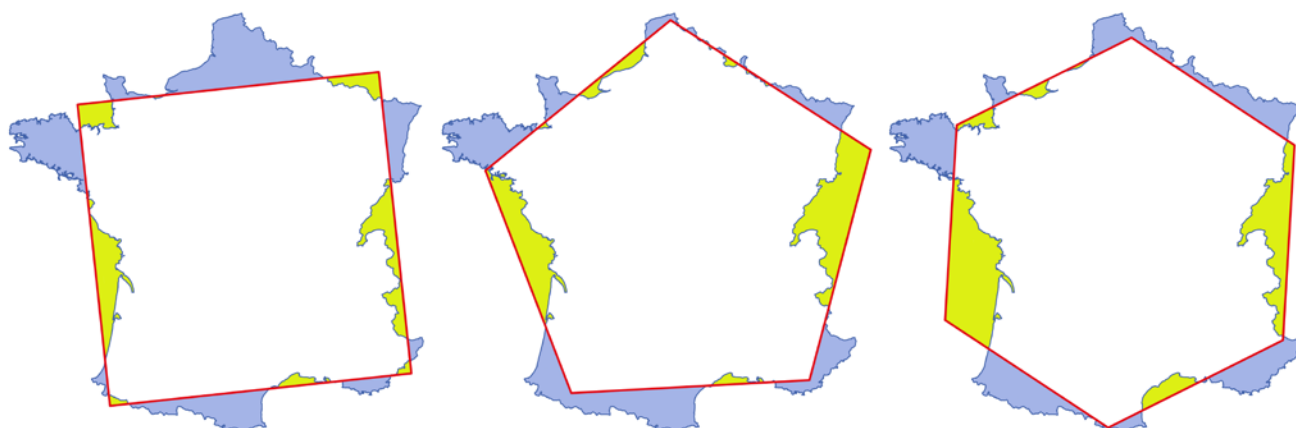
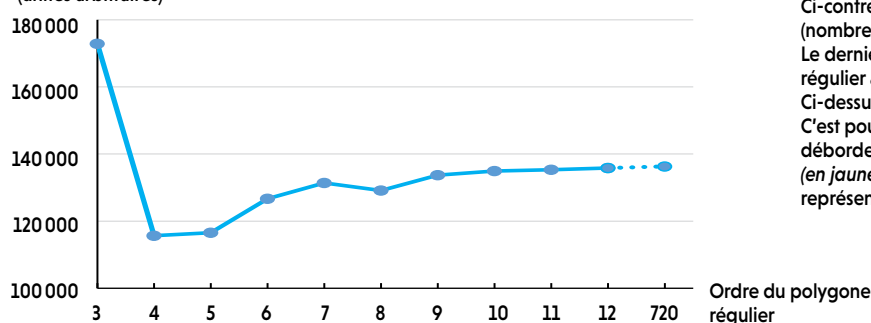




Aire totale des débordements
(unités arbitraires)



Ci-contre : l'aire des débordements en fonction de l'ordre (nombre de sommets) du polygone régulier optimal. Le dernier point du graphique correspond au polygone régulier à 720 sommets, qui est très proche d'un cercle. Ci-dessus : le carré, le pentagone et l'hexagone optimaux. C'est pour le carré que la somme des aires des débordements de la France (en bleu) et du polygone (en jaune) est la plus petite. Autrement dit, un carré représente mieux la France qu'un hexagone.

ainsi que la précision de l'optimisation numérique ont permis de déterminer les coordonnées du centre de l'hexagone optimal : $46^{\circ}29'49''\text{N}$, $2^{\circ}27'13''\text{E}$ à 4" près, ce qui représente une précision de l'ordre de l'hectomètre. D'après GoogleMaps, ce point se situe dans le périmètre de la commune de Saint-Désiré, dans le département de l'Allier (voir la figure page précédente).

Quant au barycentre de la France, nous avons obtenu comme position approximative les coordonnées $46^{\circ}33'54''\text{N}$, $2^{\circ}28'58''\text{E}$; il se trouve dans le périmètre de la commune de Vesdun, dans le département du Cher. Il est très proche du barycentre de l'ensemble des centres des communes de la France métropolitaine, pondéré par les superficies des communes ($46^{\circ}32'23''\text{N}$, $2^{\circ}25'49''\text{E}$). Néanmoins, le calcul de ce dernier prenait en compte les îles côtières, ce qui n'est pas notre cas.

On peut ainsi estimer que la position du centre de l'hexagone régulier optimal représentant la France continentale est déterminée à une centaine de mètres près et qu'il ne serait pas sérieux de la présenter avec plus de précision. Elle résulte d'un processus numérique d'optimisation où une certaine imprécision est inévitable. Les coordonnées géographiques des autres centres potentiels de la France que l'on voit mentionnés dans divers documents sont présentées avec la précision de 1", c'est-à-dire environ 31 mètres. Mais rien ne garantit que

les données de départ et surtout la méthode employée autorisent une telle précision!

Ce qui précède porte sur l'hexagone régulier, mais on peut envisager d'autres polygones réguliers susceptibles de représenter la France : un triangle équilatéral, un carré, un pentagone régulier, etc. Nous avons donc répété le calcul pour plusieurs polygones réguliers (voir les figures ci-dessus).

LE POLYGONE OPTIMAL A BIEN QUATRE COINS

Dans les résultats, on remarque par exemple que le carré optimal déborde manifestement beaucoup moins de la France que celle-ci ne déborde du carré. Notre critère d'optimisation, la minimisation de la somme des aires des débordements, n'implique en effet pas que les aires des débordements mutuels soient égales. Trouver le polygone régulier qui minimiserait les aires des débordements, en les maintenant égales, serait un autre problème d'optimisation et conduirait à des résultats différents.

