

Introduction

Par Dominique AUVERLOT

CGEDD

Et Richard LAVERGNE

CGE

Dans *Les Comptes Rendus Géoscience* de 2020 de l'Académie des sciences¹, Isabelle Czernichowski-Lauriol, du BRGM, également co-auteur d'un article publié dans ce numéro de *Responsabilité & Environnement*, a défini de façon très claire ce que sont les « puits de carbone » : « Il existe plusieurs types de puits de carbone. D'abord les puits de carbone dits naturels, mais pour lesquels une intervention humaine est nécessaire pour les préserver ou les renforcer. Les forêts en croissance constituent un puits de carbone capable de retirer du CO₂ de l'atmosphère par le mécanisme de photosynthèse, tout comme peuvent l'être les sols et les terres agricoles qui stockent de la matière organique (humus, débris végétaux), ainsi que les océans qui piègent du CO₂ atmosphérique par dissolution dans l'eau. Il existe aussi les puits de carbone dits technologiques : il s'agit essentiellement du puits de carbone géologique, qui consiste à capter le CO₂ non pas dans l'atmosphère où il est très dilué, mais dans les fumées des usines qui le recrachent en abondance à des concentrations plus élevées, pour le stocker sous terre dans une couche géologique, au-delà d'un kilomètre de profondeur ».

Le présent numéro de *Responsabilité & Environnement des Annales des Mines* traite principalement du captage et du transport du CO₂ suivi de son stockage ou de son utilisation (CCUS), et donc des puits de carbone technologiques. Les deux premières parties de ce numéro présentent le besoin actuel en matière de capture et de stockage du CO₂ et son déploiement industriel qui paraît plausible (et sans doute nécessaire !) à court terme. La troisième partie concerne plus généralement les technologies d'émissions négatives, y compris la notion déjà ancienne de géo-ingénierie, et présente leur degré d'avancement.

Le constat est somme toute assez simple et devrait permettre de répondre au souhait émis depuis fort longtemps par Claude Mandil de voir se développer le CCUS : cette technologie est désormais devenue incontournable non seulement pour permettre la réduction des émissions de GES – selon l'AIE, le CCUS pourrait contribuer à presque 15 % des réductions cumulées par rapport à un scénario tendanciel –, mais aussi pour le déploiement de deux des principaux procédés générant des émissions négatives, la bioénergie avec capture et

stockage du CO₂ et le captage direct dans l'air du CO₂ suivi de son stockage ; des procédés que le GIEC juge nécessaires pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C sans dépassement ou avec un dépassement limité. Pas étonnant donc que le président actuel des États-Unis, Joe Biden, se soit explicitement prononcé en octobre 2020, lors de sa campagne, en faveur de cette technologie : "We should be moving toward finding the new technologies that are going to be able to deal with carbon capture"² et que la législation américaine ait récemment renforcé le crédit d'impôt en faveur de la capture et du stockage du CO₂³. Ou qu'Elon Musk ait annoncé en février 2021 que sa fondation caritative et lui-même allaient consacrer 100 millions US\$ à un concours qui soutiendra la meilleure technologie de capture de carbone permettant d'extraire le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air ou des océans. Pas étonnant non plus que lors de la COP26 à Glasgow, une vingtaine de pays, dont les États-Unis, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni, se soient engagés à mettre un terme, d'ici à fin 2022, au financement à l'étranger de projets de centrales utilisant des énergies fossiles sans techniques de capture du CO₂.

Le mix énergétique mondial souhaitable selon l'AIE et correspondant au scénario de la neutralité carbone (scénario NZE) fait largement appel à la technologie du CCUS, puisqu'elle permet, comme le montre le graphique de la page suivante (voir la Figure 1), de capter 1,7 GtCO₂ par an et qu'elle concernerait, toujours dans ce même scénario, 70 % des utilisations du gaz naturel.

