorado	Usine basée en Colombie-Britannique ; construction en cours d'une usine à l'échelle sur le bassin Permien qui pourrait retirer 1 Mt CO ₂ /an.
Investissements	170 M\$ en capital-risque depuis 2009, 110 M\$ lors du dernier tour de table en 2020	Partenariat avec Exxon Mobil, NRG, BASF Investisseurs : Zero-Carbon Partners, Goldman Sachs et autres.	Dernier tour de table à 69 M\$ en 2019. Investisseurs : BHP, Chevron, Bill Gates, Oxy Low Carbon Ventures, et autres.

Tableau 1 - Comparatif des dispositifs DAC (source : World Resources Institute).

De 2015 à 2020, les annonces publiques de financement des capitaux-risqueurs pour les projets de captage direct dans l'air totalisaient 280 M\$ dans le monde.¹²

5. La dynamique de déploiement

5.1. De nombreux projets en opération

Sur les 19 projets CCUS de taille industrielle en opération dans le monde, 10 sont aux États-Unis, correspondant à 25 MtCO₂/an utilisé ou stocké, sur un total de 32 MtCO₂ au niveau mondial. Le CO₂ provient du traitement du gaz naturel (17 Mt), de la production de méthane de synthèse (3 Mt), d'engrais (2 Mt), de la production d'éthanol (1 Mt) ou d'hydrogène (1 Mt), et d'une centrale thermique au charbon (1 Mt). Sur ces 10 projets, 6 sont économiquement viables dans les conditions de marché actuelles (principalement grâce à la demande en CO₂ pour la récupération assistée de pétrole), compte tenu du crédit d'impôt 45Q ; les 4 autres ont besoin de soutiens financiers complémentaires.

Parmi les projets emblématiques, citons :

- Le projet d'*Air Product et Chemicals Inc.* à la raffinerie de pétrole *Valero* à Port Arthur, TX, où le CO₂ émis par deux installations de reformage de méthane (pour la production d'hydrogène) est capté puis transporté par canalisation vers les champs pétroliers de l'est du Texas pour la récupération assistée (EOR). Au total, 6,7 MtCO₂ ont été captées, transportées et utilisées depuis mars 2013.
- Le projet *Petra Nova CCS*, à Thompsons, TX, est opéré par une Joint-venture entre *NRG Energy, Inc.* et *JX Nippon Oil and Gas Exploration*. L'objectif est de démontrer la technologie de captage de *Mitsubishi Heavy Industries* avec pour objectif de capter 90% du CO₂ (1,4 MtCO₂/an) émis par une centrale à charbon. Ce CO₂ est ensuite utilisé pour la récupération assistée dans le champ pétrolier de West Ranch. Au total, c'est près de 3,4 MtCO₂ qui ont été utilisées et stockées. Les objectifs de démonstration sont considérés comme atteints et les opérations ont été suspendues suite à la baisse des prix du pétrole.
- Le projet d'*Archer Daniels Midland (ADM)* à Decatur, IL, où le CO₂ provenant de la production de biocarburants (éthanol) par fermentation à partir du maïs, est capté et stocké dans un réservoir salin profond (Mont Simon Sandstone). Ce projet de stockage, réalisé avec le soutien du bureau géologique de l'Illinois, a permis de tester la réglementation mise en place par l'EPA concernant les puits d'injection de classe VI, spécifiques au stockage de CO₂. 2,1 MtCO₂ ont été stockées depuis avril 2017. Il est à noter que le crédit d'impôt 45-Q est plus élevé que dans le cadre de l'EOR.

12 <https://members.luxresearchinc.com/research/report/35957>

5.2. Un écosystème qui évolue

5.2.a) Le positionnement des pétroliers

Parmi les « majors », *Exxon Mobil* se présente comme le leader du captage du carbone, avec une capacité actuelle de captage d'environ 9 MtCO₂/an. Le 1er février 2021, l'entreprise a annoncé la création d'une nouvelle filiale - *Exxon Mobil Low Carbon Solutions* - pour commercialiser et déployer des technologies de réduction des émissions, se concentrant dans un premier temps sur le captage et le stockage du CO₂.

Notons aussi l'engagement d'*Occidental*, une société internationale ayant des actifs aux États-Unis, au Moyen-Orient, en Afrique et en Amérique latine, qui a créé une filiale appelée *Oxy Low Carbon Ventures*¹³, LLC (OLCV), dédiée à la réduction des émissions de GES. OLCV se concentre sur le développement de technologies de pointe et de solutions commerciales à faible émission de carbone, avec pour premier objectif de réduire les émissions de GES liées aux activités d'*Occidental*. OLCV investit également dans le développement de carburants et de produits à faible émission de carbone, et propose des services commerciaux aux projets de captage et de stockage du CO₂ partout dans le monde. *Occidental* et sa filiale OLCV se positionnent ainsi à la fois comme opérateur et comme société de service.

5.2.b) L'émergence de nombreuses start-ups pour l'utilisation du CO₂

L'agence *Lux Research* estime que le marché mondial de l'utilisation du carbone pourrait atteindre 70 Mds\$ en 2030, tiré principalement par le marché des matériaux de construction.¹⁴ Comme ce secteur de fabrication de produits à forte valeur ajoutée présente un intérêt économique important, il attire de nombreux investisseurs. Néanmoins, l'utilisation du CO₂ ne peut concerner de petits volumes par rapport aux volumes en jeu dans la problématique du changement climatique. De plus, la permanence du stockage est très variable selon le produit final et l'utilisation qui en est faite.

Cemvita factory¹⁵

Cemvita Factory cherche à développer des solutions utilisant le CO₂ ou le méthane comme matière première pour fabriquer par voie biologique des produits à valeur ajoutée tels que des molécules de base utilisées comme intermédiaires chimiques et des polymères. La société privilégie les voies qui piègent le carbone et ont un bilan carbone négatif. *Cemvita* s'intéresse aussi à la récupération assistée (par injection de CO₂ ou de microbes). Ils viennent d'annoncer un partenariat avec *Occidental* pour la réalisation d'un pilote (1 tCO₂/mois) de production de bioéthylène¹⁶.

Saratoga Energy¹⁷

Saratoga Energy a développé un procédé d'électrolyse du carbonate fondu pour convertir le dioxyde de carbone en nanotubes de carbone et en oxygène, ce dernier étant libéré dans l'atmosphère. Ce processus réduit considérablement les coûts de fabrication des nanotubes et, lorsqu'il est alimenté par

13 <https://www.oxylowcarbon.com/>

14 <https://www.luxresearchinc.com/press-releases/co2-utilization-will-be-a-550-billion-market-by-2040>

15 <https://www.cemvitafactory.com/>

16 <https://www.cemvitafactory.com/post/oxy-low-carbon-ventures-cemvita-factory>

17 <http://www.saratoga-energy.com/>

des énergies renouvelables, a un bilan carbone négatif. Ces nanotubes de carbone peuvent ensuite être utilisés pour améliorer la performance de nombreuses technologies (batteries, pneus...).

5.3. Un environnement réglementaire en place

Afin de soutenir le déploiement de cette nouvelle industrie, deux types de réglementation sont d'ores-et-déjà en place, qui concernent 1) la réalisation concrète de projets (réglementation technique), 2) la comptabilité des volumes de CO₂ captés et injectés (réglementation « fiscale »).

5.3.a) Réglementation technique

L'EPA réglemente l'EOR dans le cadre du programme de contrôle des injections souterraines (UIC Classe II¹⁸) du *Safe Drinking Water Act* (SDWA), créé en 1980¹⁹, puisque ces activités impliquent l'injection de fluides dans le sous-sol pour augmenter la production de pétrole.

L'EPA a par ailleurs publié une réglementation spécifique concernant le stockage de CO₂ en aquifère, qui est entrée en vigueur le 7 septembre 2011²⁰. Elle établit une nouvelle classe de puits (classe VI), spécifique aux puits d'injection de CO₂ et impose un certain nombre de conditions (critères techniques) visant à protéger les sources souterraines d'eau potable du stockage souterrain à long terme du CO₂. Les différentes obligations réglementaires portent sur les points suivants (en fonction des différentes phases de la vie d'un site) :

- Demande de permis
 - Caractérisation géologique du site ;
 - Zone d'impact (Area of Review - AOR) et actions correctives;
 - Responsabilité financière ;
- Construction du puits ;
- Opération ;
 - Test d'intégrité mécanique ;
 - Surveillance ;
- Abandon du puits ;
- Suivi post-injection ;
- Fermeture du site.

La réglementation concernant le stockage offshore est peu développée, en raison de la complexité juridique. Celle concernant les pipelines de transport de CO₂ et autres infrastructures de surface est en place (développée dans le cadre des opérations de récupération assistée).

Notons que des réglementations spécifiques ont été mises en place dans certains États dans le cadre de leurs programmes d'incitation. Ainsi les projets de captage et de stockage de CO₂ (ou d'EOR) doivent

18 <https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells>

19 <https://www.cleanwaterfund.org/publications/EOR-risks>

20 Le paragraphe qui suit résume l'information disponible sur le site de l'EPA concernant la réglementation des puits injecteurs de CO₂ (classe VI) « *Federal Requirements Under the Underground Injection Control (UIC) Program for Carbon Dioxide (CO₂) Geologic Sequestration (GS) Wells Final Rule* », disponible à <https://www.epa.gov/uic/federal-requirements-under-underground-injection-control-uic-program-carbon-dioxide-co2-geologic>

suivre un protocole spécifique pour être éligibles aux subventions accessibles dans le cadre du *California Low-Carbon Fuel Standard* (*California Air Resources Board*, 2018)

5.3.b) Une réglementation « fiscale » qui facilite le suivi des émissions captées²¹

La procédure de déclaration des gaz à effet de serre (*Greenhouse Gas Reporting Program*, GHGRP) de l'EPA recueille des informations clés concernant le captage, la fourniture et l'injection souterraine de CO₂ aux États-Unis.

- Les fournisseurs de CO₂ (sous-partie PP²²) incluent les installations qui captent le CO₂ à partir de sources et de procédés industriels ou qui l'exploitent à partir de réservoirs naturels pour approvisionner certains secteurs de l'économie ;
- La procédure concernant l'injection souterraine de CO₂ (sous-partie UU²³) couvre les installations qui injectent du CO₂ sous terre pour la récupération assistée du pétrole et du gaz, l'injection et l'élimination de gaz acides, la recherche et le développement (R&D) sur le stockage du carbone, ou à toute autre fin autre que le stockage géologique.
- Cette procédure concerne le stockage géologique du CO₂ (sous-partie RR²⁴) et fournit un mécanisme permettant aux installations de surveiller et d'informer l'EPA sur les quantités de CO₂ stockées. Les installations soumettent un plan de « surveillance, déclaration et vérification » du CO₂ stocké sous terre. Une fois le plan approuvé, elles communiquent des informations sur le CO₂ reçu pour injection, les quantités de CO₂ stockées et les activités de surveillance annuelles. L'EPA a approuvé le premier plan en décembre 2015 et les données sont maintenant disponibles depuis 2016. On trouve ainsi pour 2019 :

Captage et fourniture de CO₂	Quantité (MtCO₂)	Nombre de sources
Quantité totale de CO ₂ capté et produit	61,3	122
CO ₂ capté de sources industrielles	22,3	110
CO ₂ produit de sources naturelles ²⁵	39	12
Injection souterraine de CO₂	Quantité (MtCO₂)	Nombre de sites
Quantité totale de CO ₂ reçue pour injection sous terre	49,3	93

21 Le paragraphe qui suit résume l'information disponible sur le site de l'EPA concernant le « Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP) » : <https://www.epa.gov/ghgreporting/capture-supply-and-underground-injection-carbon-dioxide>

22 <https://www.epa.gov/ghgreporting/subpart-pp-suppliers-carbon-dioxide>

23 <https://www.epa.gov/ghgreporting/subpart-uu-injection-carbon-dioxide>

24 <https://www.epa.gov/ghgreporting/subpart-rr-geologic-sequestration-carbon-dioxide>

25 A partir de formations naturelles contenant du CO₂, à destination de consommateurs industriels, par exemple les réservoirs naturels de CO₂ comme le Bravo Dome au Nouveau Mexique, le Doe Canyon Deep et le McElmo Dome au Colorado, tous trois propriété de Kinder Morgan.

Quantité totale de CO ₂ reçue pour EOR ou EGR	48,7	64
Quantité de CO ₂ reçue pour injection / stockage de gaz acide, R&D sur le stockage de CO ₂ et autres	0,6	29

5.4. Des mécanismes financiers facilitateurs

Deux principaux mécanismes financiers ont été mis en place pour soutenir la réalisation des premiers projets : 1) au niveau fédéral le crédit d'impôt « 45-Q²⁶ » ; 2) au niveau des Etats différents « standards » comme le « *California Low-Carbon Fuel Standard*²⁷ », les « *Clean Electricity Standards* », ou le « Green Procurement ». Par ailleurs, de plus en plus de sociétés s'imposent d'elles-mêmes des objectifs de neutralité carbone à une échéance donnée.

5.4.a) Le dispositif de crédit d'impôt 45-Q.

Ce dispositif de crédit d'impôt a été mis en place en 2008 pour favoriser le déploiement des opérations de stockage de CO₂. Pour la première période allant de 2008 à 2018, le crédit d'impôt était de 20 \$/tCO₂ stocké dans un environnement géologique sécurisé, et de 10 \$/tCO₂ injecté pour la récupération assistée de pétrole (EOR) ou de gaz (EGR). Les crédits disponibles concernaient alors 75 MtCO₂ alors que seulement 35 MtCO₂ ont été réclamés. Ce système de crédits d'impôt a été révisé dans la loi budgétaire de février 2018. Une prolongation et évolution du dispositif est actuellement en cours de discussion au congrès.

Il a actuellement les caractéristiques suivantes :

- Le crédit est disponible pour les établissements qualifiés pour une période de 12 ans ;
- Les montants sont applicables pour les projets mis en service après la date de promulgation de la loi. Ils ont été réévalués à²⁸ :
 - 50 \$/tCO₂ pour un stockage géologique sécurisé, le crédit augmentant chaque année jusqu'à ce que la valeur totale soit atteinte en 2026 ;
 - 35 \$/tCO₂ pour l'EOR, l'EGR ou l'utilisation, le crédit augmentant chaque année jusqu'à ce que la valeur totale soit atteinte en 2026 ;
- Ce mécanisme s'applique aux oxydes de carbone (CO ou CO₂)
 - Captés à partir d'une source industrielle ou de l'air ambiant (DAC);
 - Mesurés au point de captage et vérifiés au point d'élimination / d'injection / d'utilisation ;
 - Sont exclus les gaz récupérés pendant le processus de récupération assistée.
- Les installations qualifiées sont celles dont :
 - La construction a commencé avant le 1er janvier 2024 ;
 - Les planification et conception originales incluent des équipements de captage du carbone ;
 - Les quantités de CO₂ captées ou utilisées sont supérieures à un seuil de 25 000 tCO₂ pour les installations émettant moins de 500 000 tCO₂ ; de 500 000 tCO₂ pour les centrales électriques.

26 <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/10/f67/Internal%20Revenue%20Code%20Tax%20Fact%20Sheet.pdf>

27 <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard>

28 <https://sgp.fas.org/crs/misc/IF11455.pdf>

- L'utilisation est éligible (photosynthèse ou synthèse chimique) à condition que les procédés aboutissent à la fabrication de produits pour lesquels il n'existe pas de débouchés commerciaux ;
- Le crédit peut être réclamé par le propriétaire de l'équipement de captage ou transféré à l'entité de stockage / d'utilisation qui peut le mettre en vente sur le marché ;

5.4.b) Le « California Low-Carbon Fuel Standard²⁹ »

Ce « standard » sur les carburants à faible teneur en carbone a été mise en place pour réduire l'intensité en carbone des carburants utilisés pour le transport en Californie, et fournir une gamme croissante d'alternatives renouvelables ou à faible émission de carbone, afin de réduire la dépendance au pétrole et améliorer la qualité de l'air.

Les projets de CCUS peuvent être situés n'importe où, mais le pétrole ou carburant qui est produit doit être consommé en Californie (les crédits ne seront émis que pour le carburant consommé en Californie). Les seules exceptions à l'octroi de crédits basés sur le carburant consommé en Californie sont les projets de captage direct dans l'air (DAC), qui stockent le CO₂ sous terre. Les projets DAC peuvent demander une certification « de permanence » quel que soit leur emplacement, et n'ont pas besoin de produire de carburant pour obtenir des crédits.

5.5. La feuille de route du *National Petroleum Council* (NPC)³⁰

En septembre 2017, le Secrétaire d'État à l'Énergie, Rick Perry, a demandé avis au *National Petroleum Council* sur le déploiement à l'échelle commerciale de la filière CCUS. En réponse à cette demande, une étude approfondie des différentes options technologiques a été réalisée, analysant leur niveau de maturité, la dynamique des différents marchés, les enjeux d'intégration et de déploiement d'infrastructures, les questions juridiques et réglementaires, les enjeux économiques et les besoins en financement, et enfin les impacts environnementaux et les enjeux d'acceptabilité. Ce travail a mobilisé plus de 300 participants venant de différentes organisations : industrie, recherche académique, organisations non-gouvernementales, administration, etc. Le rapport final a été remis le 12 décembre 2019 et s'intitule « *Meeting the dual challenge – A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage* ».