Cependant, la principale conclusion à laquelle nos calculs conduisent est que si la France devait ressembler à un polygone régulier, ce serait de préférence un carré, voire, à défaut, un pentagone. L'hexagone ne viendrait qu'à la troisième place, suivi d'un octogone. Cela justifie les propositions de certains géographes anciens et surtout le titre de cet article : l'Hexagone est carré! ■

SUR LE WEB

Articles « **Hexagone (France)** », « **Centre de la France** » et « **Aire et centre de masse d'un polygone** » sur Wikipédia.

Page « **Centre de gravité** » du site Math 15873 de Michel Berteau : <http://math.15873.pagesperso-orange.fr/page9.htm>

L'ESSENTIEL

> Afin de limiter le réchauffement global à 1,5 °C, il faudra au cours de ce siècle extraire de l'atmosphère 1 000 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂).

> Il sera crucial de trouver la combinaison optimale de méthodes de captage du carbone. Avec des machines qui extraient directement le CO₂ de l'air, il serait possible d'en retirer 250 milliards de tonnes

d'ici à 2100. La replantation de forêts permettrait de capter 180 milliards de tonnes de CO₂.

> Les coûts nets vont jusqu'à 300 dollars (270 euros) par tonne. À moins que de grands marchés soient développés pour utiliser le CO₂ capté, une taxe carbone constitue peut-être la meilleure solution pour financer les technologies de captage.

L'AUTEUR



RICHARD CONNIFF
journaliste et écrivain
scientifique
aux États-Unis

Capter le CO₂ pour

La réduction des émissions globales de gaz à effet de serre tarde trop. Pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, il faudra probablement retirer de l'atmosphère quelque 1 000 milliards de tonnes de dioxyde de carbone d'ici à 2100. Dans quelle mesure est-ce possible ?



sauver le climat



Dans le cadre du projet CarbFix, à la centrale géothermique d'Hellisheiði, en Islande, des puits d'injection envoient dans des roches profondes de l'eau de mer contenant du CO₂ extrait de l'air.

Il n'y a pas si longtemps, on pensait qu'il suffirait de réduire nos émissions de gaz à effet de serre pour sauver le monde du changement climatique. Remplacer les centrales à énergies fossiles par des sources d'énergie propre, rendre les automobiles et les bâtiments moins énergivores, passer à l'éclairage par des LED, manger moins de viande, etc. Réduire les émissions et promouvoir les énergies renouvelables semblait être la solution, même pour le Groupe intergouvernemental d'experts pour le climat (Giec), pas plus tard qu'en 2005. Mais cette stratégie n'a pas donné les fruits escomptés. Les émissions globales ont augmenté au lieu de diminuer. Il apparaît désormais que même l'élimination complète des émissions mondiales d'ici à 2050 ne suffira pas.

Pour empêcher une catastrophe économique et environnementale, les experts du climat affirment maintenant que nous devons parvenir à des émissions *négatives*. Autrement dit, il faudra extraire des milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère chaque année. C'est comme si l'on disait que nous ne pouvons plus sortir les poubelles, mais que nous devons aussi progressivement reprendre tout ce que nous avons mis aux ordures dans le passé.

UNE « URGENCE IMMÉDIATE »

D'après une étude de 2018 dirigée par Jan Minx, de l'institut allemand MCC (institut Mercator de recherche sur les biens communs et le changement climatique), des émissions négatives et massives sont désormais considérées comme un « impératif biophysique » pour atteindre les objectifs en matière de changement climatique. Trouver les moyens d'y parvenir est une « urgence immédiate » si l'on veut limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C, prévient-il avec ses coauteurs dans la revue *Environmental Research Letters*. Presque tous les États ont souscrit à cet objectif, avec un repli à « nettement en dessous de 2 °C » dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat, conclu fin 2015.

Le réchauffement est actuellement de 1 °C environ par rapport aux niveaux préindustriels. Mais il augmente de 0,2 °C par décennie. Dans un rapport spécial d'octobre 2018, le Giec a prévenu que nous avions tout juste une douzaine d'années pour agir si nous espérons rester en deçà de 1,5 °C, le niveau considéré par la plupart des scientifiques comme la limite à ne pas dépasser pour avoir une chance de préserver le monde vivant à peu près tel que nous le connaissons.

Rester sous ce seuil impose un « budget carbone » bien précis, c'est-à-dire une quantité de CO₂ que nous pouvons ajouter à l'atmosphère sans pousser le réchauffement au-delà de cette température. Au niveau actuel des émissions, environ 40 milliards de tonnes par an, « nous



n'avons peut-être plus droit qu'à cinq années d'émissions de dioxyde de carbone » pour un réchauffement limité à 1,5 °C, disent Jan Minx et ses coauteurs. Après, chaque tonne supplémentaire de CO₂ devra être compensée par l'extraction d'une quantité égale. Cette équipe estime qu'à l'échelle mondiale, il faudra extraire de l'atmosphère entre 150 milliards et plus de 1000 milliards de tonnes de CO₂ d'ici à 2100, soit environ 2 à 16 milliards de tonnes par an à partir de 2050, la quantité augmentant notablement vers la fin du siècle.

À cette fin, notent Jan Minx et son équipe, il faudra construire chaque année « plusieurs centaines » d'installations de captage et de séquestration du CO₂ à partir de 2030, c'est-à-dire dans à peine onze ans. Cela pourrait se réaliser par le biais de grandes machines qui extraient le CO₂ de l'air, ou par le développement de centrales à biomasse, qui brûlent des arbres (cultivés en rotation continue) dans une installation qui capte le CO₂ ainsi émis et l'envoie dans les profondeurs du sol pour un enfouissement permanent. Des options simples consisteraient à replanter des forêts coupées ou à étendre des forêts existantes, à améliorer les sols cultivés et les pâturages afin qu'ils retiennent davantage de carbone, et à broyer et épandre certains types de roches qui absorbent le CO₂.