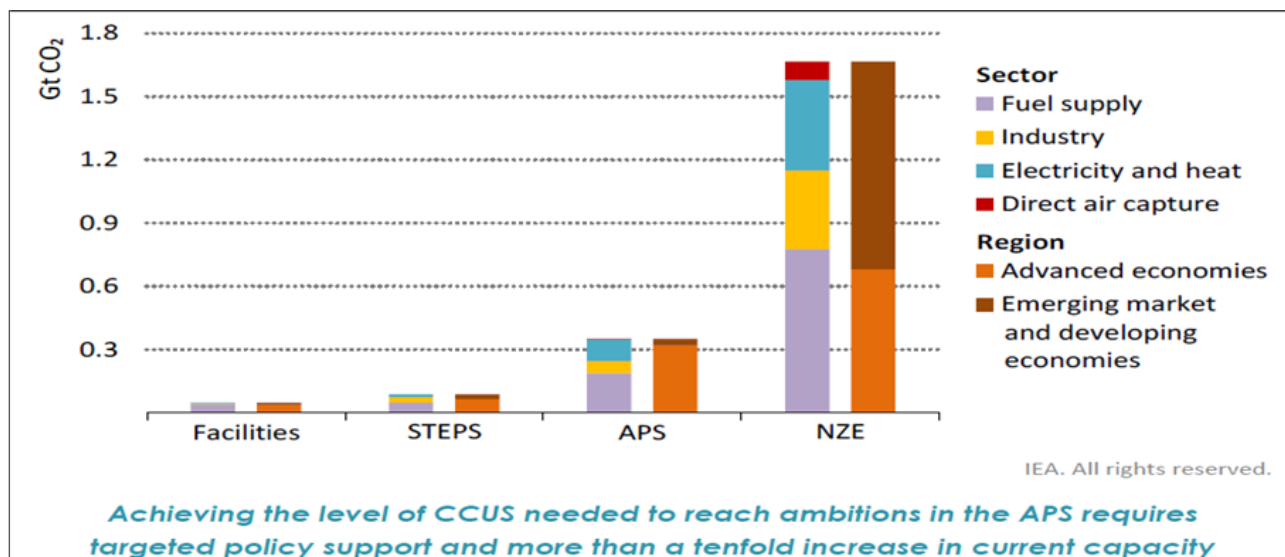
Dans l'article publié dans ce numéro, l'AIE souligne l'importance du rôle du CCUS dans l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone instauré par l'Accord de Paris sur le climat et explique, notamment, qu'une dynamique semble s'engager en faveur du recours à cette technologie.

D'autres analyses vont dans le même sens, comme celle de Bloomberg NEF avec le Gray Scenario publié en septembre 2021, qui décrit une trajectoire de neutralité carbone certes dominée par les énergies propres, mais qui

¹ 2020, volume 352, n°4-5, pp. 383-399, <https://doi.org/10.5802/crgeos.20>

² Full transcript of Joe Biden's ABC News town hall, 16 October 2020, <https://abcnews.go.com/Politics/read-full-transcript-joe-bidens-abc-news-town/story?id=73643517>

³ US tax credit encourages investment in carbon capture and storage, 29 January 2021, Michael RODGERS & Brandon DUBOV : <https://www.whitecase.com/publications/insight/carbon-capture/us-tax-credit-encourages-investment>



Note: Facilities = operating commercial CO₂ capture projects or under construction (including two with operations currently suspended).

Source: IEA analysis and GCCSI (2021).

Figure 1 : Capacité de stockage du CO₂ à l'horizon 2030 par projet et par scénario – Source : Agence internationale de l'énergie (AIE), World Energy Outlook 2021, 13 octobre 2021.

Où STEPS = Stated Policies Scenario ; APS = Announced Pledges Scenario ; et NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

