



LE STOCKAGE DU CARBONE : *nécessité, options, limites*

PRÉAMBULE

Le présent document a pour objectif de présenter de façon synthétique et accessible les enjeux et les principales voies du stockage de carbone. Il vise à donner des bases aussi factuelles, objectives et sourcées que possible pour permettre chacun de s'appropriier les ordres de grandeur, les potentiels et les limites des principaux leviers d'action et pouvoir prendre part aux débats qui s'ouvrent sur le sujet.

Antoine de Ravignan, Sylvain Doublet, Antoine Bonduelle
- Janvier 2021 -



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	p.3
Un levier indispensable	p.4
Voies naturelles, voies technologiques	p.6
Séquestration via les puits naturels : incertitudes, limites, opportunités	p.8
• Le stockage dans les sols : le mythe du 4 pour 1000	p.8
• Reboiser ? Oui, mais surtout cesser de déboiser	p.10
• Préserver la pompe océanique	p.12
Solutions technologiques : vers plus de réalisme ?	p.13
• Le stockage dans les produits issus de la biomasse : un pari difficile	p.13
• La capture du CO ₂ : un appui pour sortir des fossiles, non un moyen d'y rester	p.14
• Le BECSC : un puits de carbone artificiel très hasardeux	p.16
Conclusion : un débat moins idéologique et plus pragmatique	p.18
• L'illusionnisme technicien ne fait plus recette	p.18
• Casser l'illusion de la compensation	p.20
Annexes	p.23
• Annexe 1 : La géo-ingénierie s'invite dans les débats	p.23
• Annexe 2 : Photosynthèse : la pompe à carbone planétaire	p.24



INTRODUCTION

Le stockage du carbone est devenu un sujet incontournable de la politique climatique : en quoi peut-il venir au secours de nos efforts – très insuffisants - de réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Si la question n'est pas nouvelle, la discussion devient de plus en plus pressante avec le retard pris dans la mise en œuvre des objectifs de l'Accord de Paris signé en 2015.

Le stockage du carbone désigne l'ensemble des actions qu'il est possible de mener pour réduire « ex-post » le CO₂ émis et qui s'accumule ensuite dans l'atmosphère¹, à la différence des mesures visant à le supprimer en amont (par exemple, le remplacement d'une centrale à charbon par des éoliennes). Ces actions, qu'il faut distinguer de la « géo-ingénierie » (cf *annexe 1*) visent à capturer à la source puis stocker sur la longue durée le CO₂ émis, voire retirer celui-ci de l'atmosphère. On parle dans ce dernier cas d'« émissions négatives ». Pour rappel, l'accroissement du niveau de concentration du CO₂ dans l'air est le principal facteur de l'augmentation de l'effet de serre et donc du réchauffement climatique en cours. Il ne faut cependant jamais perdre de vue qu'il est loin d'être le seul. Le CO₂ représente environ 76 % des émissions globales (dont 65 % viennent des énergies fossiles et du ciment et 11% des changements d'usages des sols, principalement la déforestation). Il faut ajouter 16% de méthane (CH₄), en forte augmentation (élevage, riziculture, exploitation gazière, déchets...), 6% de protoxyde d'azote (N₂O), issus principalement des épandages d'engrais et 2% provenant des gaz fluorés artificiels (HFC...)

1. Une fois émise, la durée de séjour d'une molécule de CO₂ dans l'atmosphère est longue : plus d'une centaine d'années.

UN LEVIER INDISPENSABLE

Toute la question est de savoir quel sont les potentiels de stockage du CO₂, compte tenu des contraintes économiques, sociales, écologiques. Mais compte tenu aussi des échelles de temps qu'impose l'action climatique.

L'Accord de Paris a précisé l'objectif, en s'appuyant sur des bases scientifiques solides établies par le Giec² : pour stabiliser le réchauffement bien en dessous de 2°C, il faut parvenir avant le dernier quart du siècle à la « neutralité » des émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine. Autrement dit ramener ces émissions à niveau tel qu'elles soient strictement compensées par les absorptions de CO₂ atmosphérique. Pour se faire une idée des ordres de grandeur en jeu, les émissions de l'Hexagone ont représenté en 2019 dix-sept fois le volume de ses absorptions naturelles via la végétation (respectivement 441 et 26 millions de tonnes de CO₂ équivalent³). Le niveau plus ou moins élevé de stockage sur lequel il sera possible de compter vers le milieu du siècle contingentera donc le volume plus ou moins important de ce que l'humanité sera en droit d'émettre sans que cela ne réchauffe davantage la planète.

Cet objectif de neutralité n'est cependant pas toujours bien compris. L'arrêt du réchauffement climatique suppose certes de parvenir à un état d'équilibre entre émissions et absorptions, de sorte la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère cesse d'augmenter. Mais il ne faut pas perdre de vue que le niveau à partir duquel la température terrestre cessera de progresser dépend du niveau auquel les concentrations de gaz à effet de serre auront été stabilisées. La question n'est donc pas tant celle de parvenir à la « neutralité » mondiale en un demi-siècle que de ne pas dépasser les taux de concentration associé à un niveau de réchauffement.

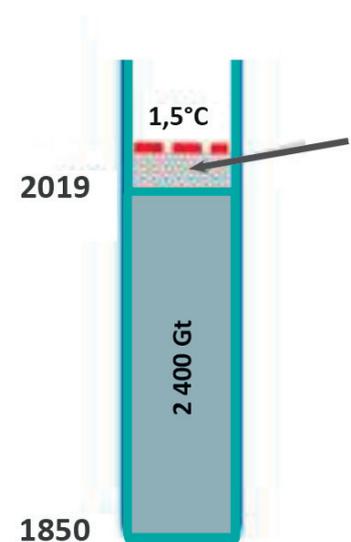
2. Groupe international d'experts sur le climat (www.ipcc.ch), mandaté par les Nations unies. Ses rapports, qui compilent et évaluent l'ensemble des connaissances scientifiques sur le climat, sont approuvés à l'unanimité des Etats membres.

3. Citepa <https://www.citepa.org/fr/2020-co2e/>

À la veille de l'épidémie de Covid, les émissions annuelles de CO₂ liées à l'activité humaine, jusque-là en progression constante, avaient atteint un niveau estimé à 43 gigatonnes⁴ en 2019 au niveau mondial, (55 Gt CO₂eq tous gaz à effet de serre compris). Selon le rapport du Giec étudiant les implications d'un objectif de réchauffement moyen limité à 1,5 ° C par rapport à la période préindustrielle, il faudrait, pour avoir deux chances sur trois de ne pas dépasser ce seuil, que l'humanité limite le total de ses émissions futures de CO₂ à 420 gigatonnes. C'est le « budget carbone » auquel elle a encore droit si elle veut se donner une chance raisonnable de ne pas franchir la barre des 1,5 ° C, considérée comme le niveau en-deçà duquel les impacts du changement climatique restent maîtrisables. Cela ne représente qu'une dizaine d'années au rythme actuel des émissions mondiales. Pour un objectif de 2°C de réchauffement, au-delà duquel les impacts en cascade du réchauffement ont de très fortes chances de multiplier les situations catastrophiques et de devenir ingérables, l'épuisement de ce budget carbone interviendrait, au rythme actuel, en deux décennies.

Ces environ 420 gigatonnes de CO₂ restantes sont à rapprocher des 2 400 gigatonnes que l'humanité a déjà émises depuis 1850. L'effort à accomplir pour ne jamais épuiser le budget restant est donc colossal. Cela implique de ramener à pratiquement zéro et très rapidement toutes les émissions de CO₂ liées aux énergies fossiles et à l'industrie (37 Gt), qui assurent encore aujourd'hui 80 % de la demande énergétique mondiale, mais également de réaliser des « émissions négatives » pour compenser les émissions qui n'auront pas pu être évitées, essentiellement liées à la production alimentaire.

Nécessaire à long terme pour compenser les inévitables émissions résiduelles, le stockage l'est donc également devenu à court terme pour soutenir l'effort énorme à accomplir pour atteindre la neutralité des émissions sans dépasser le « budget carbone ». Ce levier ne peut plus être rejeté au motif qu'il sert d'alibi à ceux qui veulent différer la sortie des fossiles. Inversement, en surestimer les capacités sur l'horizon proche et, a fortiori, y voir un moyen d'éviter les actions urgentes de diminution des émissions, c'est aggraver la situation climatique.