Cependant, la plupart des méthodes plus technologiques de captage du carbone en sont encore dans leurs premières phases de développement. Elles exigent d'énormes investissements, avec un risque considérable d'échec, et présentent des effets secondaires majeurs, par exemple une concurrence pour des terres déjà utilisées pour nourrir la population ou pour préserver la faune sauvage.

Et pourtant, le captage de CO₂ à grande échelle apparaît comme la seule option. Dans

Cette machine de la jeune pousse suisse Climeworks extrait du CO₂ de l'atmosphère (a). Un injecteur abrité sous un dôme et situé à proximité (b) envoie le gaz à plus de 700 mètres sous terre, où il réagit avec des roches basaltiques pour former des carbonates, visibles sous forme de stries blanches dans un échantillon de basalte prélevé en profondeur (c).



une étude publiée en 2017 dans *Nature Climate Change*, le statisticien Adrian Raftery, de l'université de Washington, et ses collègues ont examiné les tendances actuelles (sans prendre en compte d'émissions négatives). Ils ont trouvé que nous nous dirigeons vers une hausse de 3,2 °C d'ici à la fin du siècle, la fourchette allant de 2 à 4,9 °C. Dans une étude publiée plus tard dans *PNAS*, Yangyang Xu, climatologue de l'université du Texas A&M, et un collègue estiment «catastrophique» un réchauffement supérieur à 3 °C,

peut-on mobiliser suffisamment de volontés politiques pour réaliser des émissions négatives tout en réduisant de façon draconienne nos émissions actuelles de CO₂?

CAPTER DIRECTEMENT LE CO₂ DE L'AIR ET L'ENFOUIR

Sur un champ de lave solidifiée, dans un paysage de cailloux et de mousse juste à la sortie de Reykjavik, en Islande, une machine de la taille d'un garage pour une voiture aspire l'air à travers un filtre chimique qui extrait le CO₂. Alimentée par la centrale géothermique voisine, elle injecte le carbone capturé à plus de 700 mètres sous terre, où le gaz réagit avec la roche basaltique et se transforme en un minéral solide. Climeworks, une jeune pousse suisse, affirme qu'il s'agit de la première installation du monde de captage direct dans l'air et séquestration. Elle séquestre la modeste quantité de 50 tonnes de CO₂ par an.

Le captage direct dans l'air du CO₂ et sa séquestration représentent probablement la voie la plus simple pour réaliser des émissions négatives: à l'aide d'une multitude de ventilateurs, de compresseurs et de techniques chimiques, on puiserait le CO₂ dans l'air et on l'enterrerait. D'après divers scénarios scientifiques, cette technologie permettrait d'extraire 10 à 15 milliards de tonnes de CO₂ par an d'ici à la fin du siècle; quelques experts pensent qu'on pourrait atteindre 35-40 milliards de tonnes par an. La perspective est tellement alléchante que, selon de nombreux climatologues, il y a un aléa moral: celui de penser que l'on peut reporter la réduction des émissions dues aux combustibles fossiles, dans l'espoir que la technologie nous sauvera plus tard.

La plus complète des revues des méthodes d'extraction (une autre étude publiée en 2018 dans *Environmental Research Letters*) a une vision moins optimiste. Sabine Fuss, du MCC, ➤

Le captage de dioxyde de carbone à grande échelle apparaît comme la seule option

tandis qu'un réchauffement de plus de 5 °C poserait «des menaces existentielles pour la majeure partie de la population humaine».

Supposons donc que 1000 milliards de tonnes d'émissions négatives soient nécessaires au cours de ce siècle, soit en moyenne 20 milliards de tonnes par an à partir de 2050. Quelle part du gâteau chaque méthode pourrait-elle représenter et à quel coût? Étant donné la concurrence entre les méthodes pour certaines ressources, comme les terres, quelle est la meilleure combinaison à adopter? Et

COMPARAISON DES APPROCHES

Les rectangles montrent les fourchettes déterminées par les experts sur la base de nombreuses études. La fertilisation des océans (F) n'est pas incluse.

DIFFÉRENTES STRATÉGIES POUR CAPTER LE CARBONE

Quelles techniques séquestrent le plus de dioxyde de carbone en 2050 ? Quel serait leur coût ? Le grand carré met en perspective les différentes approches. Les chiffres utilisés sont ceux d'une métaanalyse de nombreuses études, effectuée par l'économiste Sabine Fuss et ses collègues. Chaque petit carré présente, pour une stratégie donnée, une évaluation détaillée des études et le jugement des spécialistes de l'équipe de Sabine Fuss.

COMMENT LIRE LES GRAPHIQUES VIOLETS

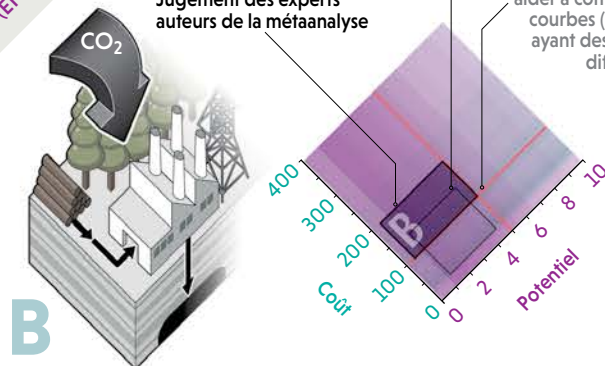
Les couleurs représentent la fourchette des valeurs d'après de nombreuses études. Les teintes plus sombres indiquent un recoupement plus important.



