

# Retrait du carbone, net zéro et implications pour la Suisse



## Retrait du carbone, net zéro et implications pour la Suisse

*Livre Blanc E4S*

Sascha Nick (EPFL) & Philippe Thalmann (EPFL)

Décembre 2021

*De nombreux experts de la plateforme "Politique environnementale fondée sur les données scientifiques" ont apporté leur contribution et examiné les versions préliminaires du rapport. Leurs commentaires et suggestions ont été d'une aide précieuse.*

*Afin de trouver des solutions aux plus grands défis de la société, E4S encourage les discussions et la diversité des opinions sur des sujets d'importance cruciale. Les points de vue et les opinions exprimés dans les documents publiés par E4S sont ceux de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement la politique ou la position officielle de E4S.*

© Enterprise for Society (E4S) Center, 2021

Photographie de couverture : David Lang

Enterprise for Society (E4S) est une initiative conjointe de l'Université de Lausanne, par l'intermédiaire de sa Faculté de commerce et d'économie (UNIL-HEC), de l'Institute for Management Development (IMD) et de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), sous la direction de son College of Management of Technology, dont la mission est de favoriser la transition vers une économie plus résiliente, durable et inclusive. E4S s'engage à former la prochaine génération de leaders, à inspirer la transformation économique et sociale, et à promouvoir le changement en renforçant les start-ups et en stimulant l'innovation.

Ce projet a été mené dans le cadre d'un partenariat avec la Fondation Leenaards.

# CONTENTS

---

<b>1. RÉSUMÉ EXÉCUTIF .....</b>	<b>1</b>
<b>2. APERÇU DE L'ACTION CLIMATIQUE .....</b>	<b>4</b>
État du climat en 2021, sur la base des rapports AR6 et SR15 du GIEC	4
Budget carbone restant, atteindre le niveau net zéro	4
La compensation du CO <sub>2</sub> fait-elle partie de l'action climatique ?	4
Aperçu de l'action climatique par type et par effet	5
Toutes les approches ont des limites, et certaines peuvent être dangereuses.	5
<b>3. CAPTAGE, UTILISATION ET STOCKAGE DU CARBONE (CCUS) .....</b>	<b>8</b>
Captage du carbone : sources, technologies, déploiement actuel	8
CCS : transport et stockage du CO <sub>2</sub>	9
CCS+EOR (récupération assistée du pétrole)	10
CCU : minuscule aujourd'hui, il est peu probable qu'il grandisse de sitôt	10
Limites du CCUS	11
<b>4. TECHNOLOGIES D'ÉMISSIONS NÉGATIVES (NET) .....</b>	<b>12</b>
Méthodes et technologies: nombreuses méthodes complémentaires à petite échelle	12
Analyse technique des limites des NET	14
<b>5. COÛTS ET FINANCEMENT .....</b>	<b>17</b>
Aperçu des coûts	17
Incitations financières	18
Déconnecter le paiement du pollueur des coûts de dépollution	20
<b>6. STRATÉGIE ET IMPLICATIONS .....</b>	<b>22</b>
Les arguments en faveur d'une planification conjointe CCS+NET	22
Conditions géopolitiques de déploiement	22
Objectif du retrait du carbone	23
L'aléa mondial ?	23
Acceptation sociale	24
Limites énergétiques et utilisations alternatives	24
Limites potentielles du retrait du carbone	25
Implications pour la Suisse	26
<b>7. RÉFÉRENCES .....</b>	<b>28</b>

# 1. RÉSUMÉ EXÉCUTIF

---

Ce livre blanc d'E4S fournit une vue d'ensemble du retrait du carbone dans le contexte de l'action climatique vers le net zéro, couvrant les principaux points que les décideurs politiques et les dirigeants d'organisations devraient garder à l'esprit.