4. 1 gigatonne (Gt) = 1 milliard de tonnes
 5. Global Carbon Budget https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/19/files/GCP_CarbonBudget_2019.pdf
 6. <https://www.ipcc.ch/sr15/> Voir le résumé en français : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

VOIES NATURELLES, VOIES TECHNOLOGIQUES

Les méthodes de stockage du carbone appartiennent à deux grandes familles, qui peuvent se combiner entre elles.

La première rassemble toutes les **pratiques et techniques s'appuyant sur la photosynthèse** et consistant à **renforcer les « puits de carbone » naturels** – le stockage du CO₂ via la croissance de la végétation - (*cf. annexe 2*) et dont le rôle climatique est primordial : reforestation, techniques agricoles permettant d'accroître le taux de carbone dans le sol, culture d'algues...

À côté de ces « solutions basées sur la nature » existent des **voies technologiques qui ne font pas appel à la photosynthèse**. Les solutions les plus avancées restent encore aujourd'hui au stade de la recherche ou de démonstrateurs industriels. Les dispositifs de capture à la source puis d'enfouissement souterrain du CO₂ inspirés des techniques employées dans l'industrie pétrolière (dits CSC ou CCS⁷ en anglais), conçus pour des foyers d'émissions très concentrées (cimenteries, aciéries, centrales à charbon...) ont été étudiés et expérimentés de longue date.

Depuis quelques années apparaissent, au stade de prototypes, des systèmes de filtration permettant de capturer directement le CO₂ diffus dans l'atmosphère (DAC⁸ en anglais), dont la caractéristique est d'être très énergivores. D'autres techniques visant à stimuler les réactions chimiques par lesquelles les océans ou des roches comme le basalte ou l'olivine⁹ peuvent absorber le CO₂ atmosphérique sont également étudiées et expérimentées.

D'autres solutions également émergentes combinent photosynthèse et technologie. Mais entre les expérimentations de largage de fer dans les océans pour stimuler la croissance du phytoplancton et les efforts pour stocker bois et autres matières végétales sous forme de biens à vie longue (bâtiments, matériaux de construction, meubles et autres objets de consommation supposés durer), ce ne sont pas les mêmes risques, les mêmes perspectives de déploiement, les mêmes visions politiques. Dans cet éventail des moyens combinant mobilisation de la « nature » et process industriels, la piste la plus mise en avant jusqu'ici dans la littérature scientifique et les rapports publics est « la biomasse-énergie avec CSC » (BECSC ou BECCS¹⁰ en anglais) . Cela consiste à capturer puis stocker dans le sous-sol le CO₂ émis par des centrales thermiques brûlant du bois et autres végétaux. Une chaufferie-bois qui produit de la chaleur (pour alimenter par exemple le réseau de chaleur d'une ville) et/ou de l'électricité est supposée climatiquement neutre : au CO₂ émis dans la combustion correspond le CO₂ capturé quelques années plus tôt par le combustible¹¹. Mais si cette chaufferie-bois est équipée d'un dispositif de capture du CO₂, lequel sera ensuite transporté et stocké sous terre, alors elle permet non seulement de fournir de l'énergie, mais de réaliser des « émissions négatives ». Le BECSC n'existe qu'au stade de projets pilotes, une vingtaine dans le monde.

7. Carbon capture and storage.

8. Direct air capture.

9. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2015/11/09/broyer-des-roches-pour-absorber-du-co2_4805865_1650684.html

10. Les derniers rapports du GIEC (AR5 de 2014 et SR15 de 2017) n'intègrent que l'option du « BECCS » à l'exception d'autres solutions technologiques.

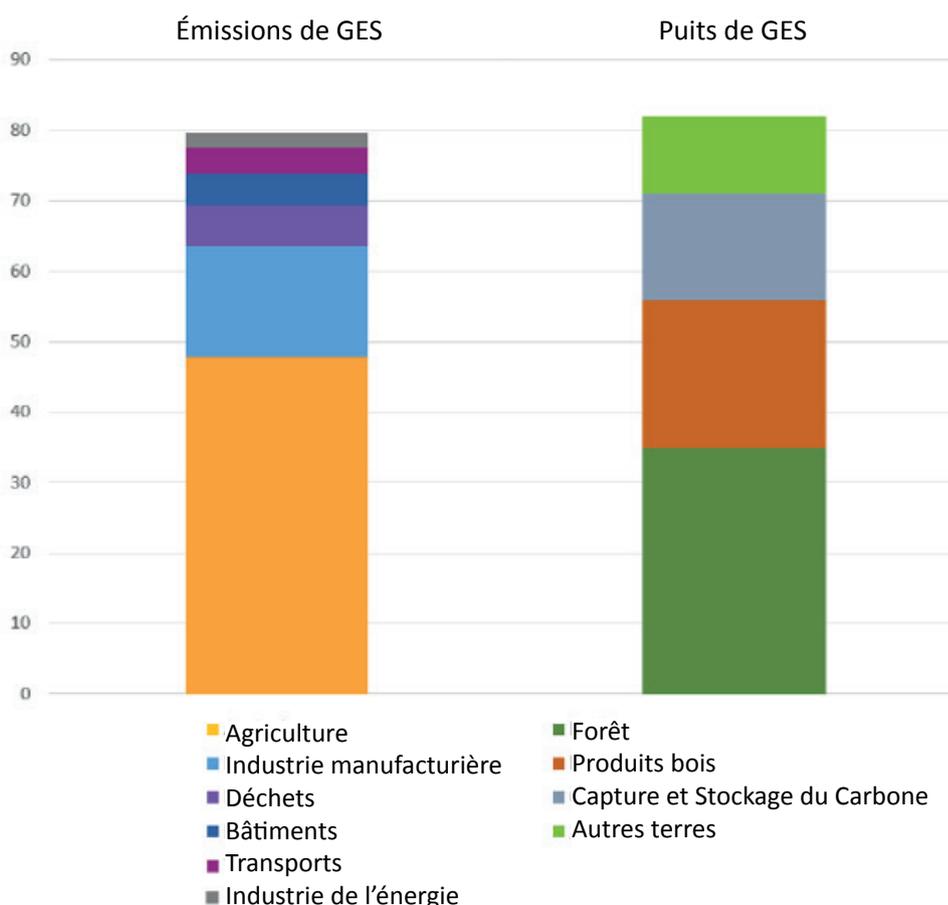
11. Cette neutralité carbone « apparente » est aujourd'hui discutée (*cf note bois- Solagro - 2021*)

Toutes ces approches du stockage du carbone, qu'elles s'appuient sur la photosynthèse ou d'autres voies, posent de redoutables problèmes économiques, sociaux, environnementaux, techniques.

Quels sont alors leurs potentiels au regard des contraintes? À l'heure où les États commencent à définir des feuilles de route pour atteindre la neutralité de leurs émissions, dans lesquelles ils intègrent des objectifs plus ou moins importants de stockage pour « boucler la boucle », la crédibilité de ces estimations est un sujet crucial.

Par exemple, selon sa « Stratégie nationale bas carbone » (SNBC¹²) publiée en mars 2020, la France veut avoir ramené en 2050 ses émissions annuelles de 441 MtCOe (en 2019) à 80 Mt (une division par 5,5). Ces 80 Mt de CO₂ sont ainsi le niveau visé pour les absorptions territoriales annuelles en 2050; un chiffre très élevé si l'on considère que les absorptions nettes actuelles s'élèvent à 26 Mt par an actuellement (grâce aux forêts) et que cette valeur a beaucoup diminué par rapport aux années 2000 (45 Mt). La SNBC envisage d'atteindre en 2050 un stockage « naturel » par les forêts et les sols de 45 Mt annuelles (soit un retour au maximum historique atteint sur la période 1990-2019), complété par 35 Mt environ de stockage artificiel dans les produits bois et via les technologies CSC et BECCS.

Puits et émissions de gaz à effet de serre dans le scénario AMS en 2050



Source : Doc SNBC 2 p. 21/192

SÉQUESTRATION VIA LES PUITES NATURELS : INCERTITUDES, LIMITES ET OPPORTUNITÉS

LE STOCKAGE DANS LES SOLS : LE MYTHE DU 4 POUR 1000

L'estimation du potentiel de séquestration est un exercice extrêmement complexe, et qui donne lieu à simplismes et exagérations. Au chapitre du stockage dans les sols, l'initiative « 4 pour 1000 », lancée par la France lors de la conférence de Paris pour le climat (la COP 21) en offre une illustration.