25^e au 75^e percentile des estimations

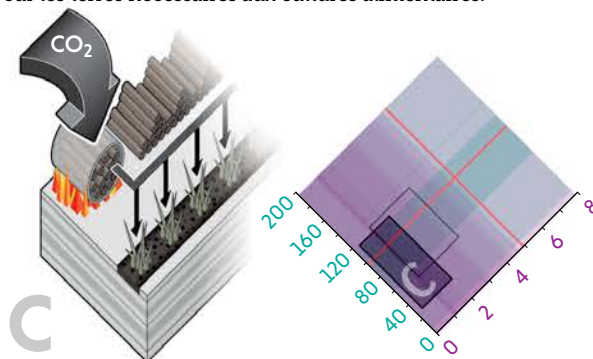
Jugement des experts auteurs de la métaanalyse

Les lignes rouges sont des repères pour aider à comparer les courbes (les carrés ayant des échelles différentes)



CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE PAR LES BIOÉNERGIES

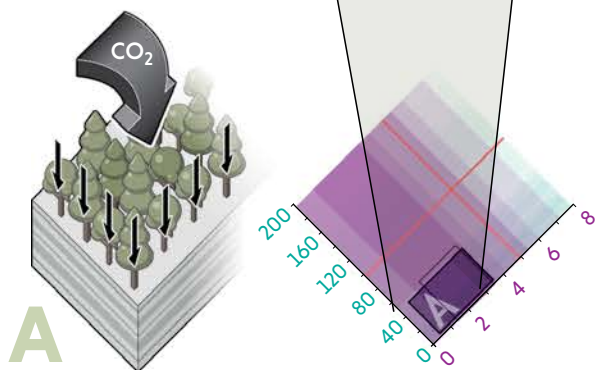
On brûle des végétaux, qui absorbent du dioxyde de carbone, pour produire de l'énergie, ou on les transforme en biocarburant. On extrait le CO₂ et on l'injecte dans le sous-sol pour un stockage profond et permanent. Les produits créent des revenus, mais en adoptant à grande échelle cette stratégie, on risque d'empiéter sur les terres nécessaires aux cultures alimentaires.



BIOCHAR

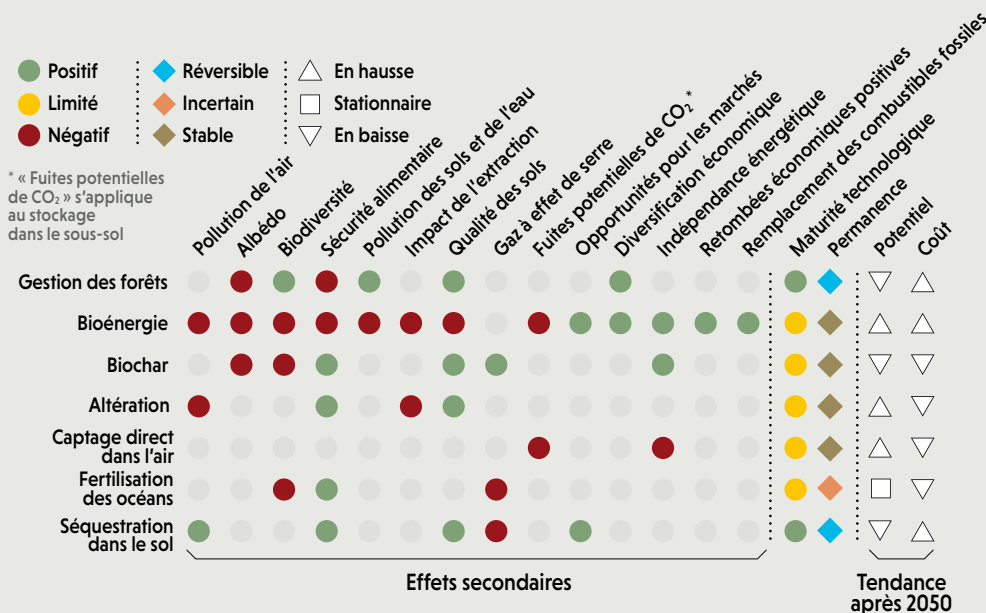
On chauffe en l'absence d'oxygène des récoltes, du fumier ou des déchets organiques. Cela produit du biocarburant et du biochar, un résidu riche en carbone ressemblant à du charbon. On épand le biochar sur des champs agricoles pour améliorer le sol, ce qui pourra contribuer à fixer davantage de carbone. Produire du biochar à grande échelle en consommant peu d'énergie risque d'être difficile.

Les échelles des graphiques individuels (en violet) sont différentes pour uniformiser la taille des carrés et faciliter la lecture.



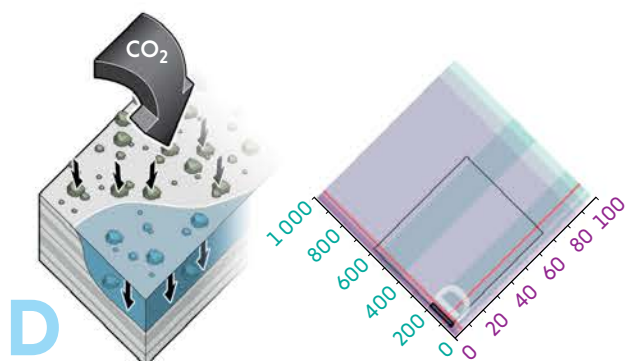
REFORESTATION ET AFFORESTATION

On plante des arbres pour remplacer les forêts coupées à blanc et étendre celles qui existent. Ces arbres absorbent le CO₂ de l'air et le convertissent en bois neuf, racines comprises. Il faudra aussi réformer les marchés du bois et les pratiques de gestion forestière.