Le NPC propose une feuille de route en trois phases (Activation, Expansion, At-Scale) pour passer de la situation présente à 500 MtCO₂/an stocké à un horizon de 25 ans.

29 <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-09/basics-notes.pdf>

30 Le National Petroleum Council (NPC) est un comité consultatif à charte fédérale et financé par des fonds privés. Il a été créé par le Secrétaire d'État à l'Intérieur en 1946 à la demande du président Truman. Le but du NPC est uniquement de conseiller, d'informer et de faire des recommandations au Secrétaire d'État à l'Énergie en ce qui concerne toute question relative au pétrole et au gaz naturel ou aux industries pétrolières et gazières qui dépendent du Secrétaire d'État ou requièrent son approbation. Le NPC ne se préoccupe pas des pratiques commerciales et ne se livre à aucune des activités habituelles des associations professionnelles.

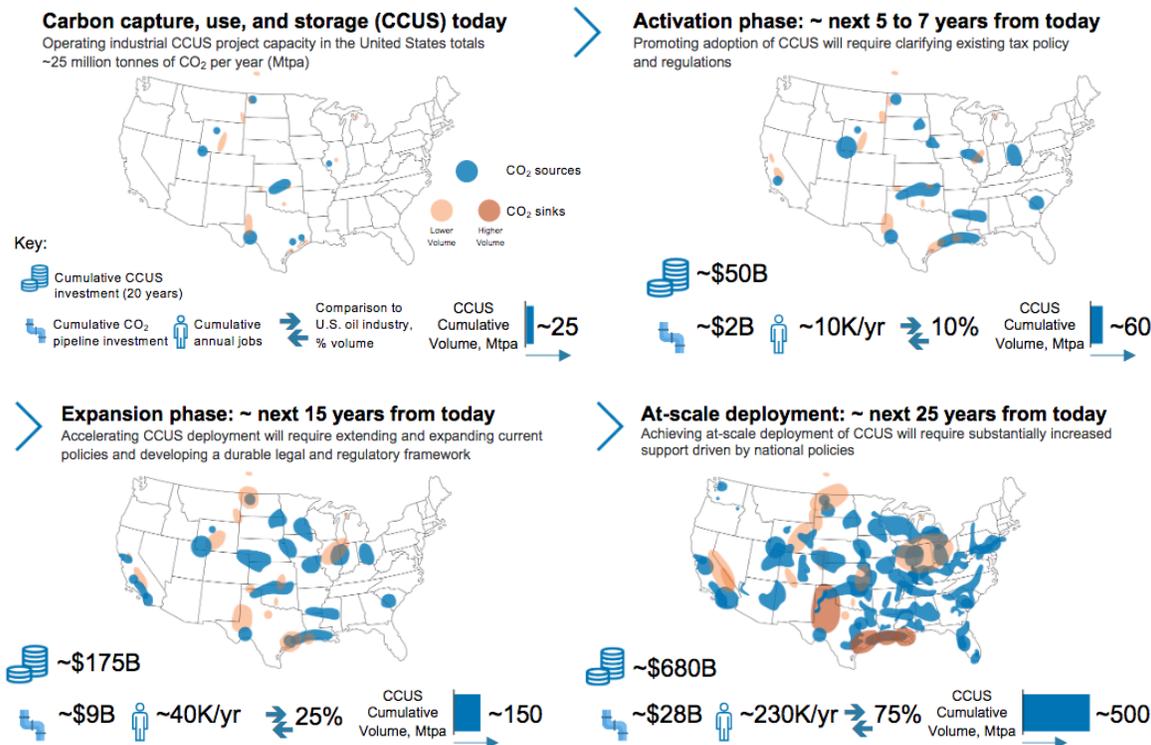


Figure 12 - Les trois phases proposées par le NPC, visant au déploiement à l'échelle du CCUS (Meeting the Dual Challenge - A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage, NPC).

Notons que l'objectif de 500 MtCO₂/an stockés dans 25 ans est jugé plutôt prudent par la plupart des personnes interviewées. Le potentiel de stockage géologique annuel étant évalué entre 3 000 et 8 600 GtCO₂ (valeurs médianes) par le service de géologie des États-Unis (USGS). Un volume de CO₂ stocké de 1 à 1,2 GtCO₂/an à l'horizon 2050 n'est pas jugé irréaliste par la plupart des acteurs.

L'utilisation du CO₂ pour la récupération assistée de pétrole est mise en avant pour plusieurs raisons : 1) c'est une technologie maîtrisée, avec une expérience opérationnelle de plus de 40 ans ; 2) la capacité de stockage est très importante, estimée entre 55 et 119 GtCO₂ (dans une version plutôt prudente dite « 2019 view ») et associée à une production additionnelle de pétrole de 84 à 181 Mds de barils, avec un potentiel de stockage à court terme de 150 à 200 MtCO₂/an ; 3) une partie des infrastructures, notamment de transport de CO₂ par pipeline sont déjà en place.

Pour atteindre ces objectifs globaux, le NPC demande au département du trésor, au département de l'intérieur, aux États et à l'EPA de clarifier un certain nombre de points concernant les politiques fiscales et la réglementation, mais surtout d'étendre et d'élargir les politiques incitatives actuelles, en particulier le crédit d'impôt 45Q. Un niveau d'aide de 110 \$/tCO₂ est recommandé pour la phase d'expansion. Le NPC plaide aussi pour l'augmentation des budgets de RD&D (publics et privés) pour améliorer la performance et réduire les coûts des technologies, recommandant l'établissement de partenariats public-privés et si possible, des approches « open source » pour le développement des technologies. Enfin, il est proposé que le gouvernement, l'industrie et les organisations impliquées dans la filière mettent en place des politiques et des dispositifs d'engagement des parties-prenantes pour faciliter les discussions sur le CCUS et son déploiement, dans un esprit d'ouverture, et renforcer la confiance dans la technologie et son potentiel pour réduire les émissions de CO₂.

Les niveaux d'investissement en RD&D demandés par le NPC sont donnés dans le tableau ci-dessous (programme sur 10 ans) :

Technologie	R&D et pilotes (M\$/an)	Démonstrateurs (M\$/an)	Total (M\$/an)
Captage (incluant les technologies à émissions négatives)	500	500	1 000
Stockage géologique	400	0	400
Stockage non conventionnel (incluant l'EOR)	50	0	50
Utilisation	50	0	50
Total	1 000		1 500

Tableau 2 - Niveaux d'investissement suggérés par le NPC

5.6. La vision des autres acteurs

Les briques technologiques des systèmes de captage de carbone (sources ponctuelles de volume et DAC) sont connues et maîtrisées, mais la question du déploiement industriel reste en suspens. Se pose aussi la question du financement des infrastructures de transport de CO₂, au cœur de la stratégie fédérale relative au CCUS visant à soutenir le déploiement de la filière, potentiellement adressée dans le plan infrastructure.

Concernant les DAC, l'optimisme de la réduction des coûts à 100\$/tCO₂ n'est pas partagé par tous les acteurs rencontrés. Certains d'entre eux alertent contre une sous-évaluation du coût de stockage de la tonne de carbone qui donnerait un signal trompeur aux administrations en charge de l'établissement des politiques publiques

5.7. Une réorientation progressive des financements fédéraux vers les technologies de captage direct dans l'air.

L'année 2020 marque un tournant du soutien fédéral vis-à-vis des technologies à émissions négatives. Jusqu'alors, les programmes de recherche fédéraux sur le CCUS se limitaient aux technologies de captage à partir de sources ponctuelles et de grandes volumes. Pour l'année fiscale 2022, le Département de l'Énergie, principal financeur de ces recherches, est pourvu d'une nouvelle ligne budgétaire *Carbon Dioxide Removal* distincte des programmes historiques *Carbon Capture* et alimentée à hauteur de 63 M\$.³¹ (Voir chapitre *Autres enjeux*)

5.8. Loi de programmation *Energy Act of 2020*

La loi de programmation *Energy Act of 2020*, votée le 28 décembre 2020 et dont les modalités d'application sont explicitées dans le chapitre F, autorise le Congrès à financer plusieurs lignes budgétaires du Département de l'Énergie. Le Titre 4 de l'*Energy Act* soutient le développement de la filière existante

31 <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11861>

de captage de carbone à la source et soutient l'amélioration des performances industrielles ainsi que le financement des infrastructures de transport de dioxyde de carbone. Le Titre 5 quant à lui va financer la recherche sur les technologies de captage de carbone atmosphérique dans les laboratoires nationaux.

5.8.a) Captage

Un programme pour le développement de technologies de captage vise à améliorer de manière significative l'efficacité, l'efficacité, le coût, la réduction des émissions et la performance environnementale **de l'utilisation du charbon et du gaz naturel**, notamment dans les installations manufacturières et industrielles. Il autorise et encourage également le soutien aux projets pilotes à grande échelle. Le niveau d'autorisation d'engagement de dépense de ce programme est de 4.71 Mds\$ sur 5 ans.

Activité	R&D (M\$)	Pilotes (M\$)	Démonstrateurs (M\$)	Etudes d'ingénierie (FEED) (M\$)
Niveau d'autorisation (sur 5 ans)	910	1 000	2 600	200

Tableau 3 - Niveau d'autorisation du budget R&D "Carbon capture" du DOE. Source : Energy Act of 2020.

5.8.b) Stockage

Un programme inter-agences d'évaluation de la **capacité de stockage géologique du CO₂** aux États-Unis et d'identification des sites de démonstration potentiels pour les transformer en sites de stockage commerciaux sera alimenté à hauteur de 800 M\$ sur 5 ans.

5.8.c) Utilisation

Un programme focalisé sur l'utilisation du dioxyde de carbone est dédié à l'identification et l'évaluation des nouvelles technologies d'utilisation dans une grande variété de secteurs. En outre, cette section comprend le financement d'un centre national de recherche menant des activités de R&D fondamentale. Le niveau d'autorisation d'engagement de dépense de ce programme est de 281 M\$ sur 5 ans.

La loi de programmation autorise le Secrétaire à l'énergie, en consultation avec l'administrateur de l'EPA, à diriger le programme d'utilisation du dioxyde de carbone avec comme objectif d'identifier et d'évaluer les nouvelles utilisations (fabrication de produits commerciaux et industriels) qui, sur la base du cycle de vie complet, permettront une réduction permanente ou l'évitement d'une augmentation nette de CO₂.

5.8.d) Captage direct du dioxyde de carbone atmosphérique

Le programme d'élimination du carbone établit un programme inter-agences pour tester, valider ou améliorer les technologies et les stratégies de captage du dioxyde de carbone de l'atmosphère à grande échelle, en finançant les activités de RD&D nécessaires à la montée en TRL. Le niveau d'autorisation d'engagement de dépense de ce programme est de 445 M\$ sur 5 ans.

6. Les partenariats multilatéraux et bilatéraux

Les États-Unis sont présents dans de nombreux partenariats multilatéraux travaillant au développement et au déploiement du CCUS, tels que ceux de l'Agence Internationale de l'Énergie, du *Working Party on Fossil Fuels*, du *Greenhouse Gas R&D Programme*, et du *Clean Coal Centre*.

Ils participent aussi au *CCS Roadmap and International CCS Regulatory Network* du *CCS Unit*, au sein du *Carbon Sequestration Leadership Forum*, aux initiatives CCUS du *Clean Energy Ministerial* et de la *Mission Innovation*, ainsi qu'à l'*APEC Expert Group on Clean Fossil Energy* et à l'*UN Economic Commission for Europe*. Ils sont membres du *Global CCS Institute*.

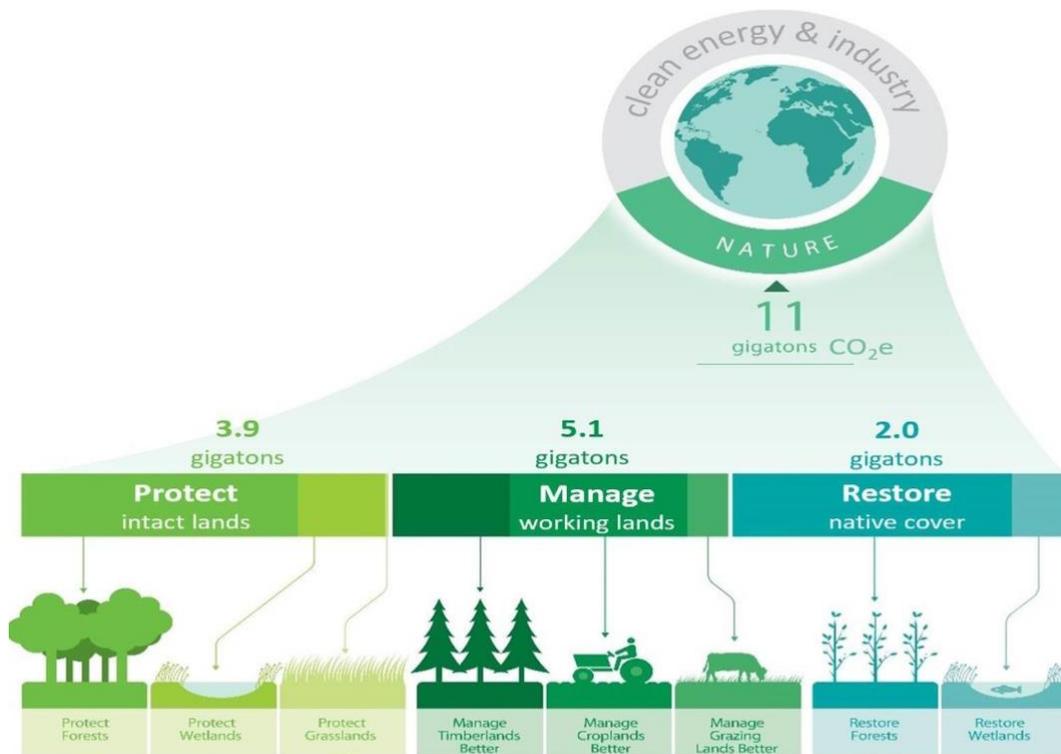
Enfin, les États-Unis ont récemment rejoint le programme de RD&D européen ERANET ACT (*Accelerating CCS Technologies*).

Les États-Unis ont aussi mis en place un certain nombre de programmes de coopération bilatéraux : avec le **Japon** (*Japan-U.S. Strategic Energy Partnership ; Memorandum of Cooperation on CCUS*), la **Chine** (*Fossil Energy Protocol, CCUS Initiative, Advanced Combustion Technology Consortium*), la **Norvège** (*Memorandum of Understanding on CCUS*) et l'**Inde** (*Strategic Energy Partnership's Power & Energy Efficiency Pillar, Partnership to Advance Clean Energy Research*

LES SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE

1. Descriptif et éléments de contexte

Les Solutions fondées sur la Nature (*Nature-Based Solutions*, NBS) sont définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature comme "les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité"³². La Figure 13 provient d'une étude parue en 2017 qui évalue le potentiel de stockage global du carbone par les NBS à 11 GtCO₂/an. Ce terme regroupe une large gamme de solutions qui visent à améliorer de nombreux services écosystémiques (par exemple érosion, régulation de l'eau, etc.) et de protection ou restauration des écosystèmes.



Source: Griscom et al., PNAS (2017) and Griscom et al., 2020 Philosophical Transactions of the Royal Society B. Graphics from Nature Conservancy magazine and 5W Infographics

Figure 13 - Une évaluation globale du potentiel de séquestration du carbone par les différentes solutions basées sur la nature.

Dans le cadre de ce rapport, nous nous limiterons au service de stockage de carbone qui comprend à la fois les solutions visant à améliorer le captage du carbone par la nature mais aussi à la préservation des stocks existants. Le terme de "*Nature-Based Solutions*" n'étant pas spécifique à la problématique de l'atténuation du changement climatique, l'usage des termes "*Natural Climate Solutions*" (NCS) et "*Nature-Based Climate Solutions*" (NBCS) est privilégié lorsqu'ils sont intégrés dans les

feuilles de route de décarbonation aux États-Unis. D'autre part, ce rapport ne traite pas des solutions fondées sur l'océan. Malgré leur pertinence, ces approches restent encore très peu étudiées et discutées à ce jour, et un seul groupe interviewé (NOAA) en a fait mention.

2. Différentes voies permettent d'améliorer le stockage du carbone dans les écosystèmes terrestres.

On peut regrouper les solutions pour le captage du carbone dans les écosystèmes en trois catégories :

- le changement d'affectation des sols ou la restauration d'écosystèmes dégradés qui stockeront plus de carbone dans la biomasse et dans les sols : l'afforestation ou le reboisement ;
- la modification des pratiques de gestion des écosystèmes anthropisés afin d'améliorer le stockage du carbone ;
- l'incorporation de matériaux dans les sols afin d'augmenter les propriétés de stockage de carbone.