Considérant (très grossièrement) que les émissions annuelles de CO₂ dues aux activités humaines représentent 4 millièmes du carbone organique stocké dans les sols, on pourrait en théorie intégralement compenser ces émissions en augmentant de 0,4 % par an (4 pour mille) la teneur en carbone des sols, via un changement de pratiques agricoles et l'agroforesterie. Un calcul qui suppose que ce gain puisse être réalisé chaque année et indéfiniment sur absolument toutes les terres où pousse quelque chose, ce qui n'a aucun sens.

Une étude de juillet 2019 menée par Inrae et l'Ademe a tenté d'estimer le potentiel de stockage des sols en France métropolitaine « toutes choses égales par ailleurs » (sans modification de la répartition des sols entre cultures, prairies, forêts et zones construites¹³) au regard de cet objectif des « 4 pour mille ». Elle conclut que le stockage maximal additionnel, à l'échelle hexagonale, serait, à l'horizon 2050, de 8,4 Mt de carbone par an. Cela correspond à 1,9 pour mille du carbone stocké dans les sols métropolitains. Loin, donc, de 4 pour mille. Ces 8,4 Mt de carbone égalent 31 millions de tonnes de CO₂ retirées de l'atmosphère par an¹⁴, soit 7 % seulement des émissions nationales en 2019 (441 Mt CO₂e) et 36 % des seules émissions du secteur agricole (85,5 Mt CO₂e). Le levier est réel, mais très insuffisant.

13. <https://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1000-carbone-sols-potentiel-france>

14. Une molécule de CO₂ contient un atome de C dont la masse atomique est 12 et deux atomes d'oxygène dont la masse atomique est 16. Pour convertir une masse de CO₂ en une masse de C, il faut diviser par 3,66 : $(12+16+16)/12 = 3,66$.

Surtout, le calcul de ce potentiel maximal repose sur des hypothèses qui ont peu de chances de se vérifier. En premier lieu, c'est un raisonnement « toutes choses égales par ailleurs ». Il présuppose que sur les trente prochaines années, il n'y aura pas de changement de répartition d'usage des sols.

Or un scénario qui verrait se poursuivre la régression des élevages à l'herbe au profit des terres cultivées n'est pas à exclure.

Ensuite, les impacts du changement climatique d'ici à 2050 pourraient affecter la croissance de la végétation.

Enfin, ce scénario suppose une mise en œuvre systématique des bonnes pratiques permettant de relever le niveau le carbone dans les sols, ce qui suppose une politique extrêmement volontariste et impliquerait des changements profonds de politique agricole, notamment l'abandon d'un régime d'aides à l'hectare au profit de soutiens fondés sur la réalité des services écologiques rendus.

Ces bonnes pratiques devraient s'appliquer essentiellement aux grandes cultures. En effet, leurs sols se caractérisent par des taux de carbone assez bas du fait des modes d'exploitation jusqu'ici mis en œuvre et où le potentiel est par conséquent important. Il n'y a inversement pas ou peu de potentiel là où les taux de carbone sont proches de leur maximum physique, c'est-à-dire les forêts et les prés. Il faudrait généraliser en grande culture le semis direct au lieu du labour, la mise en place ou la plus grande fréquence des cultures intermédiaires dans les rotations (sans récolte de leur biomasse), l'accroissement des prairies temporaires dans les rotations, la fertilisation organique, la plantation de haies et d'arbres à l'intérieur des parcelles...

Entre ce qui pourra effectivement être réalisé et le potentiel maximum de stockage estimé, la marche est donc très haute. Quant à l'estimation du potentiel maximal, elle est entourée elle-même d'énormes marges d'incertitude. À l'échelle mondiale, les travaux scientifiques compilés par le Giec estiment ainsi entre 0,26 et 6,78 gigatonnes de CO₂ par an à l'horizon 2050 le potentiel de séquestration dans les sols par les bonnes pratiques agricoles¹⁵.

Il y a une autre limite, qui intéresse le long terme. En supposant que ces bonnes pratiques agricoles soient maximisées, il va venir un moment où il ne sera plus possible d'accroître le taux de carbone dans les sols ; soit que le maximum agronomique possible aura été atteint (hypothèse d'école), soit que les coûts pour gagner les dernières tonnes de carbone à l'hectare soient prohibitifs. Or une fois que la boîte « sol » aura atteint son maximum (physique ou économique), elle ne capturera plus de CO₂ atmosphérique et ne compensera donc plus les émissions.

Toutes ces réalités n'enlèvent rien au fait que les sols représentent un énorme potentiel de stockage à mobiliser sur les prochaines décennies. De plus, les changements de méthodes culturales qu'une telle politique induirait auront a priori un effet positif sur la biodiversité et sur l'emploi en agriculture, à l'inverse des tendances actuelles.

15. Rapport Changement climatique et terres émergées, résumé en français sur https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_fr.pdf rapport complet sur <https://www.ipcc.ch/srccl/download/>

REBOISER ? OUI, MAIS SURTOUT CESSER DE DÉBOISER

En ce qui concerne l'amélioration du stockage par la biomasse aérienne, autrement dit le boisement et le reboisement, les limites tiennent surtout aux usages concurrents des sols.

Une étude citée par le Giec souligne que pour extraire en plantant des arbres 1,1 à 3,3 Gt de CO₂ par an (2,5 % à 7,6 % des émissions actuelles de CO₂), il faudrait couvrir 320 000 à 970 000 km₂ de terres cultivables. Certaines modélisations présentées dans le rapport « 1,5 ° C » du Giec vont jusqu'à envisager un accroissement de la surface forestière allant jusqu'à 9,5 millions de km² d'ici à la fin du siècle pour rester sous la barre des 1,5 °C de réchauffement (la surface actuelle des forêts, des cultures et des pâturages étant respectivement estimées à 40 Mkm², 15,6 Mkm² et 27 Mkm², auxquelles s'ajoutent 21 Mkm² de savanes et brousses souvent pâturées).

Au-delà des problèmes écologiques que poseraient des programmes de reboisement massifs par monocultures d'essences à croissance rapide (sur les sols, les ressources en eau, la biodiversité), pourrait se poser celui de la disponibilité des terres par rapport aux besoins alimentaires d'une planète qui risque de compter dix milliards d'êtres humains au milieu du siècle.

Dans ce contexte, la priorité est d'une part de reboiser partout où il est possible de le faire sans nuire à la sécurité alimentaire et à la biodiversité (et plutôt en les améliorant, avec les cobénéfices de l'agroforesterie); et d'autre part d'arrêter de déboiser ou de dégrader les forêts existantes¹⁶.

À l'échelle de la planète, la déforestation représente l'essentiel des émissions de CO₂ liées aux changements d'usage des sols, de l'ordre de 5 Gt par an. Il est intéressant de noter que ce niveau n'a pas beaucoup évolué au cours de l'histoire récente : il était d'environ 4,5 Gt au début du siècle dernier.

Ce qui a changé, c'est sa localisation : phénomène essentiellement européen puis nord-américain jusqu'au début du XX^{ème} siècle, la déforestation s'est déplacée ensuite vers les pays tropicaux, toujours pour les mêmes raisons : l'extension des surfaces consacrées à l'agriculture et à l'élevage¹⁷. Dans les pays développés, l'intensification permise par la chimie et la mécanisation a permis d'accroître très fortement la production agricole et de répondre à la demande alimentaire en arrêtant d'empiéter sur les forêts. L'Asie a connu une évolution comparable. Mais cette intensification ne repose pas sur des bases durables.

Stopper la déforestation tout en convertissant les systèmes productifs à l'agroécologie et en nourrissant mieux une humanité plus nombreuse représente une révolution du champ jusqu'à l'assiette. Elle impose notamment de **réduire drastiquement la consommation de viande dans les pays riches et sa croissance rapide dans les pays émergents**, la production de viande étant gourmande en espaces cultivés pour l'alimentation animale, et particulièrement les viandes rouges.

16. Selon la littérature citée par le GIEC, à l'échelle mondiale la dégradation des forêts existantes représente une quantité de carbone similaire à la déforestation proprement dite.