Nous montrons que le [retrait du carbone, qui, dans ce document, comprend le captage, l'utilisation et le stockage du carbone \(CCUS\) et les technologies d'émission négative \(NET\)](#), est partie importante mais modeste de l'action climatique dans les deux ou trois décennies critiques dont nous disposons pour stabiliser notre climat et stopper la perte de biodiversité.

Cette perspective est essentielle pour concevoir et gérer correctement le retrait du carbone, en complément des réductions d'émissions importantes basées sur la sobriété, l'efficacité et l'énergie propre. Nous soutenons que CCUS et NET sont des contributions importantes à une action climatique plus large, avec un potentiel limité à quelques pourcents des émissions actuelles. Il ne s'agit pas d'une contradiction : aucune approche unique ne permettra de résoudre la crise climatique.

Après des [décennies d'inaction](#) en matière climatique et d'augmentation soutenue des émissions, malgré les avertissements de plus en plus urgents et précis du GIEC, plusieurs accords internationaux fructueux (Kyoto, Paris), une mobilisation sans précédent de la société civile dans le monde entier et des phénomènes météorologiques extrêmes toujours plus fréquents (inondations, sécheresses, incendies, températures extrêmes), la fenêtre d'action est limitée si nous voulons maintenir le réchauffement à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Il nous reste moins d'une décennie pour réduire de moitié les émissions au niveau mondial<sup>1</sup>, et moins de 30 ans pour les réduire de 90%. Nous devons peut-être recourir à des mesures onéreuses et difficiles à mettre en œuvre, comme le retrait du carbone, que nous aurions facilement pu éviter en

réduisant nos émissions plus tôt.

Pour ne pas dépasser un réchauffement de 1,5°C, le rapport d'évaluation 6 du GIEC<sup>2</sup>, publié en août 2021, définit le budget carbone restant que nous pouvons émettre en toute sécurité à 300-400 Gt CO<sub>2</sub>. La limite de 300 Gt sera atteinte vers 2027-2028, à moins que nous ne réduisions massivement nos émissions presque immédiatement. Cette fenêtre extrêmement courte limite le rôle des technologies encore en phase de R&D, ainsi que le temps à disposition pour déployer les technologies existantes - ce qui suggère de mettre l'accent sur les politiques, les comportements et les mesures économiques.

Dans ce contexte, le retrait du carbone, par CCUS (captage du carbone avant qu'il n'atteigne l'atmosphère) ou NET (émissions négatives, extraction du carbone de l'air et stockage à des échelles de temps pertinentes pour le climat), aura un rôle important à jouer. Aujourd'hui, le retrait du carbone hors du cycle naturel rapide du carbone (c'est-à-dire la photosynthèse et le stockage dans la biomasse vivante et les sols) n'existe qu'à une petite échelle expérimentale. À l'échelle mondiale, [il est très peu probable qu'il dépasse 5 à 10 % des émissions actuelles](#) (soit 3 à 6 Gt CO<sub>2</sub>e)<sup>3</sup>, du moins au cours des deux ou trois décennies critiques à venir, pendant lesquelles nous devons stabiliser le climat (le rapport AR6 WG3 du GIEC fournira une nouvelle estimation en 2022). Néanmoins, ce retrait peut encore apporter des [avantages significatifs pour le climat](#), comme l'atteinte du net zéro, à condition d'accompagner une décarbonation profonde.

Le réchauffement climatique affecte les humains directement et indirectement, en dégradant les services écosystémiques dont nous dépendons pour notre survie, comme la nourriture, les médicaments, la pollinisation ou le cycle des nutriments<sup>4</sup>. La protection des services écosystémiques est l'une des principales raisons d'agir pour stabiliser le climat. De nombreuses mesures biologiques

de retrait du carbone, si elles sont correctement mises en œuvre, peuvent offrir des co-bénéfices importants en matière de biodiversité, même à des échelles relativement petites.

Le retrait du carbone ne peut pas apporter un climat stable à lui tout seul, c'est-à-dire sans être accompagné d'une réduction importante des émissions.