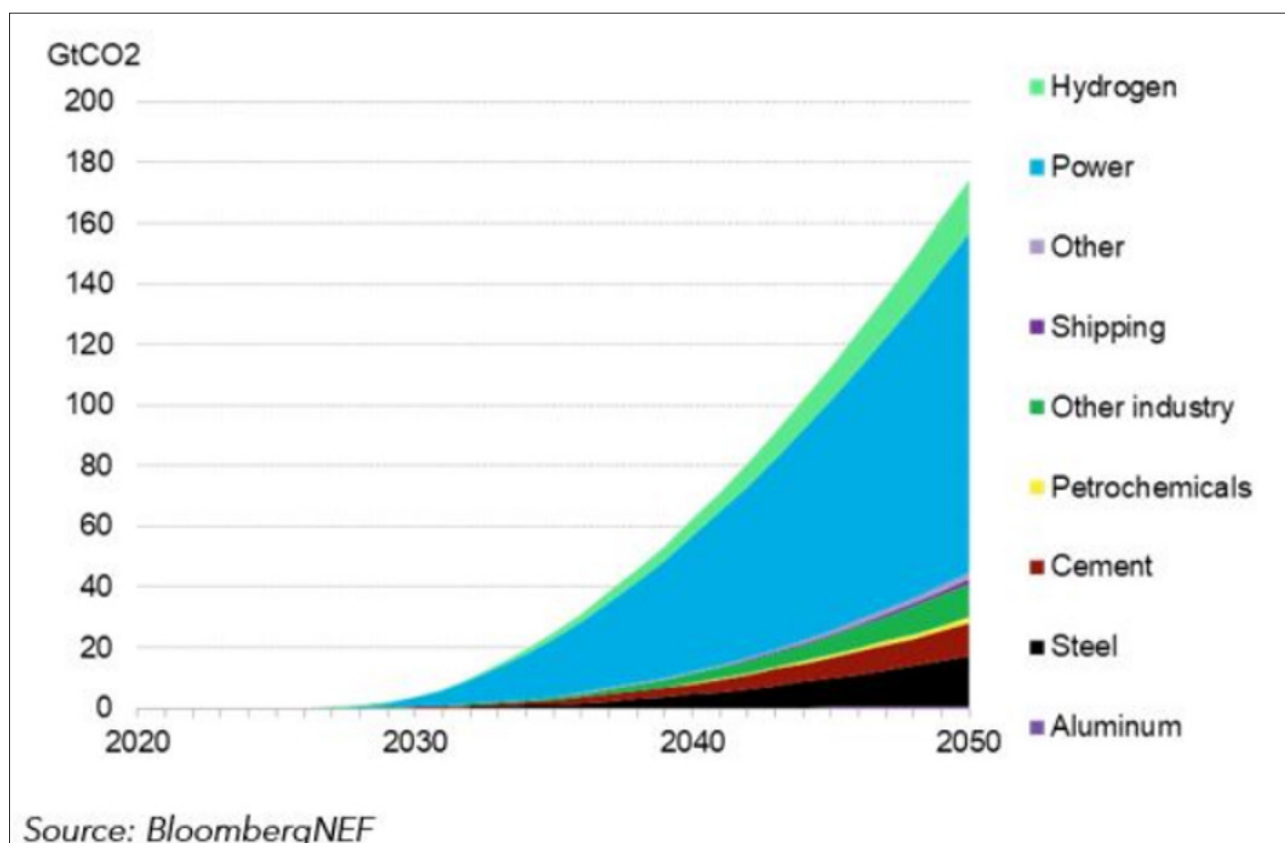


Figure 2 : Quantités cumulées de CO₂ stockées grâce au CCUS d'ici à 2050, selon le Gray Scenario de BloombergNEF (septembre 2021).

inclut également un recours significatif au CCUS permettant ainsi au charbon et au gaz de continuer à jouer un rôle important, en particulier dans l'industrie lourde et, surtout, dans la production d'électricité, comme le montre le graphique ci-dessus (voir la Figure 2 ci-dessus).

Isabelle Czernichowski-Lauriol, présidente émérite de l'association CO₂GeoNet, le réseau d'excellence euro-

péen sur le stockage géologique du CO₂, et Christophe Poinssot, tous deux du BRGM, soulignent que le CCS peut « constituer un formidable levier d'action pour créer des puits de carbone géologiques aux côtés des puits de carbone naturels (forêts, sols, océans) et ainsi compenser les émissions irréductibles de CO₂, ce qui est indispensable pour atteindre la neutralité carbone (Czernichowski-Lauriol, 2020) », et nous montrent qu'en

dépôt des fortes incertitudes liées notamment au peu de données disponibles sur le sous-sol profond et à l'hétérogénéité naturelle des formations géologiques, les capacités de stockage estimées sont très supérieures aux besoins de stockage nécessaires pour lutter contre le réchauffement climatique. Des capacités qui sont de fait compatibles avec les scénarios du GIEC qui prévoient de stocker jusqu'à 1 200 Gt de CO₂ en cumulé d'ici à 2100. Ils soulignent cependant que la viabilité technologique et économique de toute la chaîne CSC reste à démontrer.