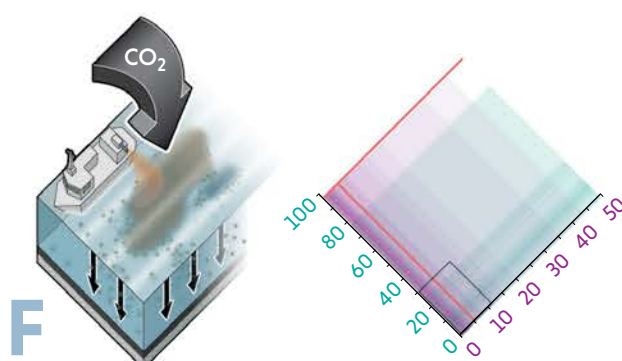
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les techniques qui capteront le carbone en 2050 (*rangées*) s'accompagneront d'éventuels effets secondaires (*ronds*). La colonne « maturité technologique » indique dans quelle mesure l'approche sera prête à être déployée à cette date. La « permanence » indique si le CO₂ peut s'échapper à nouveau dans l'atmosphère : « réversible » indique un risque élevé ; « stable » correspond à un risque faible (*carreaux*). La tendance à la hausse ou à la baisse du potentiel de séquestration et des coûts au-delà de 2050 est indiquée tout à droite du tableau (*triangles*), sur la base de facteurs tels que la disponibilité des terres. Les effets sont estimés sur la base des évaluations majoritaires des articles publiés (lorsque peu d'articles ont traité un point particulier, les entrées correspondantes du tableau sont laissées en gris).



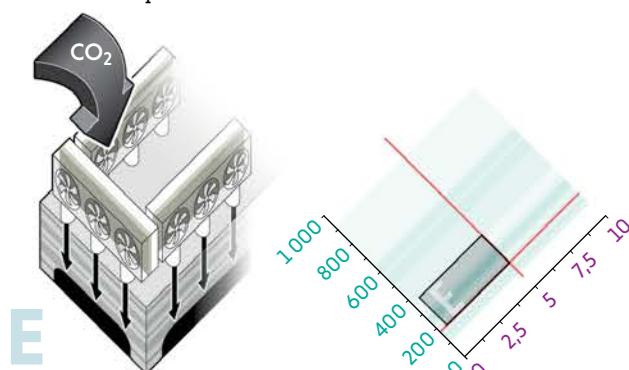
ALTÉRATION FORCÉE

On réduit en poussière de la roche. Épandue dans les champs, cette poussière capte du CO₂ de l'air et fertilise le sol. Quand on la saupoudre sur l'océan, elle réagit avec l'eau de mer, transformant le CO₂ en carbonates qui tombent sur le fond. La clé du succès est de parvenir à pulvériser et transporter la roche à peu de frais.



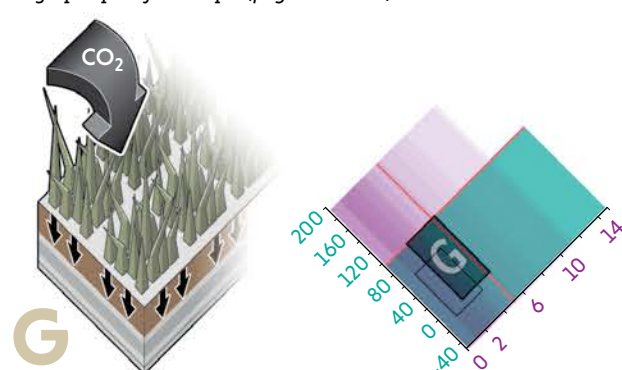
FERTILISATION DES OCÉANS

On répand de la limaille de fer dans les mers pour favoriser la croissance du plancton, qui absorbe du CO₂. À la mort de ces organismes, le carbone qu'ils ont fixé sombre au fond de l'océan. En raison de la courte durée des gains et des risques de perturbation des écosystèmes, les experts n'ont pas intégré cette option à leur graphique synthétique (*page ci-contre*).



CAPTAGE DIRECT DANS L'AIR

Des machines aspirent l'air ambiant et séparent chimiquement le CO₂, qu'elles injectent dans le sous-sol pour stockage permanent. Les coûts prédits sont élevés, mais ils pourraient baisser avec le développement de la technologie. [Les données pour le « potentiel » n'étaient pas disponibles.]



SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LE SOL

Les graminées ou les cultures absorbent du CO₂ et le convertissent en racines, fixant le carbone dans le sol. Les techniques de gestion des sols pourraient augmenter la séquestration et le rendement des cultures. Le potentiel à long terme pourrait être limité, la quantité de carbone que les sols peuvent retenir étant limitée.

> et ses collègues ont examiné les coûts, les effets secondaires, la soutenabilité environnementale et d'autres facteurs pour évaluer le potentiel de séquestration du carbone de sept principales méthodes d'extraction. Ces chercheurs évaluent le potentiel du captage direct dans l'air en 2050 à seulement 0,5 à 5 milliards de tonnes par an, ce qui donne au total 25 à 250 milliards de tonnes ce siècle, pour un coût d'environ 100 à 300 dollars la tonne. (À titre de comparaison, une voiture en Europe émet de l'ordre de 2 tonnes de CO₂ par an.)

Effectivement, le captage dans l'air « n'est pas une solution miracle », commente James Mulligan du programme *Food, Forests & Water* (« Alimentation, forêts et eau ») de l'institut des ressources mondiales (WRI). « Mais nous en avons besoin. » Certains chercheurs pensent qu'on pourrait abaisser le coût en dessous de 100 dollars (90 euros) la tonne. Mais si le temps nécessaire pour développer la technologie à l'échelle requise est comparable aux soixante années qu'il a fallu aux panneaux solaires pour passer des satellites des années 1950 à un usage répandu aujourd'hui, « il sera peut-être trop tard », fait observer Jan Minx.