Depuis 1972, le CCUS est utilisé à des fins commerciales, principalement pour augmenter la récupération du pétrole dans les champs pétrolifères épuisés (pour plus de détails, voir la section "CCS+EOR") ; aujourd'hui, il permet d'éviter 0,1 % des émissions actuelles. Les plans d'expansion engagés à ce jour ne modifieront pas sensiblement ce taux. Compte tenu du cycle d'investissement et de déploiement, il est peu probable que le captage du carbone joue un rôle plus que marginal avant les années 2030.

Il est essentiel de garder à l'esprit **l'objectif du retrait du carbone** : aider à atteindre le zéro net en retirant les émissions résiduelles, après une décarbonation suffisamment profonde. En outre, il doit offrir de réels avantages connexes en matière de biodiversité et éviter tout impact négatif sur les écosystèmes. Ce n'est pas ainsi que le CCUS s'est développé historiquement (pour extraire plus de pétrole de gisements épuisés) ou qu'il est considéré par les grands acteurs aujourd'hui : pour prolonger l'ère des fossiles, prolonger la durée de vie des actifs échoués comme les centrales à charbon, ouvrir de nouveaux marchés pour les compagnies pétrolières (solvants), ou simplement bénéficier des subventions "vertes" disponibles. La stabilisation du climat est absente des objectifs de presque tous les principaux acteurs du CCUS.

Si ces objectifs (et les actions qu'ils entraînent) ne changent pas, le retrait du carbone par CCUS ne contribuera pas de manière significative à l'action climatique, il retardera même les mesures de réduction nécessaires, tout en transférant de la richesse des contribuables aux entreprises.

Le retrait du carbone est coûteux et nécessite un financement pour être déployé à une échelle

significative. Le financement peut être basé sur une taxe sur le carbone plus une subvention au retrait de plusieurs centaines de dollars par tonne de CO<sub>2</sub> ou par une forme de mandat de retrait du carbone, directement ou via un fonds d'assainissement. Une telle proposition pour la Suisse, le Swiss Climate Cleanup Fund, est développée dans le document de travail E4S à paraître "[Climate Cleanup Fund - getting to Swiss Net Zero](#)".

En pratique, le retrait du carbone ne fonctionnera que dans le cadre d'une coopération internationale, sauf peut-être pour des projets à petite échelle présentant des avantages importants pour les écosystèmes locaux. S'il est positionné comme une mesure complémentaire permettant d'atteindre le zéro net sur la base d'une décarbonation profonde dans tous les secteurs, l'aléa moral peut être limité - le retrait du carbone ne sera pas considéré comme un substitut possible à des réductions importantes des émissions. Avec une telle coopération internationale et un positionnement approprié, le retrait du carbone peut jouer un rôle limité mais très important dans notre tâche de stabilisation du climat.

Pour la Suisse, compte tenu de sa densité, de ses écosystèmes fragiles, d'un réchauffement plus rapide atteignant déjà 2°C, d'une biomasse disponible limitée et d'émissions relativement élevées provenant de la production de ciment et de l'incinération des déchets, nous soulignons l'importance d'une action climatique basée sur la nature avec des co-bénéfices pour la biodiversité, en particulier des projets de restauration des marais, de biochar et de carbone dans le sol. En outre, le CCS avec séquestration géologique locale devrait être développé pour les cimenteries et les incinérateurs, ainsi que de la BECCS en quantité limitée. Le potentiel réaliste en Suisse est d'environ 5 millions de tonnes par an, ce qui correspond aux derniers 10 % des émissions territoriales et permet d'atteindre le zéro net en combinaison avec une décarbonation profonde. Conçues et contrôlées avec soin, les mesures de retrait du carbone pourraient également renforcer la résilience des écosystèmes fragiles.