17. Voir *Le Tic-tac de l'horloge climatique*, Christian de Perthuis, De Boeck Supérieur, 2019.

Stopper la déforestation tropicale (tirée en large part par les importations des pays riches et émergents en aliments pour le bétail) ne ferait pas que réduire les émissions de CO₂ et préserver la biodiversité de ces zones. L'obligation de revoir les modèles agricoles et alimentaires dans les pays importateurs se traduirait par une réduction de leurs émissions de méthane et de protoxyde d'azote associées à l'agriculture intensive et à l'élevage, voire l'amélioration de la santé avec une alimentation moins carnée. Pour autant, du point de vue du climat, si la sauvegarde des forêts tropicales évite des émissions considérables, elle offre peu de gains de stockage. En effet, ces forêts sont en large partie des forêts arrivées à maturité et ne sont plus guère « stockantes », sauf à reforester des zones déjà défrichées.

Qu'en est-il des forêts plus jeunes ?

Certes, elles continuent à pousser et jouent ainsi un rôle de capture du CO₂ atmosphérique. La forêt française gagne par exemple environ 80 millions de mètres cubes par an, soit un stockage annuel de quelque 50 millions de tonnes de CO₂ par an ces dernières années¹⁸. Mais la question posée est celle de l'augmentation de ces capacités. Le principal levier est l'extension des surfaces boisées, avec les limites fortes par rapport aux autres usages évoquées plus haut.

S'ajoute l'énorme inconnue de l'impact du changement climatique et donc de la capacité des forêts à maintenir, à surface égale, leur gain annuel de biomasse. Au-delà des incendies qui peuvent être maîtrisés par des moyens humains, les successions de sécheresses en France comme ailleurs soumettent les arbres à un stress qu'ils ne peuvent indéfiniment encaisser, tandis qu'on observe de plus en plus de dépérissements. Il ne sera pas évident d'augmenter la capacité de séquestration de la forêt quand son seul maintien représente déjà un défi en termes d'adaptation au changement climatique.

18. Citepa. Les captures liées à l'usage des sols pris dans leur ensemble sont de moitié inférieures (26 Mt CO₂ en 2019), les absorptions par la forêt étant notamment contrebalancées par les émissions liées changement d'usage des sols agricoles et par l'artificialisation (respectivement 20 et 12 Mt CO₂ en 2019).

PRÉSERVER LA POMPE OCÉANIQUE

Des inquiétudes similaires concernent le puits de carbone formé par les océans. Comme la végétation et les sols, l'hydrosphère a absorbé jusqu'à présent des quantités croissantes de CO₂ atmosphérique au fur et à mesure que croissaient les émissions. De l'ordre de 5 gigatonnes de CO₂ par an dans les années 1980, ce stockage océanique atteint aujourd'hui 9 gigatonnes. Beaucoup de chercheurs alertent cependant aujourd'hui sur la possible perte d'efficacité de cette « pompe à carbone » planétaire.

Les océans absorbent du CO₂ de deux façons :

- Par voie chimique, quand le CO₂ atmosphérique se dissout dans l'eau sous forme d'acide carbonique (H₂CO₃), ce qui tend à acidifier l'océan quand ces concentrations deviennent importantes.
- Par voie biologique, le phytoplancton, algues et microalgues absorbant le CO₂ par photosynthèse.

Tant le carbone « chimique » que le carbone « biologique » devraient en théorie à très long terme s'accumuler dans les sédiments.

Cependant, affaiblie par la surpêche comme par la pollution (les plastiques notamment), la biomasse marine joue de plus en plus mal son rôle de « pompe biologique ». De fait, l'accroissement du stockage océanique de carbone observé sur les dernières décennies est essentiellement dû au « pompage chimique ». Or celui-ci a pour conséquence d'acidifier l'océan¹⁹, à des niveaux qui sont devenus aujourd'hui très inquiétants. L'acidité est l'ennemi de tous les organismes qui fabriquent du calcaire pour se développer et se protéger (coquillages qui fabriquent leur carapace mais aussi poissons qui fabriquent leur squelette), ce qui en retour impacte le développement de la biomasse marine²⁰.

Dans ce contexte, le potentiel de développement du puits océanique paraît bien limité. Les solutions technologiques dites de « géoingénierie marine » présentent le double inconvénient de ne pas évaluer leurs risques et de ne pas offrir de perspectives de déploiement dans les délais qu'impose l'urgence climatique. Elles sont citées par le Giec, mais ne sont pas considérées dans ses rapports comme des options crédibles. Elles sont même assez unanimement rejetées, comme les expériences de stimulation de la croissance des planctons en répandant des oxydes de fer (la « fertilisation océanique »), ou les propositions encore plus théoriques de mélanger des composés alcalins (silicates ou carbonates) dans l'eau de mer pour précipiter le carbone dans des sédiments. De même, l'ONU a refusé explicitement l'idée de stocker le gaz carbonique (séparé sous forme liquide) dans le fond des océans.

En définitive, l'urgence est surtout, comme pour la forêt, de protéger la pompe océanique. Et cela passe avant tout par... la baisse des émissions de CO₂ d'une part et, d'autre part, des mesures de préservation de la vie marine : arrêter la surpêche, dépolluer et cesser la pollution plastique, développer la culture d'algues qui apportent nutriments et oxygène...; des algues qui font également partie des ressources pouvant être valorisées à terme pour produire des carburants ou des produits d'alimentation humaine et animale.

Mais à la différence des terres émergées, les océans sont à tous et à personne. La préservation de ce puits de carbone repose sur des accords internationaux, ce qui rend la tâche encore plus complexe.

19. À noter que l'eau de mer ne devient pas « un acide » mais « plus acide » en se rapprochant d'un pH neutre (pH=7). L'eau de mer reste « basique » (pH>8).

20. Un autre phénomène dramatique, la mort des coraux par blanchiment, est lui lié surtout à leur sensibilité très forte à des hausses faibles de température.

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES : VERS PLUS DE RÉALISME ?

LE STOCKAGE DANS LES PRODUITS ISSUS DE LA BIOMASSE : UN PARI DIFFICILE

Le potentiel d'accroissement des puits naturels, exposés par ailleurs aux effets du réchauffement climatique, paraît donc très limité à l'horizon 2050 et ses évaluations bien incertaines. L'enjeu est surtout de parvenir à les entretenir. Qu'en est-il des solutions de stockage artificiel susceptibles de concourir à la neutralité des émissions d'ici au milieu du siècle ?

Trois grands leviers peuvent être activés, que la France, on l'a vu, a inscrits dans sa Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

En 2050, la France mise sur 20 MtCO₂ capturées chaque année dans les produits bois (bois d'œuvre, panneaux de particules...), sur environ 5 Mt de CSC (capture et stockage du CO₂ émis par des installations brûlant des combustibles fossiles) et sur environ 10 de Mt de BECSC (capture et stockage du CO₂ émis par des installations brûlant de la biomasse).

On voit dans ce plan que l'essentiel du carbone qu'il est envisagé de stocker artificiellement chaque année provient de la pousse annuelle de la végétation, la forêt en premier lieu. Les puits artificiels que constituent les produits bois et le BECSC sont ainsi étroitement dépendants de la gestion des puits naturels : il s'agit de créer ou densifier des cultures forestières et agricoles à courte rotation destinées à la production de matériaux, d'énergie ou encore de biochar²¹. Miser sur le bois-matière ou le bois-énergie pour compenser des émissions suppose donc au premier chef une forêt productive, donc des négociations autour des conditions de cette exploitation, voire des situations conflictuelles entre différents groupes d'intérêts.

Du côté de l'aval, développer l'incorporation de bois dans les biens durables, la construction notamment, est évidemment souhaitable, mais encore faut-il que la filière industrielle soit soutenue en conséquence. De même, pour un produit comme le biochar, les expériences -notamment dans l'Oregon- ont montré que les agriculteurs incorporent ces produits dans leurs champs s'ils sont rémunérés ou s'ils y voient un intérêt agronomique.

L'objectif de 20 Mt de CO₂ de stockage dans les produits bois en 2050 retenu par la France paraît ainsi extrêmement ambitieux, même à supposer que la ressource physique soit disponible : les produits bois, qui ont représenté un puits de 5 Mt de CO₂ en 2000 ne captureraient plus que 1 Mt ces dernières années²².