2.1. Changer l'affectation des sols ou restaurer les écosystèmes dégradés qui stockeront plus de carbone dans la biomasse et dans les sols.

Dans cette catégorie, les deux principales solutions sont l'afforestation ou la reforestation³³. Ces deux solutions permettent de stocker du carbone dans la biomasse forestière mais également d'améliorer les capacités du sol à stocker le carbone, en particulier si l'afforestation/reforestation a lieu sur des sols agricoles généralement appauvris en carbone.

Outre ces deux solutions principales, il est également possible, quoique plus marginalement employé, de remettre en prairie des sols agricoles. En effet, les prairies, même si elles représentent un faible stock de biomasse, peuvent stocker de forte quantité de carbone dans les sols, à des niveaux assez similaires à ceux des forêts.

Au-delà du changement d'affectation des sols, des méthodes permettant la restauration d'écosystèmes dégradés et le maintien de la biodiversité améliorent également le stockage de carbone dans l'ensemble de l'écosystème. Aux États-Unis, ces projets sont principalement réalisés par les ONG de conservation de la nature telles que *The Nature Conservancy* ou *Green Forest Work*³⁴. Des start-ups se positionnent également sur le marché de l'afforestation à l'instar de *Pachama*³⁵ qui utilise les technologies AI/Machine Learning pour proposer un service d'aide à la décision et de gestion de crédits-carbone par les actifs forestiers.

33 La différence entre les deux termes vient simplement de la distinction entre planter une forêt sur un sol qui n'était pas une forêt depuis longtemps et de replanter une forêt sur un sol qui a été déforesté.

34 <https://www.greenforestwork.org/>

35 <https://pachama.com/about>

2.2. Modifier les pratiques de gestion des écosystèmes afin d’améliorer le stockage du carbone dans les écosystèmes anthropisés.

Ce type de méthode vise plutôt à améliorer le stockage du carbone dans les sols de prélèvement de biomasse, qu’il s’agisse de forêts, de cultures ou de prairies.

Dans le cas forestier, il peut s’agir de jouer sur les types d’essences présentes, le mode de gestion plus ou moins intensif et sur la durée des rotations prises en compte. Pour les cultures, il s’agit de mettre en place des itinéraires techniques permettant d’améliorer la méthode de labour ou de jouer sur les modes de rotations de cultures. Une solution particulièrement prometteuse est l’ajout de cultures intermédiaires qui consiste à planter des espèces qui peuvent se développer pendant les périodes où le sol est à nu, et qui seront ensuite enfouies dans le sol. Ces cultures permettent aussi, lorsqu’il s’agit de légumineuses, une réduction des intrants azotés. Des solutions plus technologiques sont également à l’étude, pour développer des cultures ayant des racines plus profondes ou produisant plus de photosynthèse, afin d’augmenter la quantité de biomasse laissée sur place qui viendra ainsi alimenter le carbone du sol.

À noter qu’il existe différentes solutions en plein développement qui visent à combiner les cultures et prairies avec les couverts arborés. Il s’agit des solutions d’agroforesterie ou de sylvopastoralisme qui visent à réaliser des cultures sous couvert d’arbres plus ou moins dense, ou le pâturage en couvert forestier là aussi plus ou moins fermé. Enfin divers projets visent à redévelopper les haies bocagères qui ont largement disparu lors des remembrements successifs.

Dans le rapport “*Considering Forest and Grassland Carbon in Land Management*”³⁶, l’U.S. Department of Agriculture sensibilisait en 2017 sur le rôle des forêts et des prairies dans le cycle de carbone et sur l’importance d’améliorer les pratiques de gestion dans une perspective d’amélioration des capacités de stockage de carbone. *Ecosystem Marketplace*³⁷ et *Climate Action Reserve*³⁸ prodiguent des conseils et conçoivent les standards pour une meilleure gestion des ressources agricoles et forestières en matière de captage de carbone mais aussi pour d’autres services écosystémiques. L’U.S. Geological Survey coordonne le programme scientifique *LandCarbon*³⁹, un programme d’évaluation de la séquestration du carbone biologique qui étudie les problèmes du cycle du carbone dans les écosystèmes et développe la science de la gestion du carbone et des méthodes de surveillance.

2.3. Incorporer au sol des matériaux riches en carbone ou facilitant la fixation du carbone.

Cette troisième catégorie concerne l’apport de matériaux au sol pour capter ou conserver le carbone. Aux États-Unis, elle est considérée comme une méthode hybride, à la fois technologique et naturelle, et n’est pas classée comme solution fondée sur la nature.

36 <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/54316>

37 <https://www.ecosystemmarketplace.com/about-us/>

38 <https://www.climateactionreserve.org/>

39 https://www.usgs.gov/ecosystems/land-change-science-program/science/landcarbon?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Une première approche consiste en l'apport de biochar dans les sols. Le biochar est un matériau solide, riche en carbone, très récalcitrant à la décomposition et produit par pyrolyse de la biomasse. Il s'agit ici d'apporter directement du carbone inorganique au sol pour une période allant d'un à plusieurs siècles. Des entreprises comme *CarboCulture*⁴⁰ ou *Biochar Supreme*⁴¹ produisent et vendent des biochars afin de les incorporer dans les sols et augmenter leur rendement. Des associations d'entreprises mènent des actions de plaidoyer afin de promouvoir ces technologies, comme l'*US Biochar Initiative*⁴².

On voit également apparaître diverses solutions consistant à répandre sur les sols cultivés des minéraux broyés en fine poudre ("*enhanced silicate rock weathering*"). Il peut s'agir de minerais comme l'olivine qui, au contact de l'eau, permet une réaction de carbonatation et donc de fixation de CO₂ par la création d'ions HCO₃⁻. Enfin, l'apport de minerais peut indirectement (et donc non pas en se combinant directement au carbone) participer au stockage de carbone par un effet fertilisant, par exemple la dispersion de roches phosphatées qui, en libérant du phosphore, vont favoriser la fixation de CO₂ par les plantes. Le Département de l'Énergie a initié une demande de renseignements en 2020 à destination de la communauté scientifique afin d'identifier les opportunités de recherche à mener dans le domaine de l'*Enhanced Weathering*⁴³.

3. Un potentiel de stockage bien identifié mais un faible soutien institutionnel.

Au niveau fédéral, on trouve une première évaluation du potentiel des NCS sur l'ensemble des États-Unis dans un rapport de la Maison Blanche de 2016 « *United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization* » qui estime un potentiel de stockage de 912 MtCO₂e/an⁴⁴. En 2018, ce potentiel a été revu à la hausse de 30 % avec un potentiel de 1.2 GtCO₂e/an⁴⁵. Un important séminaire de l'université de l'Oregon a eu lieu en octobre 2019 dans le cadre du projet « *Landscape Carbon Sequestration for Atmospheric Recovery (LSCAR)* » qui a conduit à la publication d'un livre blanc⁴⁶.

En revanche, il ne semble pas exister de programme de financement spécifiquement dédié aux NBS par la NSF, NOAA ou NASA (comme cela est le cas dans le cadre du programme européen H2020 par exemple). On note toutefois quelques programmes sur ces thématiques financés dans le cadre d'appels à projet génériques comme le programme « *Landscape Carbon Sequestration for Atmospheric Recovery* » financé à hauteur de 80 000 dollars dans le cadre du *NSF Convergence Accelerator* qui a donné lieu au séminaire et livre blanc indiqué plus haut. On peut citer comme autre exemple une étude publiée dans PNAS sur la séquestration carbone qui a été menée dans le cadre de l'observatoire à long terme des recherches écologiques (*Long Term Ecological Research*) financé depuis plus de trente ans par la NSF.

En mars 2021, le Département de l'Agriculture américain a annoncé un nouvel appel à projet dans le cadre du *Regional Conservation Partnership Program's (RCPP)* et de l'*Alternative Funding Arrangements*

40 <https://www.carboculture.com/>

41 <https://www.biocharsupreme.com/>

42 <https://biochar-us.org/>

43 <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-issues-request-information-enhanced-weathering-research>

44 L'insertion de la notion CO₂ équivalent (CO₂e) provient du fait que le stockage ne se limite pas au CO₂ mais à d'autres gaz à effet de serre. Les quantités sont normalisées sur la base de leur potentiel de réchauffement global.

45 <https://advances.sciencemag.org/content/4/11/eaat1869>

46 https://www.researchgate.net/publication/338126798_Landscape_Carbon_Sequestration_for_Atmospheric_Recovery_White_Paper_A_Perspective_on_Convergence_to_Accelerate_Carbon_Sequestration

(AFA). Ce programme de 75 M\$ soutient des projets qui adoptent des approches innovantes et non traditionnelles des solutions de conservation à l'échelle locale, régionale, et du paysage. Une part significative de ce financement AFA ira aux projets qualifiés de « *climate-smart* », à fort potentiel d'intégration aux marchés carbone. L'appel à projet de 2020 ne faisait pas mention de cette approche associant agriculture et usages des sols aux crédits carbone.

Une analyse bibliométrique suggère que la recherche académique concernant les NBS ou NCS est plutôt moins développée qu'en Europe puisqu'une recherche sur les thématiques NBS et NCS sur *Web of Science* renvoie une liste de 120 articles pour les États-Unis alors que la même recherche en indiquant simplement l'Europe comme source de financement en dénombre déjà 147.

4. Mais un écosystème de lobbies et d'ONG dynamique

Si les initiatives et les financements institutionnels restent limités, le travail des lobbies et des ONG pour promouvoir les solutions fondées sur la nature ou influencer l'agenda gouvernemental et du Congrès est très dynamique.

A titre d'exemple, le *World Resources Institute* propose une feuille de route pour la restauration des forêts basée sur trois piliers :

1. **inciter les propriétaires privés qui détiennent la majorité des surfaces boisées à accroître le stock de carbone dans leurs forêts.** L'idée serait de mettre en place un crédit d'impôt sur le modèle du 45Q déjà en place pour l'enfouissement géologique. Afin de pouvoir atteindre les petits propriétaires qui n'ont pas les moyens de pouvoir mesurer effectivement les apports en carbone, l'idée serait de disposer d'un ensemble de pratiques approuvées auquel les propriétaires pourraient se référer pour avoir accès aux crédits ;
2. **développer la reforestation des forêts fédérales en particulier pour compenser les pertes de forêts liées aux incendies récents.** Cela nécessiterait de revoir le *Federal Reforestation Trust Fund* actuellement en place. Mis en place en 1980 il est limité à 30 M\$ et représente donc un effort très insuffisant pour couvrir les besoins en reforestation. Le WRI propose donc une refondation de ce fond en le portant à 100 M\$;
3. **développer l'inventaire national forestier pour avoir une meilleure estimation des puits de carbone à l'échelle des États-Unis.** Il s'agit d'avoir une évaluation plus précise de l'évolution des forêts et une remise à jour plus fréquente notamment en se basant sur les nouveaux outils de télédétection.

De même, le think-tank *Carbon180* a rédigé un livre blanc qui proposait au Département de l'Agriculture des actions prioritaires afin d'optimiser les services via une meilleure coordination interne entre les services chargés de la gestion des forêts et ceux travaillant sur l'atténuation climatique. Les actions prioritaires proposées sont de :

1. redéployer les aides ou assurances sur des projets d'amélioration de captage du carbone dans les systèmes agricoles ;
2. développer l'agriculture de conservation et ajuster les programmes existants pour accentuer la priorité vers le stockage de carbone ;
3. pour l'*Environmental Protection Agency* (EPA), le rapport préconise une refonte des standards sur les énergies renouvelables pour pousser vers les solutions à émissions négatives ;

4. pour la *National Science Foundation* (NSF), le rapport préconise de mettre en place des programmes spécifiques sur la séquestration du carbone et accroître les fonds dédiés aux recherches sur les écosystèmes pour le stockage de carbone.

L'ONG *The Nature Conservancy* propose des financements et mène directement des recherches sur le rôle des NBS afin de soutenir leur plaidoyer en faveur de leurs développements. On notera par exemple la mise en place du programme « *Nature Climate Solutions Accelerator Grant Program* » doté d'un budget de 850 000 \$ qui finance 5 projets innovants :

1. *Savanna institute* (250 000 \$) : projet qui vise à développer l'agroforesterie dans les états de l'Illinois, Iowa, Minnesota et Wisconsin ;
2. *Tierra foundation* (216 000 \$) : projet dont l'objectif est la restauration des zones humides côtières.
3. *Manomet inc* (177 000 \$) : projet dont l'objectif est d'améliorer les modes de gestion des forêts gérées afin d'améliorer le stockage de carbone.
4. *The Nature Conservancy* (170 000 \$) : projet dans les Appalaches qui vise à inciter les petits propriétaires à maintenir leur forêt et à en améliorer la gestion pour stocker plus de carbone.
5. *Ecosystem Services Market Consortium* (100 000 \$) : projet qui vise à développer des outils pour aider les cultivateurs et éleveurs à faire évoluer leurs pratiques culturelles afin d'améliorer le stockage du carbone.

5. Des grands groupes industriels et des fondations qui investissent

Ces financements listés précédemment bien que très modestes peuvent être plutôt vus comme une labellisation qui permet d'attirer des financements privés beaucoup plus importants. Par exemple, le projet d'aide à la conservation des forêts privées en Californie reçoit par ailleurs 10 M\$ de la part de la fondation Amazon (sur un budget total de 100 M\$).

La problématique climatique étant globale, il semblait également intéressant de se pencher sur les initiatives portées par les États-Unis pour développer des solutions fondées sur la nature au-delà des frontières du pays. C'est le cas de l'organisation *Betty & Gordon Moore center for science*⁴⁷ qui dépend de *Conservation International* qui mène de travaux de recherche sur le développement de solutions fondées sur la nature à travers le monde. L'organisation mène à la fois un travail de recherche académique (ils ont participé en 2020 à 38 publications) mais également sur le développement de projets concrets sur le terrain essentiellement en zone tropicale. Au niveau recherche, beaucoup de travaux sont basés sur la cartographie et le recensement, par exemple des zones vulnérables, de différents types de zones protégées ou de dégradation d'écosystèmes comme les feux en Amazonie. Au niveau projets, il existe divers projets de conservation qui incluent entre autres des projets de captage de carbone. On peut par exemple citer un projet avec la multinationale *Walmart* pour l'amélioration des méthodes de culture du café avec un double objectif de préservation de la biodiversité et la restauration des sols en captant plus de carbone.

47 <https://www.conservation.org/about/betty-and-gordon-moore-center-for-science>

6. Des startups qui commencent à développer des projets opérationnels.

Un ensemble de startups sont déjà établies ou en développement, soit pour mettre en place directement des solutions, soit pour le déploiement de marchés carbone volontaires qui reposent sur les solutions fondées sur la nature (ex : *Nori*, *Pachama*, etc.). On trouve ainsi plusieurs startups qui visent à mettre en relation des clients qui cherchent à acheter des crédits carbone avec des agriculteurs qui vont recevoir ces crédits en mettant en place des solutions permettant d'accroître le stock de carbone des cultures.

6.1. Climate Action Reserve

Parmi ces acteurs, on trouve *Climate Action Reserve*⁴⁸. A l'origine, un groupe de sociétés en Californie qui développaient des programmes de réduction des émissions a créé le *California Climate Action Registry* afin de faire pression sur l'État pour qu'il crée un registre où les entreprises pourraient, de façon spontanée mais officielle, rapporter annuellement le bilan chiffré de leurs réductions d'émissions de gaz à effet de serre (par rapport à une valeur de référence en début de période), que ce soit des réductions directes ou via des compensations. Ce projet fut voté sous la législature du sénateur Byron Sher. Ce catalogue permettait ainsi de décrire chaque projet et en partant d'une évaluation initiale des émissions, monter au cours du temps les réductions apportées.

Ce projet initial a alors donné naissance à un projet national afin d'étendre le travail initialement réalisé dans l'État de Californie à l'ensemble du territoire américain. L'expertise ainsi acquise, qui a permis en particulier de mettre au point les protocoles de vérification, conduit aujourd'hui à la transformation d'une action volontaire des acteurs à la mise en place d'un marché carbone. La *Reserve* devenant une plateforme permettant de mettre en relation des projets de réduction des gaz à effet de serre qui pourraient ainsi vendre des crédits carbone à des entreprises prêtes à les acheter.

Climate Action Reserve définit ainsi un cahier des charges qui permet à la fois de définir les conditions d'éligibilité des projets mais également le protocole de vérification. Il peut s'agir de projets de réduction ou d'élimination n'importe quel gaz à effet de serre et n'est pas limité au CO₂. Chaque projet doit proposer une solution nouvelle qui permet d'améliorer les émissions ou le stockage et ne pas résulter d'une opération qui aurait de toute façon été déployée hors d'un marché du carbone. La comptabilité doit être vérifiable et vérifiée par un organisme indépendant suivant un protocole défini par *Climate Action Reserve*. Concernant l'horizon temporel, le stockage proposé doit être maintenu sur une période d'au moins 10 ans mais l'accord peut être étendu pour aller jusqu'au siècle. Bien qu'un protocole soit défini, les méthodologies de comptabilité ne sont pas standardisées. Elles peuvent être basées sur des mesures directes ou des modélisations plus ou moins complexes qui permettent de comparer les stocks avec et sans la mise en œuvre d'une technique de type NBS. Si les projets ne sont pas limités aux NBS, ils représentent néanmoins la majorité des projets proposés.