L'importance du retrait du carbone va bien au-delà des derniers 5 à 10 % des émissions actuelles, en définissant implicitement des objectifs de sobriété, d'efficacité et d'énergie renouvelable, et en fixant un prix "objectif" du carbone. Le potentiel de retrait du carbone réalisable détermine l'ampleur et la rapidité avec lesquelles nous devons réduire nos émissions pour respecter le budget restant pour 1,5°C. Le retrait du carbone fixe également un prix objectif, "technique" et non "politique", pour les émissions de CO<sub>2</sub>, créant ainsi un signal fort pour accélérer l'action climatique. Le retrait du carbone par la nature offre, enfin, des avantages rapides et importants en matière de biodiversité, s'il est conçu et contrôlé dans ce but. En résumé, le retrait du carbone, qui est une part modeste de l'action climatique, pourrait accélérer la mobilisation de la société pour la décarbonation profonde.

## 2. APERÇU DE L'ACTION CLIMATIQUE

---

### État du climat en 2021, sur la base des rapports AR6 et SR15 du GIEC

Depuis 1896, lorsque Svante Arrhenius<sup>5</sup> a quantifié la sensibilité climatique de l'effet de serre déjà bien connu du CO<sub>2</sub>, nous pouvons estimer avec une précision remarquable dans quelle mesure les activités humaines causent le réchauffement climatique. Les six rapports d'évaluation du GIEC depuis 1990 ont résumé l'un des domaines les plus étudiés de la connaissance humaine. À ce jour, 26 conférences annuelles des Nations unies sur le climat (COP) ont fait pression sur les plus grands émetteurs pour qu'ils agissent, avec une urgence croissante. Des accords majeurs ont été conclus, tels ceux de Kyoto en 1997 et Paris en 2015.

Pourtant, les émissions continuent d'augmenter et sont aujourd'hui supérieures d'environ 50 % à ce qu'elles étaient l'année du protocole de Kyoto, en 1997. Après plusieurs décennies d'inaction, le temps presse et des mesures difficiles à mettre en œuvre, telles que l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, pourraient s'avérer nécessaires, alors que nous aurions pu facilement les éviter en réduisant nos émissions en temps opportun.

Par rapport à la référence préindustrielle (température moyenne entre 1850 et 1900), le monde est déjà plus chaud de 1,2°C en moyenne, avec des variations régionales importantes : en Suisse, par exemple, la température moyenne est supérieure d'environ 2°C<sup>6</sup>. Les effets du réchauffement planétaire sont hautement non linéaires<sup>1</sup>. Le réchauffement de 2°C est bien pire que celui de 1,5°C et rend la Terre beaucoup moins habitable pour les humains et les écosystèmes dont nous dépendons pour notre survie. Un réchauffement de 2,5 °C serait encore bien plus grave. Pourtant, malgré les progrès récents (COP21-COP26, 2015-2021), les politiques actuelles<sup>7</sup> nous mènent toujours vers 2,7°C, selon les prévisions de novembre 2021.

### Budget carbone restant, atteindre le niveau net zéro

Pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C, le 6ème rapport d'évaluation du GIEC<sup>2</sup> de 2021 estime le budget carbone restant entre 300 Gt CO<sub>2</sub> (relativement certain) et 500 Gt CO<sub>2</sub> (très incertain). Sans réduction massive des émissions, la limite sûre sera atteinte en 2027-2028. Toute émission supplémentaire de CO<sub>2</sub> aura des conséquences potentiellement dangereuses si elle n'est pas rapidement extraite de l'atmosphère. Si nous perdons encore une décennie, le seuil de 1,5°C sera hors de portée<sup>1,2</sup>.