Trois arguments pourraient cependant conduire à retarder, voire à devoir renoncer à cette technologie :

- Le premier serait de considérer que son développement serait un encouragement à l'inaction et à l'arrêt des efforts faits en matière de réduction des émissions dans l'attente de la mise en œuvre des technologies de captage. Ce serait oublier que le déploiement de l'ensemble des procédés générant des émissions négatives est limité : pour l'Académie des sciences américaine⁴, les principaux procédés d'émissions négatives (NET) pourraient, dans le meilleur des cas, correspondre au plus à quelques milliards de tonnes de CO₂. L'EASAC (European Academies Science Advisory Council) « constate que les NET⁵ ont un "potentiel réaliste limité" pour stopper les augmentations de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère à l'échelle envisagée dans les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) »⁶. Leur développement suppose en effet des terres disponibles, de l'énergie et de l'eau et pourrait ainsi entrer en compétition avec la production de nourriture et la préservation de la biodiversité. Le président de l'EASAC, Thierry Courvoisier⁷, qualifie « d'antithèse du développement durable » le risque moral qui conduirait à arrêter les efforts d'atténuation si le choix était fait de se reposer uniquement sur le

⁴ "With current technology, and using all available land and waste biomass, four negative emissions technologies – Afforestation/ reforestation, changes in forest management, uptake and storage by agricultural soils, and biomass energy with carbon capture and storage (BECCS) – Could be scaled up to capture and store substantial amounts of carbon: ~1 GtCO₂/yr in the United States and ~10 GtCO₂/yr globally. However, attaining these levels would require unprecedented rates of adoption of agricultural soil conservation practices, forestry management practices, and waste biomass capture. Practically achievable limits are likely substantially less, perhaps half the 1 GtCO₂/yr in the US and 10 GtCO₂/yr globally", National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press, <https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>

⁵ Technologies d'émissions négatives (Negative emissions technologies).

⁶ <https://www.academie-sciences.fr/fr/Reseaux-internationaux-dacademies/negative-emission-technologies-what-role-in-meeting-paris-agreement-targets.html>

⁷ Foreword, page IV, "Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?", EASAC policy report 35, February 2018, <https://www.academie-sciences.fr/fr/Reseaux-internationaux-dacademies/negative-emission-technologies-what-role-in-meeting-paris-agreement-targets.html>

développement de ces procédés. Il souligne cependant que l'humanité a besoin de tous les outils possibles pour lutter contre le changement climatique et qu'il est donc nécessaire de continuer à étudier ces procédés qui ne constituent en rien un "silver bullet" ;

- Le second serait de dire que le développement du CCS, qui permet une réduction du CO₂ émis pouvant aller jusque 90 %, pourrait conduire à prolonger notre addiction aux énergies d'origine fossile. Le discours de Joe Biden, alors simple candidat à l'élection présidentielle américaine, n'est certainement pas étranger à cette considération. Cependant, là encore, le stockage ou la réutilisation du CO₂ seront limités – le prolongement de l'addiction ne sera donc que temporaire ! Le second semestre 2021 nous a d'ailleurs rappelé que l'énergie était une ressource sujette aux aléas géopolitiques, même si les ressources actuelles peuvent être considérées comme abondantes et qu'il est toujours préférable de bénéficier d'un mix qui soit le plus diversifié possible. La Chine prévoit encore aujourd'hui de construire 247 GW de centrales électriques au charbon⁸ qui vont avoir une durée de fonctionnement de plusieurs dizaines d'années : ne serait-il pas avisé de les équiper de dispositifs de CCS ?
- Le troisième argument a trait à l'acceptabilité de cette technologie. Il s'agit sans doute du principal facteur d'incertitude pesant sur son développement à grande échelle. Jonas Pigeon, de l'UMR IDEES et Engie Lab CRIGEN, identifie les principaux enjeux relatifs à l'acceptabilité sociale du CCUS, notamment auprès des riverains, et tire des leçons de l'expérience norvégienne en la matière.