6.2. *Nori*, une marketplace de crédits carbone utilisant la technologie blockchain

A la différence de *Climate Action Reserve*, qui s'inscrit dans un cadre institutionnel de comptabilité volontaire afin de développer progressivement un marché carbone réglementé, d'autres start-ups émergent et fondent leur modèle d'affaires sur un marché du carbone volontaire. C'est le cas de la société

48 <https://www.climateactionreserve.org>

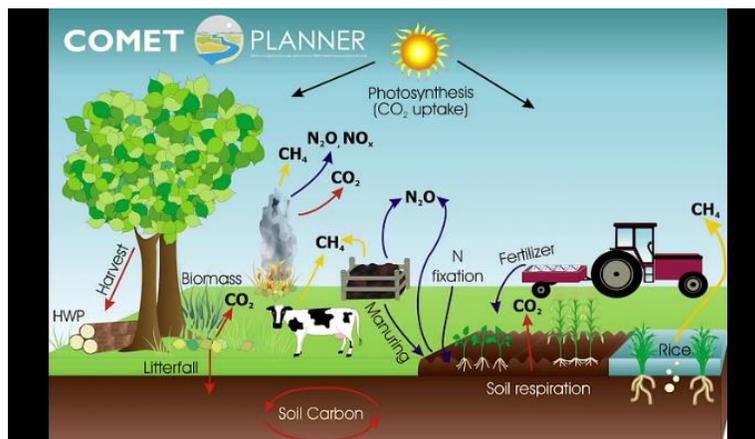
Nori, basée à Seattle, WA qui développe une plateforme basée sur la technologie blockchain afin de mettre en place un système de marché carbone spécifiquement dédié aux NBS et plus précisément à l'agriculture. *Nori* est une plateforme qui permet de faire des transactions entre agriculteurs qui génèrent des crédits carbone et des sociétés ou utilisateurs qui veulent acheter ces crédits.

La valeur de la transaction dépend de la quantité de carbone stocké et du prix de la tonne de carbone le prix actuel étant de 15\$/tCO₂. La société prend une commission de 15% sur les transactions et est encore à un niveau pré-opérationnel, en fonctionnant sur un ensemble de fermes pilotes qui serviront également au co-design du marché.

Nori propose une méthodologie unifiée pour l'estimation de la quantité de carbone stockée. En particulier, la méthode est basée sur la plateforme *COMET-Farm* développée par le *Natural Resource Ecology Laboratory* (NREL) de la *Colorado State University* (voir encadré ci-dessous).

Encadré 1 – Comet FARM

Comet Farm est un outil en ligne développé par le USDA pour permettre aux agriculteurs d'améliorer leur gestion en termes de conservation et de bilan de GES, qui permet de calculer le bilan carbone d'un système de culture ou d'élevage. Il est basé sur un ensemble de modèles, de facteurs d'émissions ou de méthodes publiées dans la littérature permettant d'évaluer les différentes composantes du cycle, que ce soit la production primaire, l'évolution du carbone dans les sols, les émissions associées aux différentes pratiques agricoles (engins mécaniques, émission de N₂O ou de CH₄ liés aux engrais ou à l'élevage etc...). Il permet non seulement de définir les émissions liées aux itinéraires techniques actuels, mais permet également d'évaluer le gain en gaz à effet de serre associés à différents scénarios de conservation proposés.



La date prise en compte pour le début de la période de stockage peut remonter jusqu'en 2010 à condition d'avoir au moins 3 ans de données qui puissent servir de conditions initiales. Comme pour *Climate Action Reserve*, la période de comptabilité retenue est de 10 ans, ce qui permet de s'affranchir des variations interannuelles climatiques. La vérification peut être basée soit sur une mesure directe des stocks de carbone, soit par une modélisation basée sur le modèle *COMET-Farm*. Enfin, la qualification des projets retenus nécessite que les gains nets de carbone estimés soient associés à une estimation de

l'incertitude basée sur une méthode scientifiquement validée. Cette incertitude permet à *Nori* de définir un niveau de risque sur la solution proposée. Il est à noter également que le protocole considère que l'état du carbone du sol n'est pas nécessairement à l'équilibre au moment de la mise en place de la nouvelle méthode de gestion. Donc la condition initiale n'est pas fixée par une simple mesure à l'état initial mais sur une modélisation de la dynamique du carbone sur toute la période, en utilisant les conditions climatiques standards, afin de soustraire la dérive éventuelle du carbone du sol (que cette dérive soit une source ou un puits de carbone) qui aurait eu lieu en l'absence de toute modification de gestion. La plateforme COMET-Farm permet également à l'agriculteur d'évaluer directement le gain carbone (et donc les crédits engrangés) en fonction d'un ensemble de solutions proposées sur la plateforme. Cette plateforme représente donc également un outil d'aide à la décision pour le fermier. Les pratiques qui ont été mise en place dans COMET-Farm et qui sont donc éligibles sont :

- Le changement de rotations et d'intensité ;
- Les cultures intermédiaires ou la conversion d'un système annuel à pérenne ;
- Le labour réduit ou changement des méthodes de gestion des résidus ;
- Le changement de méthode d'irrigation ;
- La conversion d'intrant synthétique vers des intrants organiques.
- Les différentes méthodes pouvant être combinées.

Chaque projet comprend trois acteurs : l'agriculteur, le collecteur de données et celui qui contrôle et qui atteste du bon suivi du protocole et du résultat.

La période prise en compte pour le stockage est de 10 ans. Il y a donc un audit à la fin de la période pour vérifier si les objectifs ont bien été atteints. Il y a également un calcul d'une probabilité de séquestration à plus long terme mais rien n'est prévu en termes de vérification à plus long terme. On voit ici la limite de ces approches car le temps considéré de 10 ans est très court et il n'y a qu'une faible garantie de pérennité du carbone stocké en particulier avec le risque de retour sur des pratiques qui pourraient déstocker le carbone accumulé et donc offrir un gain nul à l'horizon de quelques dizaines d'années.

6.3. *CarboCulture*, le biochar pour des infrastructures urbaines plus vertes.

La société *CarboCulture*⁴⁹, basée en Californie et possédant une filiale en Finlande, produit des biochars à partir de résidus de biomasse. Ce biochar est majoritairement utilisé par enfouissement dans le sol mais l'entreprise fournit des solutions de services pour les infrastructures urbaines, comme le traitement des eaux usées. L'originalité de l'approche est de pouvoir utiliser des résidus variés de biomasse qui sont transformés en biochar dans des réacteurs de petite dimension, nécessitant très peu d'énergie en entrée. Ils peuvent donc être déployés dans des contextes très différents, près des sites de production des résidus évitant ainsi le problème de transport. L'ambition affichée est de pouvoir stocker 1 GtCO₂/an à l'horizon 2030.

49 <https://www.carboculture.com/>

7. Un intérêt pour les solutions fondées sur la nature qui attirent de plus en plus de capitaux publics et privés.

En réponse à la montée en puissance des engagements climats, les solutions fondées sur la nature proposent une alternative aux solutions technologiques et suscitent l'engouement de financeurs. Historiquement canalisé par les ONG de conservation et financé par le mécénat de grandes entreprises, l'État fédéral se penche sur la question et des prémices de projets de structuration au niveau national sont en négociations au Congrès. Voici pour les principaux programmes de financements de projets NBS dans un cadre de décarbonation de l'économie américaine :

Nom du projet	Financeur	Statut	Montant (M\$)	Description
<i>U.S. Carbon Bank</i>	Dep. of Ag.	Négociations au Congrès	50 000	
<i>Civilian Climate Corps</i>	Dep. of Interior	Négociations au Congrès	10 000	Mobiliser une main d'oeuvre massive pour la restauration des écosystèmes avec pour mission principale de favoriser les projets à haut potentiel de captage carbone
<i>Regional Conservation Partnership Program's (RCPP)</i>	Dep. of Ag.	Appel à projets lancé	75	
The Restore Fund	Apple, Conservation International	En cours	200	Solutions Fondées sur la Nature visant à éliminer 1 millions de tonnes de dioxyde de carbone atmosphérique
Nature Conservancy	Bezos Earth Fund	Financé	100	(c'est essentiellement ce fond qui va concerner les projets de stockage du carbone)
World Wildlife Fund	Bezos Earth Fund	Financé	100	
Environmental Defense Fund	Bezos Earth Fund	Financé	100	

Tableau 4 - Quelques exemples de financements NBS

8. Les solutions fondées sur la nature pourraient connaître un essor ces prochaines années

8.1. Le secteur des NBS à un stade embryonnaire

On constate tout d'abord que les NBS restent encore à un stade très préliminaire que ce soit en termes d'évaluation des solutions que de leur déploiement effectif à grande échelle. Ceci n'est cependant pas propre aux États-Unis car la même observation peut être faite dans le reste du monde, et en Europe en particulier. Néanmoins, contrairement à l'Europe, les financements pour la recherche fondamentale sur les solutions à mettre en place restent assez marginaux au niveau fédéral (ou disséminés dans des programmes de l'*U.S. Department of Agriculture* ou *National Park Service* (NPS) et difficiles à identifier. Cela se traduit par exemple par un nombre de publications sur le sujet plutôt moins élevé aux États-Unis qu'en Europe.

8.2. De nouvelles perspectives avec l'administration Biden

Il faut néanmoins noter que cette situation devrait évoluer assez rapidement avec l'arrivée de l'administration Biden et le retour des États-Unis dans l'Accord de Paris. Des réflexions sont ainsi déjà en cours pour mettre en place une Banque du carbone au Département de l'Agriculture afin de développer un marché carbone dédié. De même, le nouveau président a annoncé peu après son arrivée la création du *Civilian Climate Corps* à l'instar de la *Civilian Conservation Corps* créée en 1933 dans le cadre du *New deal* avec l'objectif d'un recrutement massif de volontaires et de particuliers pour replanter les forêts détruites par les incendies récents.

8.3. Les ONG essaient de se faire entendre

De même, certaines ONG (ex : *The Nature Conservancy*, *Conservation International*, *World Resource Institute*, etc.) lancent des plaidoyers et gagnent en visibilité dans le débat public. Elles visent d'abord à influencer directement les politiques en proposant des feuilles de route pour précisément renforcer le financement de la recherche académique mais également pour mettre en place des financements, via des taxes ou des aides, pour le déploiement de solutions concrètes à l'instar de ce qui se fait déjà pour le CCUS avec par exemple une mise en place d'un équivalent du crédit d'impôt 45Q pour le captage et le stockage du CO₂. Ces ONG se substituent en quelque sorte aux autorités pour le déploiement des solutions. Elles proposent ainsi de financer directement des projets de reboisement. Les financements étant modestes, ils peuvent être en fait plutôt vus comme une labellisation (à l'instar de ce qui est fait en France par exemple pour des projets bas carbone) qui permet ensuite d'attirer des financements beaucoup plus importants venant du mécénat des grands groupes.

8.4. La place des actifs forestiers dans les marchés carbonés.

Enfin, alors que la R&D est encore relativement récente, on voit se développer un marché du carbone sur les NBS autour de startups (ex : *Nori*) qui ont pour objectif principal de mettre en relation débiteurs et créditeurs. Du fait que ce marché commence à se mettre en place alors que la R&D est encore en plein développement, les approches proposées sont relativement hétérogènes. En particulier, il n'existe pas de standard en termes de certification et de méthodes de validation des quantités de carbone stockées. Si, dans certains cas, un cahier des charges est défini, ce n'est pas forcément toujours le cas et les méthodes d'évaluation peuvent être proposées par le créditeur. De même, la vérification ne repose pas pour l'essentiel sur une mesure effective du carbone du sol mais sur des outils de modélisation qui

permettent de faire une évaluation a priori du potentiel de stockage. Les méthodes d'évaluation reposent ainsi plus sur un potentiel de stockage que sur un stockage effectif.

8.5. Les NBS se développent majoritairement par la finance du carbone forestier et les marchés de crédits carbonés.

La fonction de stockage du carbone par les NBS est principalement valorisée par l'intermédiaire des marchés carbonés volontaires ou réglementés. Aux États-Unis, le *California - Quebec Emission Trading System* (réglementé) permet d'échanger des crédits carbonés générés par les forêts et représentait un marché de 273 M\$ de crédits carbonés en 2019.

	Volume de crédits carbonés forestiers (MtCO ₂)			Prix moyen (\$/tCO ₂)			Valeur totale (M\$)		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
California - Quebec Emission Trading System	23.6	42.1	17.6	13	14.5	15.5	309	610	273

Figure 14 - Valorisation des offsets forestiers dans le marché réglementé California - Québec. Source : State of Forest Carbon Finance 2021

Tous les marchés carbone n'incluent pas d'actifs forestiers dans leurs opérations, mais certaines entreprises (ex : Microsoft⁵⁰) privilégient les offsets forestiers dans leur portefeuille de crédits carbonés afin d'atteindre leurs objectifs de neutralité.

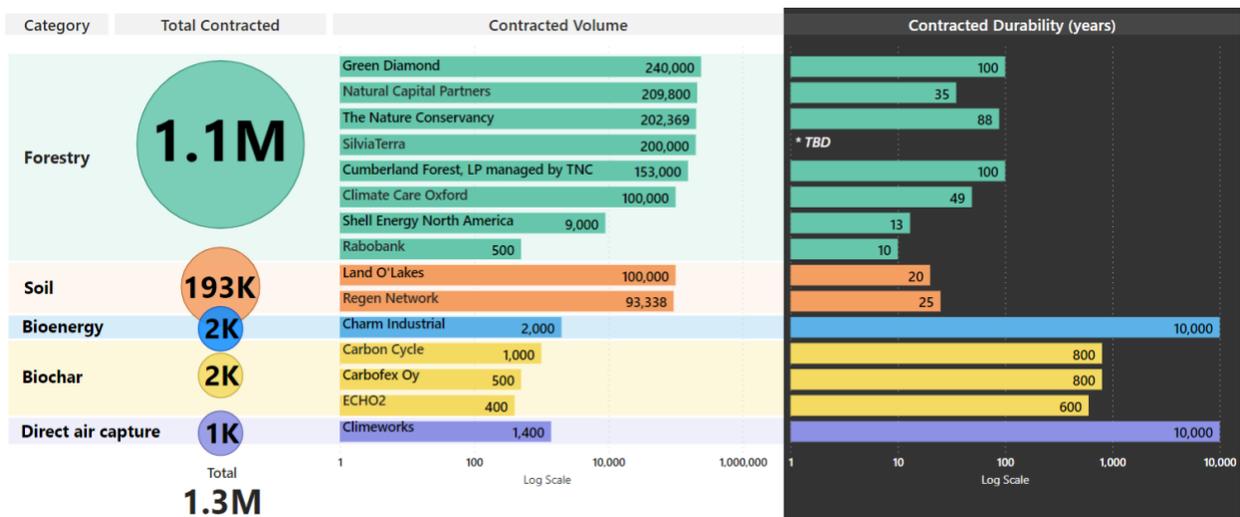


Figure 15 - Portefeuille de compensation carbone de Microsoft pour l'année 2021. Source : Microsoft.com

50

<https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/carbon-removal-program>

Il est intéressant de constater (Figure 16) que la France est le premier pays des acheteurs de crédits carbone forestiers, devant les États-Unis, pour les marchés volontaires et/ou réglementés, comme le constate *Ecosystem marketplace* dans son *State of Forest Finance 2021*⁵¹.