Se posent également d'importants problèmes méthodologiques et de traçabilité pour mesurer quelles quantités de CO₂ évitées permet la substitution de poutres et de meubles en bois à du béton ou du plastique²³.

21. Le biochar est du charbon de bois dont on se sert non comme combustible (émetteur de CO₂) mais pour fertiliser les sols. C'est aussi une forme de stockage artificiel du CO₂ dans les sols. Le charbon de bois (ou biochar) est le produit de la pyrolyse du bois (chauffage à haute température en l'absence d'oxygène), qui produit des gaz (gaz pauvre, hydrogène...), de la chaleur et le carbone à stocker sous forme de charbon végétal assez stable.

22. <https://www.citepa.org/fr/2020-co2e/>

23. Cf note bois-énergie

LA CAPTURE DU CO₂ : UN APPUI POUR SORTIR DES FOSSILES, NON UN MOYEN D'Y RESTER

La capture puis le stockage (CSC) du CO₂ émis par de grosses installations industrielles ou énergétiques existe aujourd'hui de manière marginale. Il n'y a pas de problème technique du côté de la capture. Celle-ci est pratiquée de longue date pour des besoins spécifiques, là où certains process industriels nécessitent du CO₂, comme la production d'ammoniac. La capture, qui ne représente pas plus de 50 millions de tonnes de CO₂ dans le monde aujourd'hui, n'est pas pratiquée à des fins climatiques en raison de ses coûts.

La mettre en œuvre à grande échelle sur les installations industrielles fortement émissives n'est pas envisageable sans réglementation et mécanismes de soutien. Mais autant la capture est justifiée dans le cas d'industries comme l'acier et le ciment, autant elle n'a pas de sens quand des solutions alternatives sont plus compétitives : il est aujourd'hui moins coûteux de réaliser un parc éolien ou photovoltaïque que de construire une centrale à gaz ou au charbon équipée d'un système de récupération du CO₂.

Du côté de la séquestration (dans d'anciens puits gaziers et pétroliers ou des aquifères salins profonds), la question du coût n'est pas la préoccupation principale. Le sujet est surtout celui de la disponibilité de sites, la fiabilité à long terme de ce stockage géologique et son acceptabilité sociale. Il y a également une question d'acceptabilité concernant le transport par pipe-line dans des zones habitées.

Pour ces raisons, la participation du CSC dans les scénarios de neutralité carbone reste donc relativement limitée à horizon proche. Sur un objectif de séquestration de 80 Mt de CO₂ en 2050, la France y recourt pour 15 Mt (dont 5 à partir d'installations fossiles et 10 à partir d'installations brûlant de la biomasse, dites BECSC). Dans le scénario « développement durable » de l'Agence internationale de l'énergie, qui vise la neutralité des émissions mondiales liées à l'énergie en 2070 et suppose des politiques très volontaristes, la capture et le stockage du CO₂, anecdotique aujourd'hui, se développe surtout après 2050 et l'essentiel de l'effort repose d'ici là sur la sortie des fossiles. Dans ce scénario²⁴, qui fait passer les émissions mondiales de CO₂ dues à l'usage des sources fossiles de 35 Gt en 2019 à 3 Gt en 2070, les émissions ont baissé de 10 Gt vers 2030, mais la part de la capture dans ce gain est inférieure à une gigatonne.

Dans ce scénario « vertueux » de l'AIE, la capture-stockage se développe en revanche rapidement après 2030 (à supposer que les incitations économiques et l'acceptabilité soient au rendez-vous) pour atteindre près de 6 Gt en 2050 et 10 Gt en 2070. Il faut signaler dans ce scénario volontariste l'émergence de la capture directe dans l'air (DAC). Elle est encore anecdotique en 2050 (moins de 0,1 Gt) en raison de ses coûts élevés et de sa consommation énergétique, mais elle est en croissance rapide et atteint 0,7 Gt en 2070. Cela est notamment permis par la chute drastique des coûts des énergies renouvelables. La DAC, hier inexistante dans les scénarios prospectifs, y fait désormais son apparition et pourrait jouer un apport utile pour compenser les émissions résiduelles sans solliciter la biomasse. Mais il s'agit de prospective à très long terme. A l'horizon 2070, ces 0,7 Gt de DAC ne pèsent pas lourd dans l'équation et l'essentiel des 10 Gt que l'AIE juge atteignables consistent en CCS issu de fossiles (6 Gt) et de CSC issu de biomasse (3 Gt de BECSC).

Il est important de relever que dans ce nouveau scénario de l'AIE, la capture-stockage du CO₂, vue par nombre d'ONG comme un « loup-garou climatique », n'est plus envisagée comme un moyen de perpétuer l'usage des fossiles mais d'en accompagner la sortie.

Ainsi, dans ce scénario de décarbonation, la production électrique mondiale double entre 2019 et 2070 et couvre une part beaucoup plus importante de la demande énergétique primaire (60 % contre 38 %), mais elle est assurée à 85 % par les énergies renouvelables (désormais très compétitives), tandis que les fossiles (gaz et charbon) ont pratiquement disparu. Ce qui reste de centrales fossiles encore en service à cet horizon (5 % de la production électrique mondiale dans le scénario AIE contre 65 % aujourd'hui) est équipé de CSC. La production électrique ne représentent ainsi que 2 Gt sur 6 Gt de CSC sur installation fossiles imaginés par l'AIE en 2070. Le reste (4 Gt), se répartit entre d'une part en production d'hydrogène bleu (à partir de gaz fossile), solution qui peut dans de nombreuses situations s'avérer moins coûteuse que de produire de l'hydrogène vert (à partir de renouvelables) et, d'autre part, capture des émissions incompressibles de sites industriels (cimenteries, aciéries...).

Ces ordres de grandeur montrent bien que le CSC à partir d'installations fossiles (un potentiel de capture estimé à 6 Gt pas avant cinquante ans) n'est en rien une panacée face aux émissions actuelles (35 Gt par an aujourd'hui pour le seul secteur énergétique et industriel), mais qu'il peut avoir son importance pour boucler la boucle de la neutralité carbone : si l'on retire le CSC à partir d'installations fossiles du scénario de l'AIE, les émissions énergétiques à l'horizon 2070 ne sont pas de 3 Gt de CO₂ mais de 9 Gt (3+6). L'effort à accomplir sur les réductions est donc d'autant plus important.

LE BECSC : UN Puits DE CARBONE ARTIFICIEL TRÈS HASARDEUX

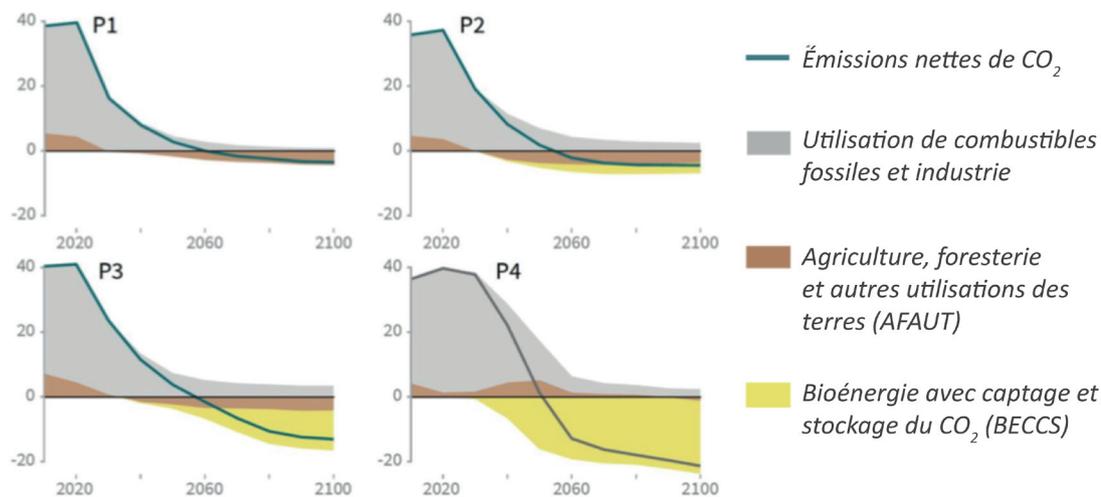
En supposant que puissent être levés les obstacles économiques, écologiques, techniques et sociétaux au déploiement de dispositifs CSC – ce qui n’a rien d’évident -, qu’en est-il du CSC appliqué à des installations de combustion de biomasse (BECSC), solution permettant, elle, de réaliser des « émissions négatives » ?
(cf. annexe 3)

Dans le scénario de l’AIE de neutralité énergétique mondiale à 2070, le BECSC représente la quasi-totalité des émissions négatives réalisées, le DAC, on l’a vu, jouant rôle marginal. Soit 3 Gt annuelles de capture-stockage à partir d’installations brûlant de la biomasse et qui compensent 3 Gt d’émissions énergétiques résiduelles.

