

> 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'additionner 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.