Le zéro net, pour un pays ou une organisation, signifie qu'aucun carbone n'est ajouté à l'atmosphère sur un bilan net. Dans la pratique, cela signifie d'abord que les émissions sont fortement réduites, et que tout carbone résiduel émis dans l'atmosphère en sera extrait. Le zéro net n'inclut aucune compensation. Pour être utile et conduire à un monde à 1,5°C, cela signifie également que les émissions cumulées doivent être compatibles avec le budget carbone restant, ce qui fixe une trajectoire vers le zéro net: selon le GIEC, en moyenne -50 % d'ici 2030 et au moins -90 % d'ici 2050 par rapport à 2020, avec des réductions plus rapides pour les grands émetteurs.

### La compensation du CO<sub>2</sub> fait-elle partie de l'action climatique ?

La compensation des émissions de CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire le fait de payer quelqu'un d'autre pour qu'il réduise ses émissions quelque part dans le monde et d'appliquer cette réduction à ses propres émissions, est souvent considérée comme un moyen facile et peu coûteux d'atteindre le zéro net. Malheureusement, c'est très problématique pour plusieurs raisons: (a) il est difficile de s'assurer que les réductions sont réelles, additionnelles et

permanentes, (b) les projets sont souvent comptabilisés deux fois, (c) les projets peuvent évincer les efforts du pays hôte en matière de réduction vers son net zéro, et (d) les modalités de cette coopération dans le cadre de l'Accord de Paris (Art.6) qui viennent d'être adoptées à la COP26, ne sont pas encore claires. Plus précisément, pour éviter un double comptage, l'article 6.4 exige des pays hôtes qu'ils appliquent les "ajustements correspondants", c'est-à-dire qu'ils excluent les crédits transférés de leurs propres engagements (NDC). Il est trop tôt pour évaluer comment cela fonctionnera dans la pratique. Dès lors, il n'existe pas de raccourci pour une action climatique efficace.

## Aperçu de l'action climatique par type et par effet

L'action climatique peut être classée en sept types distincts (adapté de Minx et al 2018<sup>8</sup>), allant de l'évitement des activités émettrices à l'adaptation pour vivre avec un climat plus chaud :

1. **Sobriété** : éviter ou réduire les activités émettant du CO<sub>2</sub>. Il s'agit par exemple de ne pas prendre

l'avion, de réduire sa consommation, d'utiliser moins de surface par personne.

2. **Efficience** : pour une activité donnée, utiliser moins d'énergie et émettre moins de CO<sub>2</sub>. Déployer des procédés ou des technologies plus efficaces, comme les lampes LED ou les voyages en train ; construire en bois plutôt qu'en béton (Remarque : cette mesure n'est efficace que si l'effet de rebond peut être limité, voir ci-dessous pour plus de détails).
3. **Énergie propre** : remplacer les énergies fossiles par des sources renouvelables, réduire au minimum les émissions de CO<sub>2</sub>.
4. **Captage du carbone** : capter le CO<sub>2</sub> avant qu'il n'atteigne l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub> capté peut être stocké dans le sous-sol (captage et stockage du carbone, CCS) ou transformé, par exemple, en produits chimiques ou en matières plastiques (captage et utilisation du carbone, CCU). Dans certains cas, l'U et le S peuvent être réalisés ensemble, comme dans l'utilisation du carbone dans les matériaux de construction (captage, utilisation et stockage du carbone, CCUS).