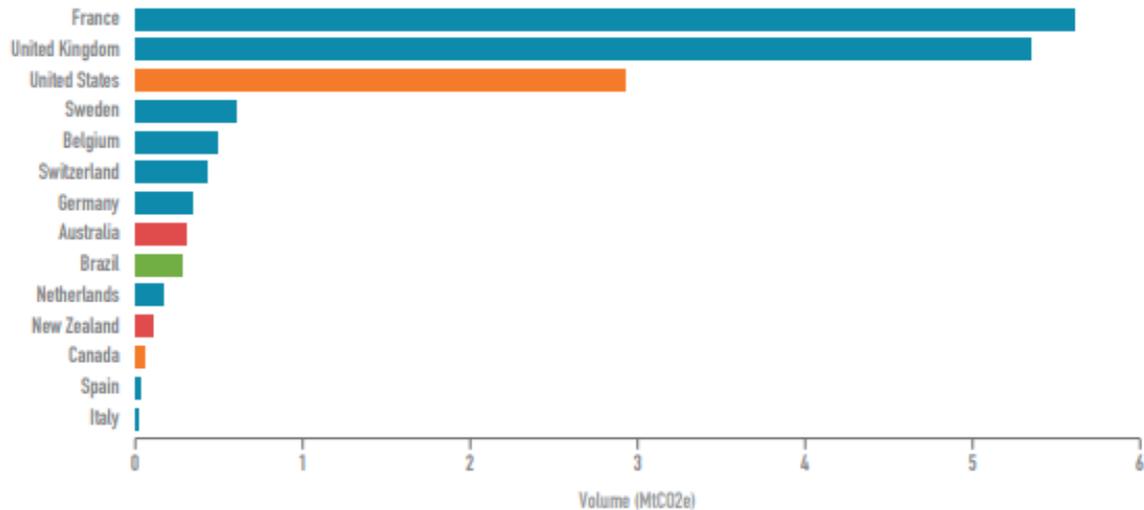


Figure 16 - Volume mondial des crédits-carbone forestier par nationalité des acheteurs. Source : Ecosystem Marketplace, *State of Forest Carbon Finance 2021*

8.6. La question fondamentale de la durée de stockage reste en suspens.

Une autre question fondamentale posée par les NBS pour le captage du carbone est celle de l'horizon temporel. En effet, à l'inverse des solutions de captage et de stockage géologique qui a priori stockent le carbone sur des périodes très longues, le captage par les sols ou la biomasse est a priori transitoire (à part pour les solutions de la 3ème catégorie présentées en introduction comme les biochar). De plus, ce stockage dépend de conditions exogènes comme le climat futur et l'utilisation des terres qui sera mis en place ultérieurement. Un point commun aux différentes approches est de considérer un horizon minimum d'une décennie. C'est-à-dire que l'on doit s'assurer que le carbone capté l'est au moins sur un horizon de 10 ans. Bien que la question ne soit pas abordée dans ce que proposent les différents acteurs américains, cela pose à terme la question de la pérennité de ces solutions de séquestration et de leur impact sur les trajectoires de neutralité carbone à long terme. Si la séquestration reste temporaire elle devra être compensée par la suite par d'autres secteurs.

8.7. Des bénéfices multiples pour la biodiversité

Un autre aspect qui ne semble pas assez pris en compte aux États-Unis, aussi bien au niveau des rapports sur les solutions à aborder qu'au niveau des solutions effectivement mises en place, est celui de l'impact des solutions proposées sur les autres services écosystémiques, notamment celui lié à la préservation et restauration de la biodiversité. Si les actions de restauration et de préservation insistent sur leur impact positif sur le stockage du carbone, des solutions de captage du carbone peuvent avoir des effets dévastateurs sur la biodiversité. En effet, les projets sélectionnés pour recevoir des crédits carbone doivent uniquement démontrer leur capacité à stocker du carbone, en omettant leur impact sur d'autres services, notamment le maintien de la biodiversité. Ainsi, la notion de bouquet de services

51 <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-forest-carbon-finance-2021/>

écosystémiques, assez courante en Europe semble être beaucoup moins répandue aux États-Unis. Il en va de même pour la dimension sociale et de bien-être. En premier lieu il s'agit du risque de conflit d'usage avec la production agricole et donc la sécurité alimentaire. Mais on peut noter également le problème d'acceptation sociale et culturelle dans la mesure ou la mise en place des solutions de séquestration peut conduire à une modification profonde des paysages.

TECHNIQUES DE MODIFICATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

1. Descriptif et éléments de contexte

Le climat de la Terre est essentiellement déterminé par son bilan radiatif au sommet de l'atmosphère qui régule le contenu énergétique global de l'atmosphère et de l'océan. La Terre est chauffée par l'absorption d'une partie du rayonnement solaire incident et refroidie par l'émission thermique infrarouge de la Terre (IR) vers l'espace. L'énergie solaire absorbée est simplement la différence entre le rayonnement solaire incident et celui réfléchi vers l'espace, notamment par la surface, les aérosols, et les nuages. La capacité de la Terre à réfléchir le rayonnement solaire est appelée l'albédo planétaire.

Les activités humaines ont entraîné une forte augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, notamment le CO₂, au cours du dernier siècle ce qui accroît l'absorption atmosphérique du rayonnement IR et donc diminue le rayonnement IR pouvant directement s'échapper vers l'espace (on parle aussi de piégeage IR), créant ainsi un déséquilibre radiatif positif. Cette absorption accrue du rayonnement IR par l'atmosphère a aussi mécaniquement augmenté le flux IR réémis vers la surface ce qui renforce l'effet de serre. La conséquence la plus évidente du déséquilibre radiatif positif de la Terre est l'augmentation des températures à la surface du globe, qui accroît l'émission IR de la Terre, tendant ainsi à rétablir l'équilibre radiatif.

La modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management, SRM*) cible non pas la cause première du déséquilibre radiatif (c'est-à-dire l'augmentation de CO₂), mais le déséquilibre lui-même. La plupart des technologies de SRM cherchent à augmenter l'albédo planétaire, en particulier la part de l'albédo dû aux aérosols ou à certains nuages, de manière à diminuer la fraction d'énergie solaire absorbée et ainsi réduire le déséquilibre radiatif positif. Notons que quelques technologies classées SRM par l'Académie des sciences américaine⁵² visent à modifier les propriétés radiatives de l'atmosphère dans le domaine IR, et non dans le domaine solaire. Pour cette raison, le qualificatif 'solaire' dans le terme SRM n'est pas approprié pour ces technologies. Il faut aussi souligner que les scientifiques approchés durant ces rencontres sont unanimes sur la nécessité de freiner en priorité l'augmentation de CO₂ et des autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère et que le déploiement des techniques de SRM n'aurait aucun sens s'il n'est pas accompagné d'une réduction drastique des émissions de CO₂, y compris avec le déploiement des techniques de SRM à grande échelle en cas de scénario où l'objectif en température est dépassé⁵³. Enfin il est important de préciser qu'aucune technique de SRM n'est représenté dans les scénarios d'atténuation évalués dans les rapports du GIEC, tel que ceux compatibles avec l'Accord de Paris.⁵⁴

2. Incertitudes des différentes approches de SRM

Seules les techniques SRM analysées dans le rapport récent de l'Académie américaine des sciences, de l'ingénierie, et de médecine sont discutées ici (Figure 17). D'autres projets de technologies ont été proposés par le passé^{55,56}. On peut citer le placement en orbite de grandes structures

52 <https://doi.org/10.17226/25762>

53 [Climate Intervention - Reflecting Sunlight to Cool Earth, NASEM, 2015](https://www.ipcc.ch/sr15/)

54 <https://www.ipcc.ch/sr15/>

55 <https://anr.fr/fileadmin/documents/2016/Rapport-final-ARP-REAGIR-mai-2014.pdf>

56 <https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2009/geoengineering-climate/>

réfléchissantes à très haute altitude et même au point de Lagrange (1 500 000 km de la Terre en direction du soleil), ou encore l'augmentation de l'albédo de surface, notamment l'albédo de certains couverts végétaux ou des toits de bâtiments. La plupart de ces projets ne sont plus véritablement considérés aux États-Unis ni ailleurs, en raison de doutes très sérieux sur la faisabilité technologique, leur potentiel ou leur efficacité.

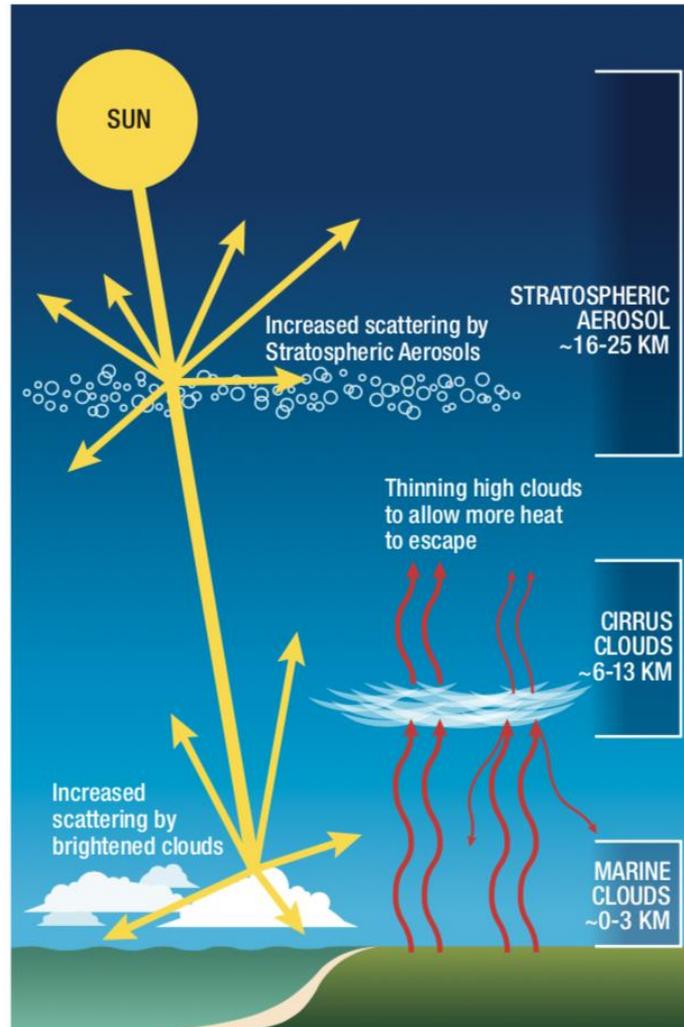


Figure 17 - Illustration des mécanismes impliqués dans l'injection d'aérosols stratosphériques (SAI), l'éclaircissement des nuages marins (MCB) et l'amincissement des nuages de type cirrus (CCT).

Les principales techniques SRM qui sont étudiées aux États-Unis peuvent être divisées en trois catégories selon la cible visée. L'état actuel des connaissances, les échelles spatiales de déploiement de ces technologies, les analogies avec des perturbations atmosphériques déjà observées, l'efficacité, les incertitudes et risques spécifiques, et les impacts collatéraux indésirables varient fortement entre ces trois types de techniques SR.

2.1.a) Injection d'aérosols stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injection, SAI*)

Les technologies d'injection d'aérosols stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injection, SAI*) ciblent la couche d'aérosols soufrés réfléchissants déjà présente dans la haute atmosphère (entre environ 15 et 30 km). L'objectif est d'injecter dans la stratosphère des précurseurs gazeux de ces aérosols (soufre) ou d'autres particules réfléchissantes afin d'accroître l'albédo planétaire et ainsi diminuer la fraction de rayonnement solaire absorbée par le Terre. Du fait de la structure et de la dynamique de la stratosphère, une injection d'aérosols stratosphériques impacterait la charge d'aérosols stratosphériques à une très grande échelle, au moins hémisphérique, et au moins sur une année.

L'injection d'aérosols stratosphériques est de loin l'approche de SRM la plus discutée et la moins spéculative. Le principe et les mécanismes impliqués sont assez bien compris, surtout avec l'analogie avec les éruptions volcaniques. Une illustration du potentiel du SAI est l'éruption du Pinatubo aux Philippines en 1991 qui reste la plus grande éruption de ces 50 dernières années. Elle avait injecté approximativement une dizaine de millions de tonnes de soufre dans la stratosphère⁵⁷ qui avait conduit à une forte augmentation de la charge en aérosols soufrés réfléchissants et donc mécaniquement à un refroidissement planétaire temporaire de l'ordre d'un demi degré durant environ une année. L'analogie avec une éruption volcanique n'est pas parfaite. En effet, une éruption injecte typiquement en une seule fois alors que le SAI repose sur une injection plus ou moins continue durant une longue période. Bien que l'efficacité du SAI soit avérée à l'échelle globale, plusieurs incertitudes persistent. Le potentiel exact de refroidissement du SAI selon les paramètres d'injection (quantité totale injectée, distribution spatiale, la nature des gaz ou particules injectées) n'est pas encore précisément déterminé.

2.1.b) Éclaircissement des nuages marins (*Marine Cloud Brightening, MCB*)

Les technologies d'éclaircissement des nuages marins (*Marine Cloud Brightening, MCB*) ciblent des nuages bas réfléchissants au-dessus de certaines régions des océans. L'objectif est d'injecter des aérosols, par exemple des sels marins, qui agiraient comme noyaux de condensation de ces nuages marins bas pour modifier leurs propriétés optiques, afin notamment de les rendre plus réfléchissants et donc plus refroidissants pour la surface.

La physique de ces technologies est nettement moins maîtrisée que celle du SAI. Les processus des nuages et de leurs interactions avec les aérosols sont complexes avec plusieurs boucles de rétroactions possibles. Comme ils opèrent à très petite échelle, ils sont grossièrement représentés dans les modèles de climat, ce qui limite la portée des études de modélisation globale de l'éclaircissement des nuages marins. Le support le plus solide provient des observations dans des panaches de navires qui montrent que la réflectivité des nuages marins peut augmenter dans certaines circonstances sous l'effet d'injections de particules. Néanmoins, il n'est pas du tout certain que ces panaches de navires soient un bon analogue et les impacts sur le climat à grande échelle de telles perturbations locales ne sont pas connus. Sans une compréhension quantitative des effets des technologies d'éclaircissements des nuages marins, il n'est pas possible d'évaluer son efficacité à l'échelle globale ou même garantir qu'il n'aboutira pas à l'effet inverse escompté. D'autre part, la mise en place de ces technologies reste encore un énorme défi sur le plan technique.

57 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2003GC000654>

2.1.c) Technologies d'amincissement des cirrus (*Cirrus Cloud Thinning, CCT*)

Les technologies d'amincissement des cirrus (*Cirrus Cloud Thinning, CCT*) ciblent des nuages hauts (entre environ 5 et 15 km, haute troposphère) composés de cristaux de glace. Du fait de leur haute altitude et basse température, les cirrus tendent à réchauffer la surface car ils interagissent plus fortement avec le rayonnement IR terrestre qu'avec le rayonnement solaire. En ce sens, ils se comportent comme des gaz à effet de serre. L'objectif des CCT est d'injecter des aérosols dans la haute troposphère dont les propriétés pourraient favoriser la formation des cristaux plus gros qui seront ainsi éliminés plus rapidement par la sédimentation gravitationnelle. Au premier ordre, moins de cristaux de glace dans les cirrus diminuerait leur capacité à absorber le rayonnement IR et ainsi chauffer la surface. C'est le même effet qu'une diminution de concentration d'un GES. Pour cette raison, les CCT n'ont pas de lien avec le solaire et relèvent uniquement de la modification du rayonnement.

Notre compréhension des processus et des couplages impliqués est très limitée et largement insuffisante pour conclure sur l'existence même d'un mécanisme d'amincissement. Les rares études de modélisation donnent des résultats contradictoires et il n'y a pas d'analogie aux CCT dans les observations. Au contraire, les observations montrent que l'injection de particules par les avions dans les régions sursaturées de la haute troposphère peuvent conduire à la formation de cirrus, ce qui a pour effet d'augmenter la couverture des cirrus et donc de réchauffer la surface, mais il peut y avoir une boucle de rétroaction sur la vapeur d'eau. Dans l'état actuel des connaissances, les CCT restent très spéculatives. On ne sait pas du tout si l'injection d'aérosols peut avoir l'effet visé.

3. Les risques potentiels

Les techniques de SRM ont un potentiel (seulement avéré sur certaines technologies) à réduire l'augmentation de température et à atténuer certains effets du changement climatique actuel, mais le déploiement de telles technologies introduirait aussi des incertitudes et des risques nouveaux dans la problématique climatique.

3.1. Des impacts climatiques incertains à l'échelle régionale

Une des principales incertitudes du SRM concerne son impact climatique aux échelles régionales et les risques qui en découlent. A l'échelle globale, le SRM, notamment le SAI, a la capacité de réduire l'actuel déséquilibre radiatif. Néanmoins, cet effet est uniquement avéré à l'échelle globale, mais pas dans toutes les régions du globe. Par exemple, les technologies SAI n'auraient pratiquement pas d'effet direct sur le bilan radiatif des régions avec des albédos élevés (effet marginal des aérosols réfléchissants SAI sur des surfaces déjà très réfléchissantes telles que des surfaces enneigées ou glacées ou effet nul pendant la nuit polaire). De la même manière, les technologies MCB ou le CCT ne pourraient impacter directement que les régions où les nuages marins ou les cirrus dominent. De fait, l'effet radiatif du SRM ne correspond pas spatialement et temporellement à celui de l'augmentation du CO₂ et des autres gaz à effet de serre. Comme le climat dépend de la distribution des flux radiatifs, le SRM ne peut pas être vu comme un simple thermostat climatique. Son déploiement ne pourrait pas ramener le climat à son état antérieur (préindustriel) et ce, indépendamment des effets de l'augmentation du CO₂ qui ne peuvent pas être atténués par le SRM (ex. acidification des océans). Dans le cas du SAI dont l'effet radiatif est beaucoup moins hétérogène que celui du MCB ou CCT, les modèles climatiques indiquent que son déploiement pourrait perturber assez fortement les régimes de précipitations dans certaines régions, notamment le cycle de la mousson asiatique qui rythme la vie d'une grande partie de la population d'Asie du Sud-Est

souvent cité. Ces effets dépendent assez fortement du degré de refroidissement choisi. Il faut ajouter que les simulations des régimes de précipitations sont généralement moins fiables que celles des températures de surface, notamment aux tropiques. Même si le déploiement du SRM peut être bénéfique à l'échelle globale, les incertitudes sur la réponse des précipitations dans certaines régions amènent à se poser la question des bénéfices et des risques à ces échelles. C'est un enjeu important car les pays peuvent difficilement se positionner sur le déploiement du SRM sans une idée précise de ses effets à l'échelle régionale.