L’impact en termes de surface que représente cette mobilisation additionnelle de biomasse n’est pas précisé par l’AIE. Les scénarios présentés dans le rapport « 1,5 °C » du Giec donnent cependant des ordres de grandeur. Pour un scénario où le BECSC représente environ 3 Gt de CO₂ en 2070, l’espace supplémentaire qu’il faudrait mobiliser à des fins énergétiques est de l’ordre d’un million de kilomètres carrés (deux fois la France). Ce n’est pas irréaliste mais très ambitieux. Surtout si l’on exclut d’un tel programme tout projet qui porterait atteinte à la sécurité alimentaire et aux conditions de vie des populations locales, ainsi qu’à la préservation de la biodiversité.

Le scénario de l’AIE ne porte cependant que sur la neutralité du système énergétique. Or il faut également intégrer dans l’équation climatique les émissions liées à l’agriculture et à l’alimentation humaine : CO₂ lié au changement d’usage des terres, méthane et protoxyde d’azote. À défaut de réductions massives dans tous les domaines, y compris alimentaires, il faudra, sauf à abandonner les objectifs climatiques, réaliser de très importantes émissions négatives, avec le risque de concurrence entre usages alimentaires et non alimentaires des sols. Le rapport 1,5° C du Giec a bien posé ce dilemme central. Il modélise plusieurs types de scénarios, qui mobilisent beaucoup ou peu de BECSC (considéré comme le principal moyen de réaliser des émissions négatives) selon les efforts faits ou non du côté des baisses d’émissions.

Bilan des émissions de CO₂ (Gt/an) dans 4 trajectoires modélisées



Source : GIEC 2018

Ces scénarios ne sont évidemment pas des prescriptions. Ils essaient de décrire les implications de trajectoires d'émissions qui sont autant de **choix sociétaux**. Mais quels que soient ces choix, il n'y aura pas de neutralité carbone à long terme sans réaliser **une bonne dose d'émissions négatives**, pas plus que ces émissions négatives, compte tenu des délais dans lesquels elles pourront jouer un rôle significatif, ne permettront de faire l'économie de **ramener de toute urgence vers zéro les émissions positives**.

CONCLUSION

UN DÉBAT MOINS IDÉOLOGIQUE ET PLUS PRAGMATIQUE

L'ILLUSIONNISME TECHNICIEN NE FAIT PLUS RECETTE

Le débat sur le stockage du carbone a mûri. Il avait tendance hier à être manipulé par des fabricants d'illusions, il est revenu à plus de raison et de modestie. Un certain illusionnisme technicien a consisté à essayer de faire croire que les solutions de stockage, les unes fondées sur la nature (typiquement la reforestation), les autres sur l'industrie (typiquement le CSC), et dont on parle depuis le début de l'histoire des politiques climatiques, allaient se développer. Il n'en a rien été.

Depuis le tournant du premier rapport du Giec (1989) et l'adoption de la Convention sur le climat à Rio (1992), l'accroissement (modéré) du puits de carbone constitué par le secteur des terres n'est pas le résultat de l'intervention humaine mais de la hausse de la concentration du CO₂ atmosphérique. Si des politiques significatives à l'échelle globale avaient été mises en œuvre pour renforcer ce puits, on aurait observé une baisse des émissions du secteur des terres liées à l'activité humaine, ce qui ne s'est jamais vérifié.

De même, une technologie comme le CSC a fait l'objet depuis trois décennies d'une production impressionnante de littérature, mais de très peu de démonstration à l'échelle industrielle ni d'investissement. Le CSC était avant tout le village Potemkine de l'industrie pétrolière et des électriciens, une vitrine destinée à faire accroire qu'il y avait une solution pour continuer à extraire des fossiles sans émettre du CO₂. Hormis de rares exceptions dans certains secteurs ou clusters industriels, le CSC était fondamentalement un instrument idéologique au service de l'inaction climatique²⁵.

25. Voir notamment les campagnes de l'organisation de Al Gore <https://www.algore.com/project/the-climate-reality-project> sur la réalité du CCS comme propagande du charbon ici

Aujourd'hui, cet illusionnisme technicien ne fait plus vraiment recette. Au fil du temps, les progrès de la connaissance scientifique ont permis de mieux balayer le champ des possibles, des contraintes et des incertitudes. Les limites fortes des « solutions basées sur la nature » sont mieux évaluées : risque de concurrence avec les usages alimentaires et d'effets adverses pour les populations locales, risque de pertes de biodiversité, risques liés aux effets du réchauffement climatique, sans oublier les risques liés à la gouvernance des projets... Tous ces éléments sont beaucoup mieux connus et intégrés par les acteurs. Les projets qui n'en tiendraient pas compte tendent à être discrédités sous la pression d'organisations citoyennes expertes et leurs relais dans l'opinion. Tel projet de centrale à biomasse BECSC a de fortes chances d'être bloqué si son approvisionnement doit dévaster les forêts de la région et peut au contraire être soutenu s'il permet leur régénération et la valorisation de maquis et garrigues aujourd'hui foyers d'incendies, s'il est source d'emplois locaux et d'autonomie énergétique, s'il sert à alimenter un réseau de chaleur plutôt qu'à fournir de l'électricité beaucoup moins chère à produire par du photovoltaïque ou de l'éolien²⁶.

Ce retour à plus de modestie et de réalisme sur les potentiels de la technique ne doit pas masquer le fait que ses progrès peuvent élargir en même temps l'éventail des possibles. La chute des coûts des énergies renouvelables rend crédible des solutions de capture telles que le DAC qui apparaissent désormais dans les scénarios prospectifs, ce qui était encore inimaginable il y a quelques années. S'il est possible de disposer d'un éventail de solutions techniques pour réaliser des émissions négatives, et pas seulement la biomasse comme c'est aujourd'hui le cas aujourd'hui dans les scénarios prospectifs qui ne connaissent que le BECSC, c'est plutôt une bonne nouvelle. Rien ne sera de trop pour limiter la surchauffe climatique. La posture anti-technicienne n'est pas forcément la meilleure pour contrer l'illusionnisme technicien. Mais ces solutions ne peuvent pas, ne doivent pas être l'occasion d'une nouvelle défusse des états ou des entreprises multinationales.

26. La production d'électricité par BECSC présente néanmoins un intérêt dans le cadre de l'équilibrage d'un réseau fondé sur une très forte pénétration de l'éolien et du photovoltaïque

CASSER L'ILLUSION DE LA COMPENSATION

Ce retour au réel sur les potentiels du stockage et la meilleure compréhension de la dynamique climatique grâce aux travaux du Giec permettent par ailleurs de sortir peu à peu d'une autre illusion, celle de la compensation. Il est désormais clair pour la plupart des acteurs étatiques et économiques, au regard des possibilités limitées d'accroître les puits de carbone sur les cinquante prochaines années, que la priorité des priorités est à la baisse drastique des émissions. Les scénarios de décarbonation de l'AIE au niveau international ou la trajectoire définie par la SNBC française au niveau national, sans ambiguïté sur ce point, en offrent des illustrations, de même que l'évolution du débat sur la définition de la neutralité carbone des entreprises²⁷.

Certains États, secteurs et groupes d'intérêts font bien entendu de la résistance. Le secteur aérien et ses régulateurs, en particulier, ont imposé avec le mécanisme « Corsia » le principe d'une compensation carbone évitant de remettre en cause la demande et les émissions associées. Des États réclament de même de la « souplesse » pour atteindre l'objectif commun de neutralité fixé par l'Accord de Paris. Les négociations toujours en cours sur la mise en œuvre concrète de l'article 6 de l'Accord de Paris qui prévoit la possibilité pour un État (ou un acteur privé tel une compagnie d'aviation) d'acheter à un autre État des crédits carbone attestant d'émissions négatives (via un projet de reforestation, par exemple), sont un enjeu de premier plan. À supposer que ces crédits carbone correspondent à des réductions effectives (ce qui est tout sauf une question triviale), va se poser un problème de limite : si on mobilise des capacités de stockage limitées pour compenser des émissions qui pourraient être évitées (on peut ne pas prendre l'avion), que va-t-il rester pour compenser des émissions qui ne peuvent l'être (on ne peut pas ne pas manger) ?