En outre, le captage direct dans l'air consomme beaucoup d'énergie. Pour extraire 1 million de tonnes de CO₂ par an, il faudrait une centrale électrique fournissant 300 à 500 mégawatts, d'après Jennifer Wilcox, professeure de génie chimique au Worcester Polytechnic Institute, aux États-Unis. Si cette centrale est à charbon, on aura davantage d'émissions positives que négatives. Si l'énergie provient de fermes solaires ou éoliennes, celles-ci couvriront beaucoup de terres à vocation agricole ou d'espaces naturels. Et, bien sûr, 1 million de tonnes ne serait qu'une goutte d'eau par rapport aux 20 milliards de tonnes annuelles visées.

Il est peut-être essentiel de construire aujourd'hui de telles installations afin de développer le savoir-faire nécessaire pour passer à beaucoup plus grande échelle et de parvenir à une meilleure efficacité plus tard dans le siècle. « Mais si vous vous mettiez aujourd'hui à construire des équipements qui captent 20 millions de tonnes par an, ce serait gaspiller votre argent », dit Roger Aines, directeur scientifique du programme sur les énergies au laboratoire américain Lawrence-Livermore. « Vous auriez besoin de beaucoup d'énergie solaire ou éolienne, et si vous aviez à votre disposition toute cette énergie solaire ou éolienne, le mieux à faire pour la planète serait de l'envoyer sur le réseau et de fermer une centrale à charbon. » Empêcher de nouvelles émissions de gaz à effet de serre reste la priorité des priorités.

L'étude de Sabine Fuss ne se contente pas d'ajouter le potentiel des sept méthodes de captage, car certaines d'entre elles sont en compétition pour les mêmes ressources. Par



exemple, trop de reforestation se ferait au détriment de terres nécessaires pour cultiver le combustible des centrales à bioénergie, et trop de bioénergie pourrait être en concurrence avec le captage direct dans l'air pour la séquestration souterraine du carbone. En d'autres termes, il nous faut optimiser un portefeuille de méthodes.

Cet engrais, du biochar, a été produit par chauffage de déchets de poulets et de copeaux de bois. Ces déchets émettraient du dioxyde de carbone si on les laissait se décomposer.

OPTIMISER LE PORTEFEUILLE DE SOLUTIONS

Une façon immédiate de commencer à construire ce portefeuille, explique Pete Smith, spécialiste des sols et du changement global à l'université d'Aberdeen, en Écosse, est de « passer à l'échelle supérieure pour ce que l'on sait déjà faire. On sait planter des arbres. On sait restaurer les tourbières, essentiellement en élevant le niveau de l'eau », de telle sorte que la tourbe capture du CO₂ au lieu d'en émettre. « On sait comment améliorer le contenu en carbone du sol. [...] Encourager ce type d'initiatives est (relativement) facile et pourrait être fait immédiatement. Cela nous ferait déjà avancer dans la bonne direction. »

Prenons par exemple la reforestation. Les forêts tropicales du globe sont hélas devenues une source plutôt qu'un puits pour les émissions de CO₂, soit que l'on y coupe et brûle les arbres, soit que les forêts ravagées se dégradent. Pour ramener les forêts en régime d'émissions négatives, il faudrait d'abord réformer en profondeur le marché international du bois, qui est fortement influencé par le commerce illégal.

Au-delà de ça, les lieux qui s'imposent à l'évidence pour replanter sont les terrains que l'on a défrichés pour des cultures ou pour le pâturage, mais que l'on a abandonnés parce qu'ils se sont révélés improductifs. En restaurant 5 millions de kilomètres carrés de terrains de ce type, on pourrait séquestrer 3,7 milliards de tonnes de CO₂ par an si des fonds suffisants y étaient consacrés, selon une étude publiée en 2015 dans *Nature Climate Change* et dirigée

par Richard Houghton, du centre de recherche de Woods Hole, aux États-Unis.

En retransformant en forêts toutes les terres qui avaient été défrichées pour en faire des pâturages, on produirait jusqu'à 10 milliards de tonnes d'émissions négatives par an, selon Bronson Griscom, directeur de la science du carbone forestier de l'ONG The Nature Conservancy. C'est une part non négligeable de la récupération du CO₂ nécessaire chaque année. Mais cette mesure suppose une baisse mondiale de la consommation de viande, ce qui va à l'encontre de la tendance actuelle.

Sabine Fuss et ses coauteurs prédisent un potentiel plus modeste. La quantité de CO₂ séquestré déclinera quand les forêts arriveront à maturité et que leur croissance sera ralentie. Et il faut compter l'impact des incendies, de la déforestation et du changement climatique. Mais même en prenant en compte ces facteurs limitants, l'expansion des forêts pourrait constituer une mesure de transition critique, en attendant que le captage direct dans l'air et d'autres technologies se développent à grande échelle. Sabine Fuss évalue un potentiel compris entre 0,5 et 3,6 milliards de tonnes par an de CO₂ ainsi capturé dès le

adoptant un système de rotation des pâturages, le pacage pourrait être plus productif tout en améliorant le stockage du carbone dans les sols. Sabine Fuss estime qu'en améliorant la séquestration dans les sols, on aurait des émissions négatives de 5,3 milliards de tonnes de CO₂ par an (265 milliards de tonnes pour l'ensemble du xxi^e siècle) pour moins de 100 dollars la tonne.

Cela s'ajouterait au biochar. Dans cette forme d'extraction du carbone, un four spécialisé chauffe en l'absence d'oxygène de la biomasse, ce qui a pour effet de la transformer en une sorte de charbon tout en générant des produits dérivés utiles tels que de l'huile pyrolytique ou du gaz. En appliquant du biochar aux champs, on fixe du carbone dans le sol et on améliore le rendement des cultures. Mais personne n'a encore essayé de déployer le biochar à grande échelle. Sabine Fuss et ses coauteurs le considèrent comme un puits plausible de 0,3 à 2 milliards de tonnes de CO₂ par an, pour un coût allant de 90 à 120 dollars la tonne. En intégrant sur le siècle, cela ferait 100 milliards de tonnes.