La question de la réponse climatique à l'échelle régionale ne s'applique pas seulement au forçage SRM. Elle est un des grands défis de la modélisation climatique. Les modèles climatiques sont parfois en désaccord sur certains aspects régionaux de la réponse climatique au forçage généré par l'augmentation du CO₂. Cependant, les multiples données d'observation collectées au cours du siècle dernier, notamment les données satellitaires depuis la fin des années 70, nous ont fourni des informations considérables sur ce sujet. Ces observations ont été les points de référence dans l'amélioration et l'ajustement des modèles, et ont ainsi fortement renforcé la confiance dans les projections des modèles, notamment sur l'impact du CO₂. Dans le cas du SRM, on a beaucoup moins de recul et peu d'observations pour tester les modèles. La seule perturbation observée qui s'approche de l'effet du SRM, en particulier celui du SAI, est l'éruption volcanique. Cependant cette analogie est moins pertinente pour la question de l'impact climatique à long-terme du SRM à l'échelle régionale. En effet, une grande éruption correspond typiquement à une seule injection stratosphérique avec un impact climatique transitoire de quelques années typiquement, alors que le SAI correspondrait à une injection stratosphérique continue sur des temps longs et donc à un impact climatique beaucoup plus profond, avec certainement un rôle accru de la circulation océanique dans la réponse climatique régionale et des rétroactions lentes associées. Cela dit, une partie (mais une partie seulement) des mécanismes responsables des incertitudes sont communs entre le réchauffement climatique et le SAI et peuvent donc se compenser.

3.2. Abrupt réchauffement climatique en cas d'arrêt du SRM

Comme pour les mesures de réduction de CO₂, le SRM devra être déployé et maintenu en continu pendant une longue période pour être efficace. Cependant, si le SRM devait soudainement cesser pour une raison quelconque, le climat reviendrait rapidement sur la trajectoire qu'il aurait dû prendre sans le déploiement du SRM avec mécaniquement un réchauffement brutal. Il n'y a aucun doute sur ce rattrapage climatique rapide en cas d'arrêt du SRM quel que soit la technologie employée. En effet, le même phénomène se produit environ un an après une éruption volcanique qui injecte une grande quantité de soufre dans la stratosphère. Dans un premier temps, l'augmentation initiale de la charge en aérosols stratosphériques soufrés refroidit globalement la surface. Le déploiement du SRM s'apparenterait à cette première phase volcanique. Puis, dans un 2^{ème} temps, typiquement un an après l'éruption, la charge en aérosols stratosphérique commence à revenir vers son niveau de fond (d'avant l'éruption volcanique) car les aérosols volcaniques sont lentement éliminés de l'atmosphère par sédimentation gravitationnelle. On observe alors un réchauffement de la surface avec un retour des températures vers des valeurs pré-volcaniques en quelques années. L'interruption du SRM s'apparenterait à cette deuxième phase volcanique. Selon l'intensité du SRM appliqué précédemment, l'arrêt du SRM pourrait même causer des modifications climatiques du même ordre que l'actuel réchauffement mais sur des échelles de temps beaucoup plus courtes.

La capacité du SRM d'impacter fortement le climat très rapidement, en moins d'un an, a toujours été l'un de ses avantages. L'idée est d'utiliser le SRM comme un système d'urgence capable de ralentir le réchauffement global sur des temps courts si nécessaire. Par contraste, les temps d'action des

changements de GES sont beaucoup plus longs. Par exemple, même si les concentrations des GES se stabilisaient aujourd'hui, la température de la Terre continuerait à augmenter bien au-delà d'une décennie du fait de la chaleur excédentaire stockée dans l'océan. Ce temps d'action court du SRM, si intéressant avant déploiement, devient un risque une fois que système est déployé. Ce risque est inhérent au SRM et est une des inquiétudes majeures sur son déploiement. Il est de nature bien différent du risque sur la réponse climatique régionale qui est lié aux incertitudes sur les mécanismes et impacts régionaux du SRM sur le long terme. Le risque d'arrêt du SRM dans le futur est essentiellement lié aux incertitudes sur le contrôle et la gouvernance du SRM, ou même des conséquences inattendues du SRM qui obligeraient à le stopper. A ce stade, il n'est pas possible d'évaluer ce risque.

3.3. Des impacts indésirables spécifiques à certaines approches

Les risques discutés précédemment (impact climatique régional, rattrapage climatique) sont liés au mécanisme général d'action du SRM et dépendent peu de la technologie employée. D'autres risques sont plus spécifiques à la technologie utilisée. Dans le cas de le SAI, des impacts délétères ont été clairement identifiés. L'un des impacts avérés est la destruction de l'ozone stratosphérique par les injections d'aérosols soufrés. Il est observé lors d'une large injection de soufre dans la stratosphère par une grande éruption volcanique. Les modèles permettent d'estimer avec une certaine confiance la destruction d'ozone stratosphérique selon la quantité d'aérosols soufrés injectés dans la stratosphère. L'impact du SAI sur l'ozone pourrait être minimisé en injectant des aérosols qui ne sont pas des sites de chimie destructrice d'ozone, par exemple des aérosols de carbonate de calcium mais cela reste à confirmer.

Comme les SAI visent à réfléchir le rayonnement solaire incident, ils modifient directement les flux solaires à la surface et peuvent donc impacter les systèmes qui en dépendent (par ex. énergie photovoltaïque, agriculture, écosystèmes naturels). Ces effets directs semblent plutôt faibles au premier ordre, ils peuvent être délétères (moindre quantité de rayonnement) ou bénéfiques (plus de rayonnement diffus pour les écosystèmes). Il est aussi possible que l'agriculture et les écosystèmes naturels soient beaucoup plus impactés par les perturbations des précipitations que pourrait engendrer le SRM.

4. Enjeux pour la recherche sur les SRM aux États-Unis

4.1. Quelques programmes de recherche en cours

Les financements fédéraux pour soutenir une recherche fondamentale dans le domaine sont très faibles. Ils sont généralement attribués aux agences gouvernementales de recherche au cours des dernières années. La *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) est celle qui en a le plus bénéficié avec environ 13 M\$ sur les 2 dernières années. Ce n'est pas surprenant car la NOAA est un des leaders mondiaux de la recherche sur la stratosphère et les technologies SAI sont les mieux maîtrisées sur le plan scientifique et technique. Les technologies MCB et CCT sont beaucoup plus spéculatives. L'un des grands programmes récents de la NOAA vise à étudier les processus stratosphériques en lien avec le SAI⁵⁸.

Un autre grand programme, coordonné par l'Université de Washington et financé en partie par des fondations, vise à étudier les interactions aérosols-nuage en lien avec MCB⁵⁹. On peut aussi citer un

58 <https://www.sciencemag.org/news/2020/01/us-geoengineering-research-gets-lift-4-million-congress>

59 https://faculty.washington.edu/robwood2/wordpress/?page_id=954

projet du *Pacific Northwest National Laboratory* financé par la *Defense Advanced Research Projects Agency*⁶⁰. Ces programmes peuvent certainement aider à mieux comprendre les mécanismes et effets du SAI ou du MCB. Néanmoins, il ne s'agit pas seulement de développer des technologies SRM mais surtout de développer les moyens d'observation et de modélisation de l'atmosphère permettant de résoudre des points bloquants dans notre compréhension et modélisation du SRM et, plus généralement, de l'évolution du climat, notamment les processus des aérosols, des nuages, des interactions aérosols-nuages, et de la stratosphère. Les responsables de ces projets soulignent constamment l'apport de ces recherches dans notre compréhension du système climatique et qu'elles ne représentent pas une quelconque forme d'approbation du déploiement des technologies SRM.

L'université d'Harvard a son propre programme de recherche sur le SRM financé en grande partie par des fondations et des philanthropes (*Harvard's Solar Geoengineering Research Program (SGRP)*⁶¹). Le projet le plus visible et contesté du groupe d'Harvard comprend une campagne atmosphérique d'expérimentation du SAI intitulée « *Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCoPEX)* »⁶². SCoPEX propose d'injecter quelques kilogrammes de carbonate de calcium dans la stratosphère à l'aide d'un ballon et de suivre les effets sur l'atmosphère, notamment sur l'ozone. Indépendamment de l'intérêt pour l'étude du SAI, cette expérience scientifique fournirait aussi des informations pertinentes sur l'évolution microphysique des panaches volcaniques ou de pyro-convection dans la stratosphère. La demande de vol ballon pour cette année vient d'être rejetée par l'organisme chargé du lancement du ballon en Suède suite à l'avis émis par un Comité consultatif de l'université d'Harvard spécialement mis en place pour accompagner SCoPEX. La raison évoquée est qu'il n'y a pas de consensus international clair sur l'opportunité de cette expérimentation SAI en atmosphère⁶³. Pourtant, le vol SCoPEX planifié en 2021 était un vol purement technique de test de la plateforme sans aucune injection de particules ou précurseurs dans l'atmosphère.

En termes de développement technique, la situation est différente en Europe où les recherches sur le SRM sont plus théoriques, centrées sur la modélisation, alors que plusieurs projets américains visent aussi à développer des systèmes d'injection d'aérosols et à préparer des campagnes de terrain (U. Washington, Harvard).

4.2. Une gouvernance de la recherche à préciser, dans un contexte de résistances aux expérimentations en plein air

Cette décision de reporter la campagne SCoPEX est aussi cohérente avec les recommandations du rapport de l'Académie nationale des sciences qui avait été chargée de mettre à jour l'évaluation de 2015 sur l'état des connaissances sur le SRM et de formuler des recommandations sur la façon d'établir un programme de recherche, sur les éléments à inclure, et sur les mécanismes pour régir cette recherche⁶⁴. Le rapport recommande d'investir fortement dans la recherche sur le SRM – notamment en modélisation

60 <https://doi.org/10.1002/2017JD026874>

61 <https://geoengineering.environment.harvard.edu/funding>

62 https://www.keutschgroup.com/scopex#h.p_Xru29Emo-OMw

63 <https://scopexac.com/news-and-updates/>

64 <https://doi.org/10.17226/25762>

et des campagnes de terrain centrées sur l'étude des processus de petite échelle, pour essayer de combler les lacunes de connaissances sur le SRM. Le programme ne devrait pas se limiter aux aspects scientifiques et techniques, l'éthique, la gouvernance et la perception publique du SRM devraient aussi être abordées. Idéalement, ce programme serait réalisé en partenariat avec d'autres nations et ne devrait pas en aucun cas être considéré comme une étape vers le déploiement du SRM.

Sur l'expérimentation en atmosphère des technologies SRM, le rapport pose plusieurs conditions. Toute expérimentation doit faire l'objet d'une évaluation des risques, d'une surveillance, et d'une sensibilisation du public. Une expérimentation ne devrait être réalisée que si elle permet d'obtenir des informations essentielles qui ne peuvent pas être obtenues par des expériences en laboratoire ou en observant des événements naturels. L'expérimentation en atmosphère ne serait pas autorisée si l'impact climatique n'était pas négligeable, ce qui écarte la possibilité de tester la réponse climatique au SRM à l'échelle régionale qui est pourtant l'une des principales incertitudes et risques du SRM. De fait, les conditions proposées, bien que ne répondant à aucune législation sur le sujet, sont nettement plus restrictives que par le passé avec des évaluations des projets devant plusieurs comités, ce qui rendrait l'expérimentation en atmosphère plus compliquée pour les scientifiques américains. Dans ce contexte, la campagne de terrain SCoPEX a peu de chances d'être approuvée car la gouvernance de la recherche en tant que telle avec les structures/comités d'évaluation, de décision, et de contrôle n'existe pas encore.

Il y a aussi la volonté de la part de certains scientifiques américains de structurer l'effort de modélisation en SRM à l'échelle nationale avec l'initiative *Geoengineering Modeling Research Consortium (GMRC)*⁶⁵ connecté mais néanmoins en marge de l'effort international de CMIP⁶⁶. Le GMRC se veut un forum de recherche et une plateforme permettant à ses membres de communiquer publiquement sur leurs travaux et les priorités de recherche, et d'avancer plus rapidement au niveau national, hors du cadre du GIEC.

5. Contexte, financement et gouvernance des approches SRM

5.1. Quelques auditions d'experts au Capitol et un rapport de l'académie des sciences

Il est difficile pour le responsable politique de se positionner sur le bien-fondé et le déploiement du SRM tant que les connaissances scientifiques ne permettent pas d'en évaluer les bénéfices et risques. Ce constat n'est pas récent et a amené le Congrès américain à lancer plusieurs initiatives (par ex. commissions parlementaires, rapports de synthèse, programmes de recherche) pour tenter une évaluation de la faisabilité et des conséquences possibles du SRM.

L'une des premières initiatives au niveau fédéral a été les auditions de scientifiques par le Comité Science et Technologie de la Chambre des Représentants⁶⁷, en partie en résonance de celles du Comité Science et Technologie de la Chambre des Communes en Grande-Bretagne⁶⁸. A cette époque, le regain d'intérêt pour le SRM avait été attisé par le rapport emblématique de la *Royal Society* (Grande-Bretagne) sur la géo-ingénierie qui, entre autres, avait fait un état des lieux en recherche et avait proposé un ensemble de principes pour la gouvernance de la recherche (par ex. réglementation, transparence,

65 <https://www.cgd.ucar.edu/projects/gmrc/>

66 <https://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/>

67 <https://www.congress.gov/congressional-report/111th-congress/house-report/698>

68 <https://publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf>

approbation publique, collaborations internationales)⁶⁹. Par la suite, un autre jalon important aux États-Unis a été la synthèse sur le SRM réalisé par l'Académie Nationale des Sciences à la demande du gouvernement américain et de grandes agences fédérales de recherche⁷⁰. Dans le prolongement du rapport de 2015, l'Académie nationale des sciences a récemment organisé la rédaction d'un rapport sur le SRM pour déterminer les besoins en recherche et définir les contours possibles de sa gouvernance, et notamment recommander des approches de régulation de la recherche sur les technologies SAI, MCB et TTC⁷¹.

La motivation première invoquée pour le SRM est souvent la nécessité de minimiser les impacts et risques du changement climatique actuel dans le cas où le déploiement des stratégies d'atténuation ne soit pas suffisamment effectif et/ou rapide. Néanmoins, l'enjeu n'est pas uniquement environnemental. Il y a un élément sous-jacent de sécurité nationale pour les autorités américaines, avec en ligne de mire l'hypothèse d'un déploiement incontrôlé du SRM qui pourrait avoir des effets indésirables et générer des situations de conflits⁷². Les États-Unis préféreraient certainement orienter les réflexions et prendre le leadership dans la négociation d'accords pour une gouvernance internationale. A terme, le Congrès pourrait envisager de réglementer les technologies SRM. Notons qu'aucun pays n'a jusqu'à présent mis en place de réglementations spécifiques sur le sujet.

5.2. Une opposition au déploiement du SRM qui persiste

Les impacts délétères avérés, les incertitudes, et les risques potentiels associés expliquent en grande partie pourquoi le SRM est un sujet controversé aux États-Unis. Certaines ONG environnementales s'opposent aux SRM mais également à la recherche sur le sujet. Elles considèrent que tout investissement dans le SRM compromet la motivation et les efforts des stratégies d'atténuation contre le changement climatique. A ce stade, le lobbying de certaines ONG contre l'expérimentation en atmosphère semble avoir un certain succès et la nouvelle administration américaine devrait rester à leur écoute. A l'inverse, il y a quelques initiatives de R&D sur le SRM qui se sont structurées en ONG, comme le *Arctic Ice Project*⁷³ ou *SilverLining*⁷⁴, et qui soutiennent ouvertement la recherche sur le sujet. Dans l'état actuel des connaissances, aucune ONG ne semble soutenir le déploiement de technologies SRM sans un effort considérable de recherche amont.

Les résistances auxquelles ces approches sont confrontées sont certainement l'une des causes de l'absence de support pour un déploiement SRM aux États-Unis et de la faiblesse relative des programmes de recherche. À ce stade, rien n'est envisagé pour les SRM en termes de développement technologique, de développement industriel avec l'installations de pilotes ou de législation.