Si l'« illusionnisme de la compensation » est un art savamment pratiqué par un certain nombre de grandes entreprises, à commencer par celles de l'aérien, ce discours fait de moins en moins illusion. Peu d'acteurs étatiques et économiques remettent finalement aujourd'hui sérieusement en cause l'idée que la priorité des priorités doit aller aux baisses d'émissions. Il est devenu difficile de nier la réalité du « budget carbone restant » et celle des possibilités d'accroître significativement les puits de carbone dans les prochaines décennies. Les promoteurs de politiques ambitieuses de stockage peuvent difficilement être accusés de chercher à faire l'impasse sur les baisses d'émissions.

Si la France veut multiplier par plus de trois ses capacités actuelles de stockage (de 25 Mt CO₂ à 80 Mt CO₂) par an d'ici 2050 selon la SNBC, diviser ses émissions par près de six dans le même temps (441 à 80) n'est pas une sinécure.

27. Voir par exemple le travail mené par Renaud Bettin et César Dubast (Carbone 4) « Vers un nouveau référentiel de la neutralité carbone des entreprises » pour qui l'objectif de neutralité carbone globale interdit pour l'essentiel le report des réductions d'émissions. <http://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2019/03/Publication-Carbone-4-Net-Zero-Initiative.pdf>

Rappelons par ailleurs que ces objectifs n'envisagent la neutralité carbone que sous l'angle des émissions territoriales du pays, alors que la moitié de l'empreinte climatique d'un Français est imputable à sa consommation importée²⁸.

C'est une raison supplémentaire pour que les pays développés montrent, dès à présent, plus d'ambition et sur les baisses d'émissions et sur le stockage. Compte tenu de leurs responsabilités historiques et de leurs moyens économiques, il faut qu'ils agissent plus vite et plus fort que le monde en développement.

Au-delà de cet enjeu d'équité et de coopération internationale, Le développement de technologies praticables et viables à moindre coût -et les moins nuisantes possibles- est aussi un enjeu pour la recherche en chimie, en agronomie, en énergétique, et constitue une opportunité pour le développement de nouvelles activités.



Une forêt mieux valorisée, des centrales BECSC et du bois-matériau (dans des conditions socialement et écologiquement acceptables), ce sont **de l'énergie, des produits, des emplois relocalisés au profit des territoires**. Des sols qui stockent plus de carbone, c'est une agriculture qui va dans le sens de la **préservation et du renforcement de la biodiversité**, de la **résilience face aux changements climatiques**, de la **protection de l'emploi**.



ANNEXES

ANNEXE 1 :

La géo-ingénierie s'invite dans les débats

La communauté scientifique et notamment le GIEC a discuté assez tôt des remédiations massives à l'effet de serre par des solutions curatives par opposition aux mesures préventives d'atténuation. Ces solutions aval étaient principalement de deux ordres, « SRM » et « CDR »

SRM. La gestion du rayonnement solaire (« solar radiation management SRM ») vise à renvoyer directement une partie du flux solaire vers l'espace. Classiquement, il s'agit par exemple de produire un nuage de cristaux blancs d'oxyde de soufre en haute atmosphère et de l'y maintenir. Étonnamment, certains sceptiques du climat d'hier se sont convertis directement à ce genre de solutions dignes du docteur Folamour : ombrelle solaire dans l'espace, cheminées géantes dans l'océan génératrices de nuages, tube d'injection vers la haute atmosphère... À noter que ce concept donne lieu à une « fake news » complotiste classique qui affirme que les avions militaires US (ou de l'ONU selon les variantes) injectent déjà du soufre dans la haute atmosphère à notre insu.

CDR. Le retrait-stockage du carbone (« Carbon dioxide removal CDR ») consiste à retirer du carbone terrestre, au-delà de la simple plantation d'arbres. Si les propositions techniques sont moins dangereuses dans leurs conséquences (on retire le carbone que l'humanité a émis), le caractère parfois délirant des solutions mais surtout l'échelle envisagée en proportion d'user des terres fertiles existantes fait hurler agronomes ou naturalistes.

La géo-ingénierie a été largement critiquée pour ses caractéristiques plutôt dangereuses et démiurgiques. En particulier, elle est accessible à coût limité à des états voire des entités privées ce qui complique toute gouvernance ; ses conséquences peuvent être dramatiques et ajouter au chaos général, par exemple modifier le régime des moussons ; il s'agit de remédiation partielle, puisque même si on évite un degré de réchauffement, les autres conséquences comme l'acidification de l'océan se produisent quand même ; elle crée un « aléa moral » en pouvant laisser croire au laisser-faire face aux fossiles...

Désormais ce terme fourre-tout et démonisé de « géo-ingénierie » est moins employé. D'abord parce que nombre d'options vont devoir faire partie des compromis nécessaires pour éviter le pire de la crise climatique, il faut donc les regarder plus en détail. Ensuite, parce que le terme regroupe des propositions de nature distinctes, les unes où certains jouent à Dieu en misant l'avenir de tous, les autres plutôt des micro-solutions dont les bénéfices sont plus locaux et se combinent avec l'adaptation climatique. Par exemple une toiture blanche d'hôtel ou un parking de couleur claire climatisent à bon marché, et en s'additionnant peuvent avoir un impact global intéressant (*). De même la plantation d'une forêt ou de végétaux peut avoir de nombreux co-bénéfices y compris sociaux, s'insérer dans une programmation globale vertueuse ou à l'inverse contribuer à une spoliation de grande ampleur vis-à-vis de populations modestes. Les propositions des derniers rapports du GIEC tentent de se placer de plus en plus dans le cadre des objectifs du développement durable (ODD), plus large que celui du seul changement climatique, un cadre pas simple mais mieux adapté aux compromis complexes désormais nécessaires sur ces sujets.

(*) Selon une équipe du laboratoire de Berkeley, ces solutions généralisées représenteraient le même « forçage radiatif » évité que l'ensemble des forêts mondiales (tout de même !).

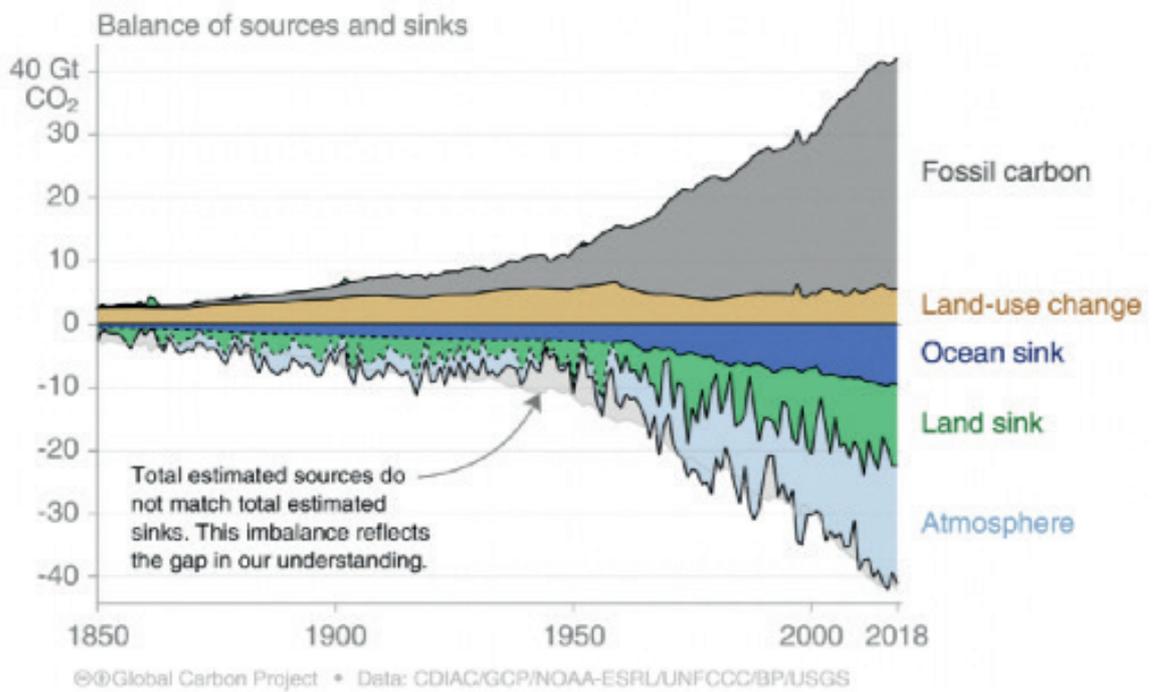
ANNEXE 2 :