Sylvie Cornot-Gandolphe nous explique que le coût élevé du CCUS, la concurrence que constituent les autres énergies et, plus récemment, les programmes d'arrêt de centrales à charbon sont les principales raisons qui ont empêché le développement du CCUS pour les centrales à charbon en Europe et aux États-Unis au cours de la décennie 2010-2020. En outre, elle nous montre de manière générale que la capture du CO₂ ne doit pas être considérée indépendamment du stockage ou de la réutilisation de celui-ci, et que les principaux projets actuels sont conçus à l'intérieur de hubs industriels dans lesquels les coûts du transport et du stockage ou de la réutilisation sont partagés par plusieurs industriels. Jon Gibbins, qui est le directeur du Centre de recherche britannique sur le CCS depuis 2012, explique également l'échec de la première vague du CCS par le coût de cette technologie, mais également par le choix technologique fait (cycle combiné à gazéification intégrée du charbon (CCGI)) qu'il qualifie d'erroné : la stratégie actuelle du Royaume-Uni, qui repose sur le développement du CCS dans des hubs industriels bénéficiant de sites de stockage géologique offshore, lui semble très prometteuse. Greg Hands, le ministre britannique de l'Énergie, de la Croissance propre et du Changement climatique, a d'ailleurs confirmé, en octobre 2021, devant le Parlement, cette stratégie en soulignant que le CCUS était nécessaire

⁸ *Risks in China's insatiable thirst for energy*, NYT, October 9-10, 2021, p. 4.

pour l'atteinte de la neutralité carbone et constituait "an exciting industry" à développer⁹. Simon Block et Peter Viebahn, du Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (Allemagne), décrivent les développements possibles de la capture directe du CO₂ dans l'atmosphère en Allemagne et soulignent que cette technologie pourrait afficher des coûts inférieurs à 100 €/tCO₂ évitée dès 2030.

Joe Blommaert, président d'ExxonMobil Low carbon Solutions, s'inscrit dans cette dimension du CCS associé à un *hub* industriel en nous présentant le projet de CCS qu'ExxonMobil prévoit de déployer avec dix autres industriels sur le site du port de Houston au Texas : ce projet devrait permettre de capter les émissions générées par des installations chimiques et pétrochimiques et de stocker jusqu'à 100 millions de tonnes de CO₂ par an, en 2040. Il ajoute que le développement de cinquante autres projets de la même ampleur dans le monde permettrait d'atteindre l'objectif fixé par l'AIE de la capture et du stockage de 5 GtCO₂ émises annuellement par les industries ou l'énergie. Il plaide en outre en faveur d'une taxe carbone qui permettrait une meilleure rentabilité économique de ce procédé.

David Nevicato nous montre que le CCS est désormais une réalité pour Total qui est d'ores et déjà en train de mener des opérations pilotes en Europe afin de démontrer la viabilité du modèle économique du CCS à l'échelle industrielle, dans la perspective à terme d'exporter les technologies correspondantes dans d'autres parties du monde.

À une échelle plus petite, Sylvain Delerce et Éric H. Oelkers, de Géosciences Environnement Toulouse (GET), présentent le projet Carbfix. Ils nous montrent que le CO₂ peut être stocké dans le sol, non seulement dans d'anciens réservoirs de pétrole ou de gaz, voire dans d'anciennes mines de charbon, mais également dans des roches mafiques¹⁰ (ferromagnésiennes) et ultramafiques comme les basaltes ou les péridotites, dans lesquelles ils peuvent se minéraliser rapidement : un taux de minéralisation de 95 % du CO₂ injecté a ainsi été obtenu en moins de deux ans dans le cas de l'installation pilote d'Hellisheidi en Islande.

L'Accord de Paris a permis de relancer la dynamique mondiale en faveur de la lutte contre le changement climatique. Mais en décidant de maintenir l'augmentation de la température mondiale « bien en dessous » de 2°C et de mener des efforts encore plus poussés pour limiter l'augmentation de la température à 1,5°C, les pays signataires se sont fixé un objectif très difficile à atteindre : la loi européenne sur le climat fixe ainsi l'objectif juridiquement contraignant de ramener les émissions nettes de gaz à effet de serre à zéro d'ici à 2050. Au rythme actuel, l'élévation de la température de la planète devrait en effet atteindre les 1,5°C aux environs de 2030. Plus le dépassement de ce seuil sera important, et plus les conséquences sur notre planète

et sa biodiversité seront importantes et irréversibles. Ce même rapport mentionne que nous allons vers un dépassement de ce seuil sur une période plus ou moins longue et que pour revenir dans une fourchette de température acceptable, nous devons réduire fortement la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nous sommes dès lors dans l'obligation de recourir à des procédés d'émissions négatives qui, si l'on retient une définition simple, consistent à retirer de manière durable du CO₂ de l'atmosphère. Parmi les nombreuses solutions envisagées, quatre technologies principales semblent d'une mise en œuvre possible ; chacune d'elles avec leurs avantages et leurs inconvénients :