5.3. Des financements pour la recherche très limités

En comparaison avec le CCUS et, dans une moindre mesure, avec les NBS, les financements fédéraux pour le SRM sont très faibles. Même les auditions parlementaires de scientifiques en 2009 et 2010⁷⁵ ont eu peu de suite en termes de financement fédéral. L'une des recommandations fortes du rapport 2021 de l'Académie Nationale des Sciences est une enveloppe fédérale d'environ 100-200 M\$

69 <https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2009/geoengineering-climate/>

70 [Climate Intervention - Reflecting Sunlight to Cool Earth, NASEM, 2015](https://www.nas.edu/publications/2015/04/01/Climate-Intervention-Reflecting-Sunlight-to-Cool-Earth)

71 <https://doi.org/10.17226/25762>

72 <https://ncjolt.org/wp-content/uploads/sites/4/2021/04/NCJOLT-Vol.-22.3-487-526-Doswell.pdf>

73 <https://www.arcticiceproject.org/>

74 <https://www.silverlining.ngo/>

75 <https://www.congress.gov/congressional-report/111th-congress/house-report/698>

pour la recherche SRM sur les 5 ans à venir⁷⁶. A ce stade, il est difficile de savoir si la nouvelle administration américaine et la majorité démocrate au Sénat prendront en compte cette recommandation. Dans l'ensemble, le SRM ne semble pas être un enjeu industriel ou économique aux États-Unis, ou du moins beaucoup moins prégnant que dans le cas du CCUS et du NBS. Les arbitrages budgétaires au niveau fédéral vont certainement continuer à favoriser très fortement le CCUS et le NBS et les financements sur le SRM resteront marginaux.

A l'heure actuelle, l'essentiel de la R&D sur le SRM est financé par des organismes publics et des fondations/philanthropie (ex : [Solar Radiation Management Governance Initiative \(SRMGI\)](#)⁷⁷, *Harvard's Solar Geoengineering Research Program*⁷⁸ (SGRP)). La recherche est presque entièrement menée dans les universités. Comme pour les financements publics, les scientifiques sont en compétition pour capter l'attention des philanthropes. Les investisseurs privés sont quasi-inexistants. Dans l'ensemble, contrairement au CCUS et NBS, le secteur privé joue un rôle très anecdotique avec quelques dépôts de brevets vaguement liés aux technologies SRM mais qui sont, pour la plupart, abandonnés ou expirés⁷⁹. Il n'y a même pas un début d'embryon d'écosystème industriel ou financier du SRM.

On peut noter qu'il faudra au moins une décennie pour développer un système technique SAI dimensionné pour l'échelle globale avec des coûts de développements estimés à une dizaine de milliards de dollars. En réalité, les coûts finaux d'un tel système SRM seront certainement beaucoup plus élevés car il faudra inclure les coûts des systèmes de contrôle et de surveillance et anticiper des dépassements de budgets conséquents qui sont courants dans les grands projets publics⁸⁰. En outre, même si le SRM devait réduire l'impact du changement climatique à l'échelle globale, certains pays ou régions pourraient prétendre - à tort ou à raison - avoir été lésés par le déploiement du SRM et demander à être indemnisés.

5.4. L'immense défi de la gouvernance du SRM

Comme le SRM vise le climat à l'échelle globale, sa gouvernance devrait être internationale. Les risques liés à la gouvernance sont complexes et très difficiles à évaluer. L'un des dangers est qu'un pays ou un groupe de pays développe des technologies SRM et soit en position d'influencer le climat global unilatéralement. Évidemment, tout déploiement unilatéral du SRM représenterait un risque élevé de conflits. On peut aussi citer la question de la responsabilité des conséquences potentiellement délétères du SRM. Pour ces raisons, la problématique de la gouvernance au sens large du terme (ex. législation/réglementation, organisme décisionnaire, contrôle, responsabilités) devrait être résolue avant d'envisager le déploiement du SRM. Il y a de multiples aspects à aborder (scientifiques, technologiques, environnementaux, économiques, politiques, éthiques) et la dimension internationale du SRM complexifie considérablement la construction de cette gouvernance, comme l'illustrent les négociations sur le protocole de Kyoto. En résumé, la gouvernance du SRM est un défi immense.

6. L'avenir du SRM aux États-Unis demeure très incertain

La stratégie SRM est radicalement différente de celle du CCUS ou du NBS. Elle vise non pas la cause première du réchauffement global, qui est l'augmentation des concentrations atmosphériques des

76 <https://doi.org/10.17226/25762>

77 <https://www.srmgi.org/decimals-fund/>

78 <https://geoengineering.environment.harvard.edu/funding>

79 <https://scholarship.law.umn.edu/mjlst/vol18/iss1/1/>

80 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016EF000416>

gaz à effet de serre, mais plutôt le déséquilibre radiatif positif qui résulte de cette augmentation des gaz à effet de serre, en particulier du CO₂. Le SRM a un potentiel (seulement avéré sur certaines technologies) à réduire l'augmentation de température et à atténuer certains effets du changement climatique actuel. Néanmoins, les américains considèrent que le déploiement de telles technologies introduirait aussi des incertitudes et des risques potentiels nouveaux tels que des impacts climatiques incertains à l'échelle régionale, un abrupt réchauffement climatique en cas d'arrêt du SRM, et des impacts indésirables spécifiques à certaines technologies SRM. Ces risques sont à l'origine d'une forte opposition au déploiement.

Les activités sur le SRM aux États-Unis sont pour le moment cantonnées au domaine de la recherche avec une gouvernance à construire, notamment face aux résistances aux expériences en plein air. Par rapport au CCUS et NBS, les budgets de R&D sont très faibles et proviennent uniquement des organismes publics et des fondations/philanthropie ; les investisseurs privés sont quasi-inexistants. Le financement fédéral de la recherche SRM est actuellement de l'ordre d'une dizaine de millions de dollars par an mais l'académie américaine des sciences a recommandé de passer à 20-40 M\$/an sur les 5 prochaines années.

Parce que le SRM vise le climat à l'échelle globale, les responsables américains rencontrés semblent souhaiter une gouvernance internationale. Les risques liés à la mise en place de cette gouvernance sont complexes et très difficiles à évaluer face à la multitude des questions à aborder : scientifiques, technologiques, environnementaux, économiques, politiques, éthiques. Pour certain, la négociation d'une gouvernance du SRM représente un défi immense.

AUTRES ENJEUX ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT D'INTERVENTIONS SUR LE CLIMAT AUX ÉTATS-UNIS

1. L'arrêt de l'utilisation du terme impropre de géo-ingénierie

Un consensus fort a émergé à l'issue de nos entretiens : les différents acteurs américains ne font plus usage du terme géo-ingénierie dans la mesure où ce mot valise englobe un spectre trop large de techniques et d'approches qui sont fondamentalement différents. Ce positionnement est en accord avec le consensus scientifique qui tend à clairement séparer les approches avec d'une part les techniques de captage, d'utilisation et de stockage du CO₂, les techniques fondées sur la nature et d'autre part les techniques non-conventionnelles (n'étant pas incluses dans les trajectoires d'atténuation évaluées par le GIEC). Nous ne pouvons que recommander l'abandon du terme géo-ingénierie dans les discussions futures avec les parties prenantes et d'y préférer la terminologie du GIEC reflétée dans ce rapport.

2. Une interrogation quant à la durée du stockage

Une question fondamentale posée par les NBS pour le captage du carbone est celle de l'horizon temporel considéré. En effet, à l'inverse des solutions de captage associé au stockage géologique qui a priori stockent le carbone sur des périodes très longues, le stockage par les sols ou la biomasse est a priori transitoire. De plus, ce stockage dépend de conditions exogènes futures comme le climat et l'utilisation des terres qui sera mis en place ultérieurement. Un point commun aux différentes approches est de considérer un horizon minimum d'une décennie. C'est-à-dire qu'on doit s'assurer que le carbone capturé l'est au moins sur un horizon de 10 ans. Il s'agit évidemment d'un minimum mais celui-ci est très court au regard des constantes de temps du système climatique. Le rapport du GIEC montre en effet de grandes incertitudes sur l'horizon temporel du stockage. Bien que la question ne soit pas abordée dans ce que proposent les différents acteurs, cela pose à terme la question d'un prix de la tonne de carbone qui pourrait varier suivant l'horizon temporel du stockage considéré.

Une autre question posée par les NBS pour le captage du carbone est celle du possible conflit avec les autres services écosystémiques. Les solutions associées aux pratiques agricoles ont l'avantage, par rapport à la production de biocarburant, de ne pas rentrer a priori en opposition avec la production agricole, voire d'être bénéfique en améliorant, par exemple, la qualité des sols. Par contre la reforestation, si elle est étendue sur des zones actuellement agricoles peut être en rivalité. De même des pratiques optimisées pour le stockage du carbone peuvent impacter la biodiversité ou d'autres services par exemple de la qualité de l'eau, de service récréatif etc.

3. Le rôle décisif des fondations et des investisseurs privés

De très nombreux acteurs économiques et industriels aux États-Unis ont annoncé ces derniers mois leur volonté d'atteindre, à plus ou moins brève échéance, une neutralité carbone ou autres objectifs environnementaux. Ces annonces, qui ne sont pas des engagements, devraient favoriser l'émergence d'un marché de crédits carbone significatif. Ces flux devraient permettre de soutenir et financer certains projets utilisant la nature NBS ou le développement de complexes industriels pour le CCUS.

Par ailleurs, les fondations liées aux plus grandes fortunes mondiales annoncent leurs programmes de financements de projets qui couvrent l'ensemble du spectre des solutions pour le climat. A titre d'exemple, Elon Musk, fondateur de Tesla et l'une des personnes les plus riches du monde, a promis 100 M\$ pour la solution qui permettrait de capter le plus efficacement le CO₂ de l'atmosphère. Jeff Bezos, le fondateur d'Amazon s'est engagé à donner 10 Mds\$ à des initiatives climatiques dont le captage du carbone et les approches utilisant la nature. *Carbon Engineering*, la société proposant une solution de captage directe du carbone, a été initialement soutenue par la Fondation Gates.

Nom du projet	Financier	Technologie	Montant (USD)	Description
<i>Carbon Engineering</i>	Fondation Gates	<i>DAC</i>	nc	
<i>X Prize for Carbon Removal</i>	Musk Foundation	<i>DAC et NBS</i>	100 millions	
<i>The Restore Fund</i>	Apple, Conservation International	NBS	200 millions	Solutions Fondées sur la Nature visant à éliminer 1 million de tonnes de CO ₂ atmosphérique
<i>Nature Conservancy</i>	Bezos Earth Fund	NBS	100 millions	(c'est essentiellement ce fond qui va concerner les projets de stockage du carbone)
<i>World Wildlife Fund</i>	Bezos Earth Fund	NBS	100 millions	
<i>Environmental Defense Fund</i>	Bezos Earth Fund	NBS	100 millions	

Tableau 5 - Quelques exemples de financements.

4. L'influence des think-tanks et des organisations non gouvernementales.

4.1. Une augmentation marquée de l'activité des think-tanks sur les CDR et SRM.

Au cours de ces dernières années, les think-tanks américains ont multiplié les initiatives et les groupes de travail traitant des politiques publiques de décarbonation de l'économie et du potentiel des approches d'intervention sur le climat.

Les think-tanks traditionnels et très influents, comme la *Brooking Institution* ou le *Center for Strategic and International Studies* font référence aux approches d'intervention sur le climat au sein de travaux plus globaux sur les politiques d'atténuation climatique. A noter les trois initiatives de la *Brooking Institution* qui relèvent de la thématique du climat :

- Le *Climate and Energy Economics Project (1997)* ;

- La *Energy Security and Climate Initiative* (2007) ;
- La *Brooking Initiative on Climate Research and Action* (2016).

Pour sa part, le *Center for Strategic and International Studies* (CSIS) travaille sur le changement climatique avec un accent sur les questions énergétiques, à travers différents projets intitulés : *Climate Solutions Series*, *Energy Transitions: Low-Carbon Pathways for Growth and Sustainability*, *Climate Smart Foreign Policy*, *[re]GENERATION*. En 2020 et 2021, le CSIS a organisé les *Climate Solutions Series* : 6 événements pour explorer les différentes voies de décarbonation de l'économie américaine, dont les technologies de *Carbon Dioxide Removal*.

Par ailleurs, le très actif *Atlantic Council Global Energy Center* alimente la réflexion sur les solutions à émissions négatives dans le cadre de son *Energy Source Innovation Stream*. D'autres think-tanks produisent des analyses plus approfondies sur le rôle des technologies à émissions négatives et approches d'intervention sur le climat. Le *World Resources Institute* intègre le volet *Carbon Removal* dans son *U.S. Climate Program* et développe des recommandations politiques dans le cadre de sa série *CarbonShot: Federal Policy Options for Carbon Removal in the United States*.

Enfin, de multiples organisations dont le plaidoyer se centre exclusivement sur les enjeux liés aux approches d'intervention sur le climat ont vu le jour ces dernières années. Par exemple, le *Carnegie for Climate Governance*, très actif, vise à "établir des politiques efficaces de gouvernance des technologies d'altération du climat, en particulier sur les technologies de modification du rayonnement solaire et de captage du dioxyde de carbone atmosphérique". Le think-tank *Carbon180* s'implique et anime la *New Carbon Economy Initiative*.

Encadré 3 - Le *New Carbon Economy Consortium* s'installe dans le paysage afin de faire progresser la réflexion autour des approches d'intervention sur le climat: une réseau réunissant think-tanks, industriels et universités américaines

Le *New Carbon Economy Consortium* a pour mission de "repenser l'approche carbone des politiques publiques". Il regroupe un ensemble de think-tanks et d'universités dont *Carbon180*, *Energy for the Future*, *Arizona State University*, le *Lawrence Livermore National Laboratory*, *Columbia University* entre autres. Elle vise à faire évoluer la pensée carbone vers une vision "déchet" plutôt que "externalité négative" et soutient le financement des approches de captage du carbone, technologiques ou naturelles. L'essentiel des recherches menées dans le cadre de cette initiative traite des aspects réglementaires et économiques comme la taxation carbone ou la création de standards relatifs à la séquestration du carbone dans les sols.

4.2. Des priorités différentes en fonction des think-tanks

La majorité des experts s'accordent sur la nécessité de disposer d'un portefeuille diversifié de solutions et non d'une technologie unique. Cependant, les think tanks affichent des enjeux et des priorités parfois très différentes, souvent en fonction de l'origine de leurs soutiens financiers.

A titre d'exemple, le *Global CCS Institute* fait du lobbying en faveur des technologies de CCUS depuis 2009. Ses recherches sur les technologies à émissions négatives se concentrent exclusivement les technologies de captage directe dans l'air (DAC) ou de bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS). Les solutions fondées sur la nature n'y sont jamais mentionnées. *ClearPath* s'inscrit dans la même ligne pro-technologie.

Pour leur part, les ONG comme *Conservation International* ou *Nature Conservancy* interviennent régulièrement au Congrès ou dans les séminaires pour démontrer le potentiel de captage du carbone par les solutions fondées sur la nature.

Des think-tanks comme le *World Resources Institute*, *Carbon180* ou *Energy Future Initiative* semblent évaluer, de manière plus exhaustive, les approches disponibles au regard des avancées scientifiques et technologiques. Les solutions sont comparées en fonction de leur faisabilité technique et leur potentiel dans l'atteinte des objectifs carbone.

5. Budget fédéral 2022 : des centaines de M\$ en discussion

Le 28 mai 2021, l'administration Biden a publié sa demande de budget pour l'exercice 2022. Le budget en négociation au congrès sera voté à l'automne 2021 mais les documents fournis par la Maison Blanche font ressortir la volonté de soutenir des programmes pour le captage et stockage portés par le Département de l'Énergie et le Département de l'Agriculture. Dans une certaine mesure, ces inflexions proposées s'alignent sur les objectifs inscrits dans la loi de programmation *Energy Act of 2020*.

5.1. Le rôle stratégique du Département de l'Énergie

Le DOE verrait son budget porté à 46.1 Mds\$, soit une augmentation de 4.3 Mds\$ en 2022 pour soutenir le développement des énergies propres. Le Bureau des sciences bénéficierait de 400 M\$ supplémentaires pour atteindre un budget de 7.4 Mds\$. L'idée est de mettre davantage l'accent sur les sciences du climat, la recherche sur les nouveaux matériaux et la modélisation des prédictions, entre autres domaines. 1 Mds\$ renforcerait le programme existant et populaire qui soutient les innovations à fort potentiel, l'*Advanced Research Projects Agency-Energy* (ARPA-E) mais également un nouvel instrument dédié aux solutions pour le climat : l'*Advanced Research Projects Agency for Climate* (ARPA-C), financé par une enveloppe du plan infrastructure (voir paragraphe suivant). Pour sa part, l'*Office for Fossil Energy* serait renommé *Office for Fossil Energy and Carbon Management*, en appui de la politique de décarbonation de l'économie américaine. Concernant le financement des projets de recherche CCUS, les lignes budgétaires votées par le Congrès sont encadrées par l'*Energy Act of 2020*, détaillé dans le chapitre CCUS. Les négociations en cours pourraient converger vers un budget R&D de 150 M\$ pour le captage, 117 M\$ pour le stockage et 38 M\$ pour l'utilisation du carbone.