### Typologie de l'action climatique

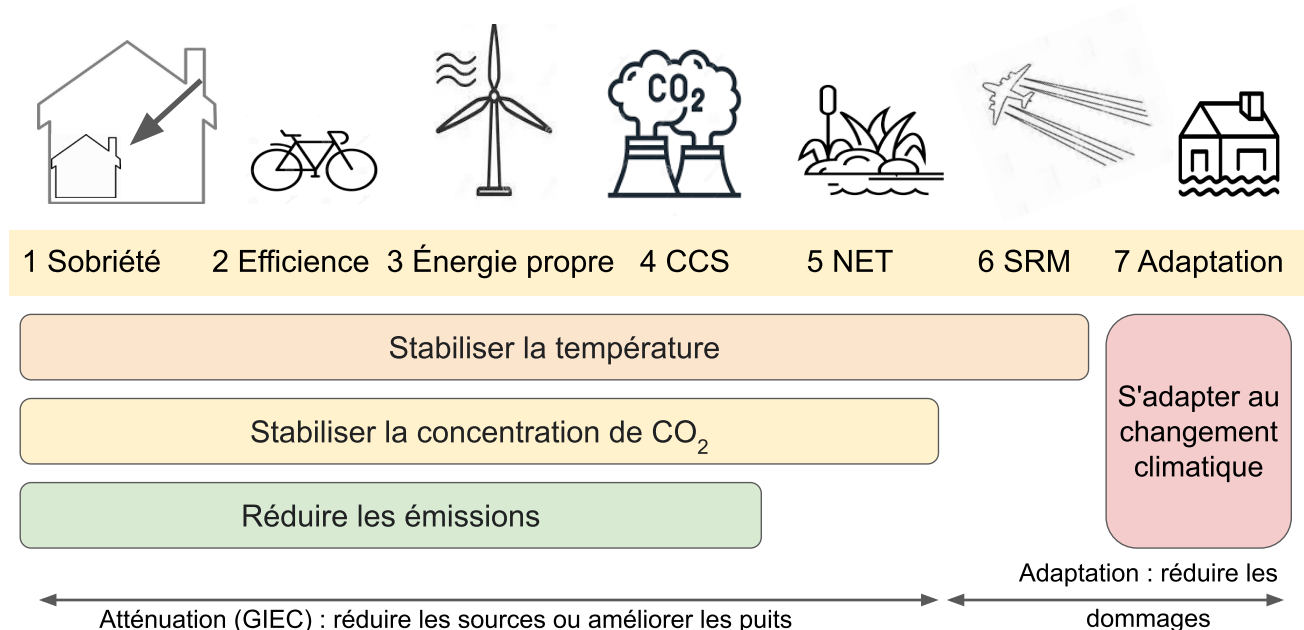


Fig. 1 : Types d'action climatique (voir le texte ci-dessous pour les acronymes et les explications)



5. **Émissions négatives** (NET, également appelées extraction du dioxyde de carbone ou CDR): extraire le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par des processus biologiques ou chimiques, tels que la plantation d'arbres, la restauration d'écosystèmes ou l'utilisation de sorbants chimiques, et le stocker à des échelles de temps pertinentes pour le climat (voir la section NET pour plus de détails).
6. **Gestion du rayonnement solaire** (SRM): méthodes visant à réduire délibérément le réchauffement climatique anthropique en augmentant l'albédo (réflectivité) moyen de la Terre. Cela pourrait par exemple être réalisé en imitant les éruptions volcaniques et en injectant des millions de tonnes d'aérosols sulfureux dans la stratosphère.
7. **S'adapter au changement climatique**: cela peut aller de la construction de murs de protection contre les inondations, de la plantation de cultures résistant à la chaleur, de la peinture blanche des toits, à l'abandon de villes, voire de pays, devenus inhabitables.

Les actions 1 à 4 réduisent les émissions ; l'action 5 réduit la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (ce qui, entre autres effets, réduit la température), l'action 6 réduit uniquement la température, sans avoir beaucoup d'impact sur les autres conséquences de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub>, comme l'acidification des océans, et l'action 7 atténue les conséquences du changement de climat.

## **Toutes les approches ont des limites, et certaines peuvent être dangereuses**

Il n'y a pas d'obstacles techniques à la sobriété, seulement des obstacles culturels et la nécessité d'adapter les normes, les structures et les incitations de la société. Les avantages de l'efficacité sont principalement limités par l'effet de rebond, puisque les améliorations de l'efficacité réduisent le coût de production ou d'utilisation, ce qui entraîne une augmentation de la demande, réduisant ainsi

les économies d'énergie et augmentant parfois même la consommation globale d'énergie. L'énergie propre est limitée par la vitesse de déploiement - il faudrait des décennies pour remplacer les 500 EJ d'énergie fossile utilisés aujourd'hui. Heureusement, avec la sobriété et l'efficacité, une telle quantité d'énergie ne sera pas nécessaire<sup>9,10</sup>.