- la première consiste à accroître la capacité d'absorption des puits de carbone dits naturels constitués par la biomasse forestière, et ce en augmentant la surface forestière et en améliorant la gestion de la forêt (ce qui doit naturellement passer par la prévention des incendies qui seront de plus en plus probables dans un climat plus chaud) ;
- la deuxième vise, elle aussi, à accroître cette capacité d'absorption, mais par une hausse de la teneur en carbone des sols ;
- la troisième consiste à produire de l'énergie (de l'électricité, des carburants liquides ou gazeux, de la chaleur) grâce aux végétaux et en veillant à capturer et à stocker le CO₂ issu du processus de production ;
- la quatrième a pour but de capturer le CO₂ soit directement dans l'atmosphère, soit en l'extrayant des fumées des usines, avant de le stocker de manière durable, sous forme de puits de carbone dits technologiques.

La troisième partie de ce numéro met en évidence toutes les limites de ces différentes techniques : ainsi, l'extension des surfaces forestières et des cultures énergétiques va très rapidement entrer en conflit avec l'augmentation de la demande alimentaire, tandis que l'accroissement de la teneur des sols en carbone est une technique limitée, difficilement rémunérable et pas forcément durable. Enfin, le prélèvement direct du CO₂ dans l'atmosphère est aujourd'hui coûteux et consommateur d'eau et d'énergie.

Ilarion Pavel arrive à des conclusions assez semblables en s'intéressant à la notion de géo-ingénierie, qui intégrait la gestion du rayonnement solaire et qui avait pour but plus général, selon la définition du cinquième rapport du GIEC¹¹, de modifier délibérément le climat de la Terre pour contrer l'influence du changement climatique. L'article d'Anni Määttänen, de l'IPSL-LATMOS, nous informe que les techniques de géo-ingénierie solaire sont toujours d'actualité, mais qu'elles peuvent se heurter au refus des populations locales. Elles suscitent, de fait, comme Ilarion Pavel nous le rappelle à juste titre, de nombreux doutes, si bien que le rapport du GIEC sur les conséquences d'un dépassement du seuil de 1,5°C ne les retient pas parmi les solutions envisageables : « Les mesures visant à la modification du rayonnement solaire ne sont prises

⁹ <https://questions-statements.parliament.uk/written-statements/detail/2021-10-19/hcws325>

¹⁰ Un silicate ou une roche silicatée est dit(e) mafique quand il ou elle est riche en magnésium et en fer, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mafique>

¹¹ P29, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

en compte dans aucune des trajectoires d'émissions compatibles évaluées dans ce rapport. Bien que certaines de ces mesures puissent, en théorie, permettre d'atténuer un éventuel dépassement du seuil de 1,5°C, elles se heurtent [toutes] à de grandes incertitudes et à des lacunes en matière de connaissances, ainsi qu'à des risques importants et à des contraintes institutionnelles et sociales limitant leur déploiement, [celles-ci sont] liées à la gouvernance, à l'éthique et aux impacts [de ces mesures] sur le développement durable »¹². Cela n'empêche pas le magazine, *The Economist*, dans son numéro de fin octobre 2021¹³, d'évoquer un scénario de dépassement des seuils de température dans lequel la géo-ingénierie solaire, peu coûteuse,

serait utilisée de manière transitoire (durant quelques années) pour maintenir la température terrestre dans des valeurs raisonnables le temps que les technologies d'émissions négatives se développent et permettent de capter suffisamment de CO₂ dans l'atmosphère.

Les coordonnateurs de ce numéro de *Responsabilité & Environnement* remercient vivement tous les auteurs pour leurs contributions sur un sujet rarement abordé en France dans les débats, pourtant animés, portant sur le mix énergétique et espèrent que le lecteur pourra se faire une idée plus précise des enjeux et des défis à relever par le CCUS.

¹² Point C.1.4 du résumé pour décideurs du rapport du GIEC sur un réchauffement planétaire de 1,5°C, 2019 : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

¹³ <https://www.economist.com/special-report/2021/10/27/governing-the-atmosphere>