Dans son document *Budget in Brief*, le DOE propose d'étendre la recherche sur le captage du carbone au-delà de son application aux centrales électriques au charbon.⁸¹ Par ailleurs, le budget 2022 établit une nouvelle ligne budgétaire de 63.5 M\$ intitulée *Carbon Dioxide Removal*. Le DOE élargirait ainsi ses activités de R&D sur un portefeuille plus large de technologies d'élimination du CO₂ : captage direct dans l'air (DACCS), bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS), minéralisation du carbone, techniques de séquestration par les sols (ex : gestion améliorée des forêts, reboisement et afforestation) et captage de carbone par les écosystèmes côtiers ou zones humides.⁸²

81 <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/doe-fy2022-budget-in-brief-v4.pdf>

82 <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/doe-fy2022-budget-in-brief-v4.pdf>

Programme	Budget 2021 promulgué (M\$)	Budget 2022 proposé par l'administration Biden (M\$)	Autorisations 2022 encadrées par la loi programmatique <i>Energy Act of 2022</i> (M\$)
<i>Carbon Capture</i>	126.3	150.0	1 030.0
<i>Carbon Utilization</i>	23.0	38.0	55.3
<i>Carbon Storage</i>	79.0	117.0	200.0
<i>Sous-total</i>	228.3	305.0	1 285.0
<i>Carbon Dioxide Removal</i>	n/a	63.0	63.5
Total	228.3	368.0	1 348.8

Tableau 6 - Evolution budgétaire des financements CCUS au DOE.

5.2. Le Département de l'Agriculture

Au Département de l'Agriculture, le budget 2022 prévoit 4 Mds\$, soit 647 M\$ de plus que le niveau adopté pour 2021, pour les programmes de recherche, d'éducation et de vulgarisation de l'USDA. Ces investissements dans la recherche agricole feront progresser l'innovation et l'application d'outils fondés sur la science et les données pour mettre les technologies américaines entre les mains des agriculteurs. En outre, la demande discrétionnaire prévoit 161 M\$ pour une initiative multi-agences destinée à intégrer des outils scientifiques dans la planification de la conservation afin de mesurer, surveiller, et de vérifier le stockage du carbone, la réduction des gaz à effet de serre, l'intendance de la faune et de la flore, et d'autres services environnementaux au niveau de l'exploitation agricole et sur les terres fédérales.

6. Une enveloppe de 15 milliards du plan infrastructure devrait soutenir l'industrie de captage, transport et stockage du carbone.

Fin juillet 2021, une première étape est franchie au Congrès quand la Chambre des Représentant adopte certaines des grandes lignes de l'«*infrastructure plan*» proposé par la Maison Blanche. Ces lignes sont inspirés du plan économique porté par l'administration Biden *Build Back Better*. Le 10 août 2021, le Sénat adopte une version différente du projet *infrastructure plan*. Cette nouvelle version devrait être adoptée dans les mêmes termes pour entrer en vigueur.

A ce stade des négociations, le projet de 1 200 Mds\$ d'investissements comprend plusieurs lignes budgétaires qui ciblent précisément les CCUS et NBS :

- L'État fédéral débloquerait 2.5 Mds\$/an jusque 2026 pour la mise à l'échelle et la commercialisation des projets CCUS. Dans cette enveloppe, 310 M\$ sur cinq ans seraient offerts aux États fédérés et aux entités publiques pour qu'ils accordent des subventions à leurs projets CCUS locaux et plus de 500 M\$ supplémentaires pour l'ingénierie des projets ;
- Un financement de 2.1 Mds\$ pour les projets de transport de capture du carbone, essentiellement des pipelines de CO₂ pour transporter le gaz à effet de serre du point de capture aux sites de stockage éventuels. Le gouvernement pourrait financer jusqu'à 80 % des projets approuvés ;
- Le Département de l'intérieur est chargé d'accepter les demandes de projets de démonstration régionaux de captage direct du carbone dans l'air. Le ministère financera ensuite quatre de ces projets qui pourraient éliminer un million de tonnes de CO₂ par an ;
- La création de 10 systèmes de captage de carbone sur des sites industriels historiques reconvertis;

- Une extension du crédit d'impôt 45Q en soutien au développement de l'industrie CCUS ; Des discussions sont en cours au Congrès pour augmenter le crédit d'impôt 45Q de 50 à 120\$/tCO₂ dans le cas du DAC⁸³ ;
- La mise à disposition de 10 Mds\$ pour le projet de création *Civilian Climate Corps* dont l'une des missions sera la conduite d'opération de restauration des écosystèmes. Ces opérations restent encore à définir, mais les premières déclarations montrent que ces opérations seront conduites avec une perspective d'augmentation de la séquestration carbone par la biomasse sur le territoire national.
- Une partie encore non précisée de ce financement servirait à créer l'*Advanced Research Program Agency - Climate* (ARPA-C) sur le modèle de l'ARPA-Energy. Le modèle ARPA soutient le développement d'innovations de rupture en reportant le risque financier sur l'État fédéral. Selon l'administration, la nouvelle agence "élaborera de nouvelles méthodes pour réduire les émissions, renforcer la résilience climatique et augmentera le financement général de la recherche sur le climat".

7. Le développement de l'industrie du CCUS ne fait pas l'unanimité aux États-Unis.

Comme analysé dans ce rapport, les États-Unis sont parmi les leaders mondiaux de la filière CCUS, en partie grâce à des investissements massifs en RD&D et à la force de leur industrie pétrolière, qui maîtrise les technologies nécessaires pour le stockage géologique. L'usage principal envisagé est de capter et de stocker les émissions associées aux combustibles fossiles – charbon, pétrole et gaz – (CCUS) mais aussi, plus marginalement, de générer des émissions dites « négatives » par le captage direct dans l'air (DAC) ou sur des installations utilisant de la biomasse (BECCS). In fine, l'objectif est davantage la neutralité carbone à l'horizon 2050 que la réduction des émissions par la limitation ou la conversion des actifs émetteurs (la réduction de la consommation énergétique est un non sujet aux USA).

A titre de comparaison, l'Europe fait le choix de se désengager des fossiles dans le domaine de l'énergie, et d'utiliser la technologie de captage et de stockage de CO₂ sur les installations industrielles, hors domaine de l'énergie, et à la génération d'« émissions négatives ».

Cette stratégie américaine est aujourd'hui critiquée par de nombreuses associations, en particulier de la société civile. Ce 19 août 2021, plus de 500 organisations se sont associées pour envoyer des lettres aux Président Joe Biden et au Premier Ministre Justin Trudeau et demander l'arrêt du soutien au Captage et au Stockage du CO₂, en particulier quand le CO₂ est utilisé pour la récupération assistée d'hydrocarbures.

Si ces processus industriels (CCUS, DACCS, BECCS) ont de nombreuses briques technologiques en commun, les États-Unis distinguent les processus visant à réduire leurs émissions de CO₂ de ceux visant à éliminer le CO₂ de l'atmosphère. De plus en plus d'acteurs publics ou privés qualifient les techniques d'élimination du carbone d'*émissions négatives* qui font l'objet de l'élaboration d'un cadre réglementaire

83 <https://smithsenate.app.box.com/s/yirdlay74ae3aacduz5ynfhdfef8oivks>

spécifique. Ainsi, le 13 juillet 2021, le Congrès californien amendait le *California Climate Crisis Act* en clarifiant juridiquement la notion de captage de carbone à la source et le captage direct depuis l’atmosphère et en distinguant les techniques de « réduction de l’intensité CO₂ » et « d’élimination du CO₂ ». Cette distinction ouvre la voie à des instruments et des financements différenciés en fonction des filières et de leurs cibles.

ANNEXE 1 – LISTE DES EXPERTS RENCONTRES

World Resources Institute (WRI) – 1er mars 2021

- [Karl Hausker](#), Senior Fellow, WRI ;
- [Carrie Dellesky](#), Engagement & Communications Manager, Carbon Removal, WRI
- [Katie Lebling](#), Associate in WRI's Climate Program, WRI
- [Alexander Rudee](#), Manager, U.S. Natural Climate Solutions, WRI

Clean Air Task Force et ClearPath – 1er mars 2021

- Lee BECK, CCUS Policy Innovation Director,
- [Jeremy Harell](#), Managing Director - Policy, [ClearPath](#)
- [Justin Ong](#), Program Director, ClearPath

Carbon180 – 2 mars 2021

- [Erin Burns](#), Executive Director, [Carbon180](#) ;
- Lucia Simonelli, Senior Policy Fellow focusing on Direct Capture Policy, Carbon180

Oxy Low Carbon Ventures - 2 mars 2021

- [Ryan Edwards](#), Low Carbon Policy Advisor, [Oxy Low Carbon Ventures](#)

MIT Energy Initiative – 3 mars 2021

- [Howard J. Herzog](#), Energy engineer, MIT Energy Initiative

CemVita Factory – 3 mars 2021

- Moji Karimi, Co-Founder and CEO, [CemVita Factory](#)
- Tara Karimi, Co-Founder and CTO, CemVita Factory

U.S. Department of Energy (DoE) – 4 mars 2021

- Mark Ackiewicz, Director for the Division of Emissions Controls and Carbon Capture, Utilization and Storage, U.S. DoE
- Lynn Brickett, Carbon Capture Program Manager, Office of Fossil Energy, U.S. DoE
- Darin Damiani, R&D Program Director, U.S. DoE
- Amishi Kumar, Carbon Utilization Program Manager, U.S. DoE
- Sarah Leung, Engineer, Office of Fossil Energy, U.S. DoE
- Scott M. Smouse, Senior Advisor in the Office of Clean Coal and Carbon Management, U.S. DoE
- Jarad Daniels, Director of Office of Strategic Planning, Analysis, and Engagement, Office of Fossil Energy, U.S. DoE
- Stephanie Hutson, Program Analyst, Division of Strategic Engagements, Office of Clean Coal and Carbon Management, U.S. DoE
- John T. Litynski, Deputy Director for Advanced Fossil Technology Systems, U.S. DoE
- Sarah Forbes, Scientist, Program Manager, Division of Mineral Sustainability, Office of Fossil Energy, U.S. DoE

CarboCulture – 5 mars 2021

- Henrietta Moon, CEO & Co-Founder, CarboCulture
- Chris Carstens, CTO & Co-Founder, CarboCulture
- Laurent Rains, Chief of Staff, CarboCulture

Nori – 5 mars 2021

- Paul Gambill, CEO, [Nori](#)
- Radhika Moolgavkar, Head of Supply Program, Nori

Keutsch Group (Harvard University) – 8 mars 2021

- Frank Keutsch, Principal Investigator of Keutsch Group, Harvard University

American University – 8 mars 2021

- [Simon Nicholson](#), Associate Professor, School of International Service, American University

Keith Group (Harvard University) – 9 mars 2021

- [David Keith](#), Professor of Applied Physics, Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

Climate Action Reserve – 9 mars 2021

- [Sami Osman](#), Policy Director, Climate Action Reserve
- [Sarah Wescott](#), Forestry Tiger Team Senior Manager, Climate Action Reserve

UC Berkeley – 9 mars 2021

- [Matthew D Potts](#), UC Berkeley
- [Daniel L. Sanchez](#), UC Berkeley

Cary Institute – 10 mars 2021

- [William Schlesinger](#), Cary Institute for Ecosystems studies.

Saratoga Energy – 10 mars 2021

- Andrew Reid, CEO, Saratoga Energy

Princeton University – 11 mars 2021

- [Stephen Pacala](#), Directeur de la [Carbon Mitigation Initiative](#), [High Meadows Environmental Institute](#), Princeton University

National Oceanic and Atmospheric Administration – 12 mars 2021

- Craig McLean, Assistant Administrator for Oceanic and Atmospheric Research and Acting NOAA Chief Scientist.
- Ko Barrett, Deputy Assistant Administrator for Programs and Administration for Oceanic and Atmospheric Research

- David W. Fahey, Director of the [Chemical Sciences Laboratory](#) in the National Oceanic and Atmospheric Administration in Boulder, Colorado
- Wayne Higgins, Director of the [Climate Program Office](#) (CPO) within NOAA's Office of Oceanic and Atmospheric Research
- Gregory Frost, Supervisory Research Chemist at the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Chemical Sciences Laboratory (CSL) in Boulder, Colorado
- Jessica N. Cross, Research oceanographer with the NOAA [Pacific Marine Environmental Laboratory](#) in Seattle, WA
- Ariel Stein, Supervisory Physical Scientist working at NOAA's [Air Resources Laboratory](#) (ARL)
- Libby Jewett, Founding Director of the NOAA [Ocean Acidification Program](#)
- Benjamin DeAngelo, Deputy Director of the Climate Program Office within NOAA's research arm, serves as NOAA Principal to the U.S. Global Change Research Program (USGCRP), and serves as the U.S. head of delegation for the Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP)

Union of Concerned Scientists – 16 mars 2021

- [Peter Frumhoff](#), Director of Science and Policy and Chief Climate Scientist, UCS
- [Rachel Licker](#), Senior Climate Scientist, UCS
- [Rachel Cleetus](#), Policy Director, UCS
- [Brenda Ekwurzel](#), Senior Climate Scientist, Director of Climate Science, UCS

Betty and Gordon Moore Center for Science – 18 mars 2021

- [David Hole](#), Vice President, Global Solutions, Moore Center For Science
- Starry Sprenkle-Hyppolite, Restoration Science Director, Moore Center for Science

ANNEXE 2 – TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 - Emissions mondiales de CO ₂ dans quatre trajectoires d'atténuation caractéristiques compatibles avec l'objectif de 1,5 °C avec différents degrés de recours à la séquestration par les écosystèmes et aux émissions négatives via la technique de bioénergie avec captage et séquestration de carbone (BECCS). Source : figure adaptée du rapport SR15 de l'IPCC 2018.	15
Figure 2 - Scénario faisant intervenir un hypothétique déploiement de techniques de modification du rayonnement solaire en combinaison avec des méthodes de captage et de stockage du CO ₂ pour éviter un dépassement de la limite de réchauffement à 1.5°C (scénario dit de peak shaving). Figure issue de De Coninck et al. (2018).	16
Figure 3 - Schéma conceptuel des différentes approches d'intervention climatique discutées dans ce rapport, allant de (a) techniques de captage, utilisation et stockage de carbone, (b) technique de retrait de carbone de l'atmosphère ou approches basées sur la nature et (c) approches non-conventionnelles basées sur la modification du rayonnement solaire. Cette Figure est issue de Lawrence et al. (2018). Des différentes approches présentées sur cette figure, seules les approches 5, 6, 8 et 12 ne sont pas discutées dans le présent rapport. Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H. et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. Nat Commun 9, 3734 (2018). https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3	22
Figure 4 Les différentes catégories et sous-catégories des interventions sur le climat. Les cases en rouges indiquent les approches discutées dans le rapport.	23
Figure 5 - Chaîne de valeur du Captage et du Stockage du CO ₂	26
Figure 6 - Les voies possibles pour l'utilisation du CO ₂ . Source : JM Energy Consulting, Inc. 2019	27
Figure 7 - Émissions de CO ₂ par secteur (gauche) et émissions de CO ₂ stationnaires par type d'industrie (droite) en GtCO ₂ /an.	28
Figure 8 - Niveau de maturité (TRL) des technologies CCUS : Captage, compression et transport, utilisation, stockage et récupération assistée de ressources (source : Meeting the dual challenge – A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage, NPC)	31
Figure 9 - Budget alloué par le DOE à la Recherche, Développement et Démonstration dans le domaine du CCUS, pour les programmes de Captage (bleu), Stockage (vert) et utilisation (jaune). Source : Department of Energy.	31
Figure 10 - Schéma conceptuel d'un dispositif de captage direct de CO ₂ dans l'air utilisant un solvant liquide (source Holmes et Keith, 2012)	33
Figure 11 - Allocations annuelles de financement fédérales américaines recommandées par l'Académie des Sciences pour la recherche, le développement, la démonstration et le déploiement de la technologie de captage directe du CO ₂ dans l'air.	34
Figure 12 - Les trois phases proposées par le NPC, visant au déploiement à l'échelle du CCUS (Meeting the Dual Challenge - A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage, NPC).	41
Figure 13 - Une évaluation globale du potentiel de séquestration du carbone par les différentes solutions basées sur la nature.	45

Figure 14 - Valorisation des offsets forestiers dans le marché réglementé California - Québec. Source : State of Forest Carbon Finance 202156

Figure 15 - Portefeuille de compensation carbone de Microsoft pour l'année 2021. Source : Microsoft.com56

Figure 16 - Volume mondial des crédits-carbone forestier par nationalité des acheteurs. Source : Ecosystem Marketplace, State of Forest Carbon Finance 202157

Figure 17 - Illustration des mécanismes impliqués dans l'injection d'aérosols stratosphériques (SAI), l'éclaircissement des nuages marins (MCB) et l'amincissement des nuages de type cirrus (CCT).60

ANNEXE 3 – ACRONYMES

CCS	Carbon Capture and Storage
CCT	Cirrus Cloud Thinning
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CO ₂	Dioxyde de carbone
DOA	Department of Agriculture
DOE	Department of Energy
EDC	Elimination du dioxyde de carbone
EGR	Enhanced Gaz Recovery
EOR	Enhanced Oil Recovery
EPA	Environmental Protection Agency
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
Mds\$	Milliards de dollars américains
M\$	Millions de dollars américains
MCB	Marine Cloud Brightening
NBS	Nature Based Solutions
SAI	Stratospheric Aerosol Injection
SRM	Solar Radiation Management
TRL	Technology Readiness Level