Une autre approche est celle de la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS). Les plans initiaux de nombreux pays pour atteindre leurs engagements dans le cadre de l'accord de Paris en dépendent, mais cette approche est très controversée. Une centrale brûle du bois, des déchets agricoles ou d'autres formes de biomasse, comme du millet vivace (*Panicum virgatum*). Ces sources extraient du CO₂ de l'atmosphère lorsqu'elles poussent et se multiplient. La combustion le libère à nouveau, et la centrale le récupère à la sortie de la cheminée, pour l'expédier dans des formations géologiques profondes pour un stockage permanent.

Mais la reforestation pour la production de biocombustible à l'échelle envisagée par certains partisans se ferait au détriment des surfaces arables disponibles, d'où une menace sur la production alimentaire et la préservation de l'environnement, ainsi que sur l'extraction du carbone par d'autres méthodes telles que la reforestation et la séquestration dans le sol. De plus, le fait de récupérer les émissions à la sortie de la cheminée réduit fortement le rendement de la centrale, du moins avec les techniques actuelles. C'est pourquoi Sabine Fuss n'estime pas le rendement soutenable de la BECCS à plus de 2 milliards de tonnes par an, bien au-dessous des prédictions d'autres chercheurs, pour un coût de 100 à 200 dollars la tonne. Cette estimation conduit à 100 milliards de tonnes d'émissions négatives d'ici à 2100.

Deux dernières méthodes de captage du carbone restent à présenter. L'altération forcée exploite un processus naturel: le CO₂ de l'air se convertit en carbonate quand il est exposé à ➤

Les forêts pourraient absorber jusqu'à 3,6 milliards de tonnes de CO₂ par an

milieu du siècle. Cela pourrait couvrir 25 à 180 des 1 000 milliards de tonnes à extraire au cours de ce siècle, pour un coût compris entre 5 et 50 dollars la tonne de CO₂.

Avec une meilleure gestion, on pourrait augmenter les gains. Bronson Griscom note par exemple que les sylviculteurs du sud-est des États-Unis coupent sciemment les pins à torches (*Pinus taeda*) plusieurs années avant qu'ils atteignent leur production optimale. En leur permettant de vendre des crédits carbone pour couvrir les années supplémentaires de croissance, on pourrait retarder les coupes jusqu'à l'âge optimal, ce qui augmenterait la quantité de bois, donc celle de carbone stocké.

De même, en faisant pousser des plantes qui fixent l'azote dans les pâturages et en

> certains types de roches broyées. La question est de savoir si les chercheurs peuvent trouver un moyen économique de réduire en poudre les roches adéquates, afin d'accélérer le processus naturel. Sabine Fuss estime le potentiel à 2 à 4 milliards de tonnes par an, pour 50 à 200 dollars la tonne.

Enfin, son équipe conclut que la fertilisation des océans (saupoudrer du fer ou d'autres nutriments dans l'océan pour stimuler la croissance d'algues et autres éléments du plancton, qui absorbent du CO₂) serait une solution trop inefficace et à trop court terme pour justifier les potentiels effets secondaires sur les écosystèmes.

TIRER DES BÉNÉFICES PLUTÔT QU'ENDOSSER DES COÛTS

Que conclure de toutes ces estimations? En additionnant les fourchettes de l'étude de Sabine Fuss, on arrive à un total compris entre 150 milliards et un peu plus de 1000 milliards de tonnes d'ici à 2100. Ce dernier chiffre pourrait donner l'impression que la solution du problème climatique est à notre portée. Mais on ne peut pas simplement ajouter les chiffres, à cause de la concurrence entre les différentes méthodes. Ce que l'on peut faire, explique Sabine Fuss, c'est gérer le portefeuille pour tirer parti des recouvrements bénéfiques – par exemple déployer l'altération forcée sur les terres où est cultivée la biomasse de la BECCS.

Ce dont toutes ces méthodes ont besoin, affirment les scientifiques, c'est un investissement massif dans la recherche et le développement. Mais les gouvernements ont rechigné à payer la facture des technologies d'émissions négatives à cause de la résistance idéologique à «choisir des gagnants» et parce que certains des investissements passés ont été des échecs notoires. Le département de l'Énergie des États-Unis, par exemple, a dépensé en vain des fortunes sur des projets de captage du carbone destinés à faire des centrales à charbon «propres».

Une «taxe carbone» permettrait d'éviter de devoir choisir des gagnants en imposant un coût aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Cela créerait une motivation financière à la fois pour réduire les émissions maintenant, et plus tard pour aller récupérer les émissions passées. Le Royaume-Uni a imposé une taxe de ce type, actuellement à environ 25 dollars la tonne, qui porte principalement sur les centrales à combustibles fossiles; cela a eu pour effet de diviser par deux les émissions liées au charbon entre 2015 et 2016. Mais la plupart des gouvernements répugnent à une telle taxation, considérant qu'elle est trop radicale pour les économies qui reposent sur les combustibles fossiles.

À de rares exceptions près, les grandes sociétés ont également rechigné à investir dans

les technologies de captage du CO₂ parce que, jusque récemment, elles ne voyaient pas de marché. Pour elles, guérir le climat sert l'intérêt général, mais ne constitue pas une source de profits. Mais cela est peut-être en train de changer grâce à un bouquet d'incitations fiscales (étonnamment bipartisan) approuvé par le Congrès des États-Unis au début de 2018. La législation dite 45Q augmente notablement les crédits d'impôts que les entreprises peuvent réclamer dans les douze prochaines années, pas seulement pour capturer le CO₂ et le séquestrer dans le sol (avec une remise d'impôts allant jusqu'à 50 dollars par tonne), mais aussi pour utiliser le CO₂ de diverses façons.