Photosynthèse : la pompe à carbone planétaire

Avec l'énergie du soleil et avec l'eau, les végétaux capturent le CO₂ atmosphérique et le transforment en hydrates de carbone, qui constituent l'essentiel de leur matière organique. C'est la photosynthèse, que permet la chlorophylle présente dans les feuilles. Durant la phase de croissance d'un végétal et jusqu'à ce qu'il arrive à maturité, du carbone s'accumule dans sa partie aérienne (le tronc et les branches d'un arbre) et souterraine (les racines). Ce carbone d'origine végétale s'accumule aussi, au fil du temps, dans les sols (il en va de même du carbone d'origine animale), sous forme d'abord organique, puis minérale. Ce même processus vaut pour la végétation marine (algues, phytoplancton...). Les sols, les sous-sols et les océans recèlent ainsi des stocks colossaux de carbone organique et minéral (dont les hydrocarbures et le charbon sont une petite partie), accumulés depuis l'apparition de la vie sur terre. À ces processus organiques s'ajoutent des mécanismes chimiques qui capturent également du CO₂ atmosphérique et le minéralisent dans les sédiments. Ils jouent un rôle très important au niveau des océans.

À partir du moment où leur stock de biomasse est en augmentation, la végétation aérienne et sous-marine ainsi que la matière organique forment des « puits » de carbone » naturels : le flux du CO₂ capturé via la photosynthèse est supérieur à celui du CO₂ relâché dans l'atmosphère du fait de processus biochimiques (comme la décomposition de la matière organique morte ou l'oxydation du carbone contenu dans un sol lorsque celui-ci est retourné). La dynamique de ces puits de carbone dépend ainsi de celle du milieu naturel, laquelle est étroitement liée à l'activité humaine : agriculture, pêche, urbanisation... Par exemple, dans les zones de culture très mécanisée où arbres et haies ont disparu, comme en Ile-de-France, les sols ne sont plus des puits mais sont devenus des sources d'émissions : ils perdent davantage de carbone qu'ils n'en absorbent.

Le bilan carbone mondial réalisé par le Global Carbon Project a mis en évidence le rôle extrêmement important des puits naturels terrestres et marins. Leurs absorptions ont augmenté avec les émissions de CO₂ (quoiqu'à un rythme beaucoup moins rapide sur la période récente) et réduit d'autant les quantités se concentrant dans l'atmosphère. Sur les années 2009-2018, les perturbations du cycle global du carbone liées à l'activité humaine (la combustion du carbone fossile et les changements d'usage des sols) se sont traduites par un surplus d'émissions de CO₂ de 40,2 Gt par an. Sur ce total, les terres (sols et végétation aérienne) en ont capté 29 % et les océans 23%, le reste s'accumulant dans l'atmosphère. Sans ces puits et leur capacité à « éponger » une partie du surplus de carbone, les volumes de CO₂ stationnant dans l'atmosphère auraient été beaucoup plus importants. Le défi est donc immense. Il faudrait à la fois mettre fin à la déforestation et à des pratiques agricoles et alimentaires insoutenables pour préserver ces puits dont le fonctionnement va par ailleurs fatalement être altéré par le réchauffement en cours; et à la fois en accroître les capacités, notamment en reconstituant les espaces boisés ou en les étendant.

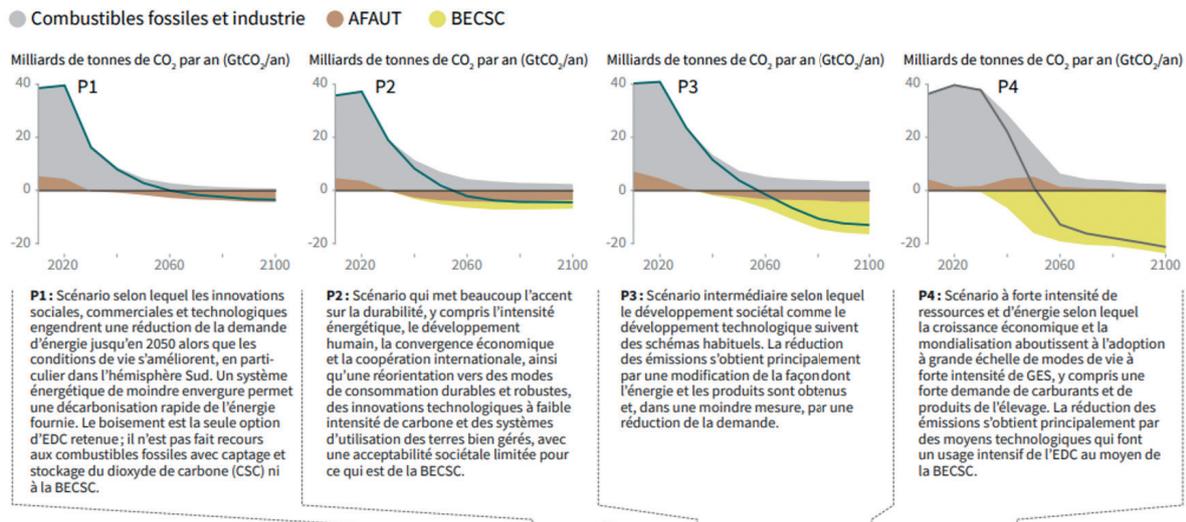


Source : https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/19/files/GCP_CarbonBudget_2019.pdf - pp. 46/90

ANNEXE 3 :

Le BECCS, nouvel alibi de l'inaction climatique ?

Détail des contributions aux émissions nettes mondiales de CO₂ pour quatre exemples de trajectoires modélisées



Dans un scénario (très) ambitieux (illustré par le scénario « P2 » du rapport 1,5°C), la demande énergétique mondiale est, comme dans le scénario vertueux de l'AIE, stabilisée (malgré l'accroissement démographique), de gros efforts sont faits simultanément sur les baisses d'émissions de CO₂, de méthane, de protoxyde d'azote. Un stockage très important est réalisé dans le secteur des terres (un puits d'environ 4 Gt par an atteint en 2050 quand ce secteur est aujourd'hui une source d'émissions d'environ 5 Gt par an) via les sols et la reforestation. Le BECCS est cependant nécessaire pour boucler la boucle, à un niveau d'environ 3 Gt par an. La superficie mobilisée à des fins énergétiques est de 0,9 million de km².

Dans un scénario de sobriété forte (illustré par le scénario P1), de très gros efforts sont également faits pour réaliser des émissions négatives au niveau des terres et pour réduire les émissions de CO₂ et de méthane rapportées à la consommation, mais la demande énergétique mondiale baisse en outre d'un tiers en 2050 par rapport à 2010 (malgré la croissance démographique). Dans ce modèle, le BECCS ne s'avère pas nécessaire pour boucler l'équation climatique, tandis que les surfaces bioénergétiques sont limitées à 0,2 million de km².

Une troisième famille de scénarios (représentée par les scénarios dits P3 et P4) s'inscrit dans la logique actuelle : les baisses d'émissions s'obtiennent essentiellement par des gains technologiques et peu par des transformations sociales impliquant coopération, réduction des inégalités nationales et internationales et part plus ou moins importante de sobriété, à la différence des deux autres familles. Dans ces scénarios qui cherchent préserver autant que possible « le monde d'avant », la demande énergétique mondiale progresse et malgré les gains technologiques permettant de réduire les émissions de CO₂, la neutralité des émissions de gaz à effet de serre implique des niveaux très élevés de BECCS, et donc derrière plusieurs millions de kilomètres carrés de surfaces dédiées à la production de biomasse énergétique. Avec des coûts écologiques et sociaux probablement très élevés et à mettre en rapport avec les dégâts que ces mêmes politiques cherchent à éviter.