L'utilisation la plus controversée est la «récupération améliorée (ou assistée) du pétrole»: une compagnie pétrolière achète du CO₂, le transporte par pipeline et l'injecte dans ses puits de pétrole en voie d'épuisement, afin de récupérer du pétrole que l'on ne pourrait pas extraire de manière classique. Une telle solution au changement climatique qui suggère de produire davantage de carburants fossiles peut sembler assez orwellienne, et certains critiques environnementaux ont accusé le 45Q de n'être rien d'autre qu'un programme déguisé de subvention des combustibles fossiles. Mais la récupération améliorée du pétrole semble effectivement réduire les émissions actuelles



Investir massivement dans la recherche et le développement de ces méthodes est nécessaire



parce que le CO₂ capturé, typiquement issu de raffineries de gaz naturel ou d'éthanol, est séquestré dans le sous-sol.

Certains défenseurs de l'environnement, comme Kurt Waltzer, de la Clean Air Task Force, soutiennent que transformer le captage du carbone en une technologie relative aux énergies, et non simplement une technologie relative aux émissions, est le premier pas vers une adoption à grande échelle par le marché de l'extraction du CO₂. Cela transforme le CO₂ recapturé en un produit à vendre et à acheter, plutôt que seulement un coût à subir – peut-être la clé des futures émissions négatives.

Un portefeuille de méthodes de captage du carbone, de taxes et de marchés permettrait-il d'atteindre l'objectif de 1000 milliards de tonnes d'ici à 2100? La surchauffe de l'été 2018 aura peut-être marqué un tournant. L'Ouest américain était en feu. Sur quatre continents, on a connu des canicules sévères. Les climatologues ont abandonné leur discours prudent et préviennent, dans *PNAS*, qu'un accroissement du réchauffement risque de faire basculer la planète vers une «Terre-serre chaude... vraisemblablement incontrôlable et dangereuse pour de nombreuses populations». Au cas où ce message ne serait pas assez fort, l'un des principaux auteurs de l'article, Hans Joachim Schellnhuber, directeur émérite de l'institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK), en Allemagne, a déclaré aux journalistes que les effets en cascade pourraient conduire à un monde qui ne pourrait plus faire vivre que 1 milliard d'humains, bien loin des 7,5 milliards actuels.

Pour certains dirigeants politiques, encore aujourd'hui, le changement climatique ne serait pas une certitude, en dépit des preuves indiscutables d'un présent alarmant et d'un avenir qui s'annonce plus sombre encore. Ce

qui est déconcertant avec les technologies d'émissions négatives, c'est qu'il y ait tant d'incertitudes même pour les scientifiques eux-mêmes. «Chacun fait valoir à quel point tout dépend du substrat, de la partie du monde où vous vous trouvez, des précipitations qui y tombent et de la température», commente ainsi Stephanie Roe, écologue à l'université de Virginie, à propos de l'enrichissement du sol en carbone.

IL EST GRAND TEMPS DE COMMENCER

Les chercheurs débattent aussi de savoir s'il sera possible de développer l'une ou l'autre des méthodes de captage du carbone jusqu'à atteindre des milliards de tonnes par an. «On discute peut-être un peu trop de l'échelle finale à atteindre», dit Brendan Jordan, de l'institut des Grandes Plaines, à Minneapolis. «Je crains que cela ne nous paralyse.» Autrement dit, nous devons commencer à réaliser des émissions négatives malgré les incertitudes, parce qu'elles sont triviales comparées à un monde dans lequel le jeu des chaises musicales du changement climatique s'arrêterait, et où 6,5 milliards de personnes, voire plus, n'auraient pas de place où s'asseoir. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. C. Minx et al., **Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis**, *Environmental Research Letters*, vol. 13(6), article 063001, 2018.

S. Fuss et al., **Negative emissions – Part 2: Costs, potentials, and side effects**, *Environmental Research Letters*, vol. 13(6), article 063002, 2018.

W. Steffen et al., **Trajectories of the Earth system in the Anthropocene**, *PNAS*, vol. 115(33), pp. 8252-8259, 2018.

B. W. Griscom et al., **Natural Climate Solutions**, *PNAS*, vol. 114(44), pp. 11645-11650, 2017.

la nature arctique dans un climat d'urgence

colloque

vendredi 12 avril de 14h à 18h
— samedi 13 avril de 10h à 18h

©Rémy Marion

cité

sciences
et industrie

La biodiversité arctique n'a pas d'équivalent sur Terre, ni à plus basse latitude ni même en Antarctique. Quel est l'impact de l'évolution du climat sur la nature arctique? Quels changements observe-t-on sur la végétation, le rythme du lemming, le comportement des orques ou du renard polaire? Communications scientifiques et témoignages révèlent les réalités du terrain.

Accès gratuit dans la limite des places disponibles.

Avec notamment:

Isabelle Autissier, présidente du WWF France;
Jean-François Lagrot, grand reporter photographe;
Aude Lalis, maître de conférences au Muséum national d'Histoire naturelle;
Esther Levesques, professeur, université du Québec à Trois-Rivières;
Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue, co-présidente du GIEC, France;
Jérôme Moreau, Groupe de recherches en Écologie Arctique (GREAA), France;
Olivier Truc, écrivain et journaliste, correspondant à Stockholm, Suède.

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris
📍 Porte de la Villette 📍 3b Cité des sciences et de l'industrie

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



Vénus

Pourquoi est-elle si différente de la Terre?

Atmosphère irrespirable, pression gigantesque, température infernale... Alors que Vénus est née dans des conditions similaires à celles de la Terre, elle a évolué très différemment. Cette planète offre cependant un éclairage unique sur les débuts de la tectonique des plaques terrestre ainsi que sur les chances d'apparition de la vie ailleurs dans l'Univers.