Le CCS est limité par son coût énergétique et financier élevé (voir la section "Aperçu des coûts") et par l'infrastructure existante. Il élimine 80 à 95 % du CO<sub>2</sub>, moins si on considère tout le cycle de vie (y compris les ressources nécessaires à la fabrication des équipements de CCS), et aucun des autres polluants, tels que les microparticules PM<sub>2,5</sub>, le dioxyde de soufre, le benzène, l'ozone, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, etc.<sup>11</sup>. En raison de la perte d'efficacité (davantage de combustible utilisé), ces polluants autres que le CO<sub>2</sub> peuvent en fait augmenter.

Le CCU est limité par les utilisations possibles du CO<sub>2</sub> en tant que tel, la plupart des utilisations nécessitant la rupture des fortes liaisons C-O à un coût énergétique élevé. De plus, le carbone utilisé dans le CCU retourne rapidement dans l'atmosphère, pour la plupart des applications.

Les émissions négatives biologiques nécessitent beaucoup d'espace et d'eau, et doivent être soigneusement conçues pour les co-bénéfices de la biodiversité, en veillant à ne pas endommager les écosystèmes, ce qui limite encore leur potentiel. Assurer la permanence du stockage est un défi. Les NET chimiques sont extrêmement coûteuses, financièrement et en termes d'énergie, et il est très peu probable qu'elles puissent s'étendre rapidement (voir l'analyse dans la section "Analyse technique des limites des NET").

Le SRM n'a jamais été testé (bien que les aérosols provenant des éruptions volcaniques refroidissent effectivement le climat), et pose de nombreux problèmes d'éthique et de gouvernance, ainsi que de nombreux effets secondaires. Les effets climatiques seront très inégaux, avec des gagnants et des perdants, y compris des pays entiers qui pourraient

devenir inhabitables. Qui décidera du déploiement? Cela pourrait-il conduire à des conflits et à des guerres ?

Ce document couvre les CCUS et les NET (#4-5), en complément des réductions profondes basées sur les #1-2-3. Nous soutenons que les CCUS et les NET sont des éléments importants d'une action climatique plus large, avec un potentiel limité à quelques pour cent des émissions actuelles.

## 3. CAPTAGE, UTILISATION ET STOCKAGE DU CARBONE (CCUS)

---

### Captage du carbone : sources, technologies, déploiement actuel

Le captage du carbone (CC) est un procédé permettant de retenir le CO<sub>2</sub> avant qu'il ne pénètre dans l'atmosphère, de le stocker en toute sécurité pendant des centaines ou des milliers d'années, généralement dans des formations géologiques telles que des aquifères salins, des champs pétroliers épuisés ou des formations basaltiques (CCS), ou d'utiliser le CO<sub>2</sub> (CCU). Le CC comprend toujours la séparation, la compression, le transport et le stockage ou l'utilisation du CO<sub>2</sub>.

Il peut être appliqué aux grandes sources ponctuelles telles que les cimenteries, les aciéries ou les usines chimiques, les centrales électriques au charbon ou au gaz, ou les incinérateurs de déchets, qui émettent généralement >100 kt CO<sub>2</sub> par an.

Le CCS est utilisé depuis 1972. Au milieu de l'année 2021, 26 installations commerciales (>100 kt CO<sub>2</sub>/an) sont en service<sup>12</sup> dont 12 aux États-Unis, 4 au Canada et 3 en Chine, pour un total de 40,12 Mt CO<sub>2</sub>/an, soit environ 0,1 % des émissions mondiales totales. Il n'existe pas d'installations CCU à cette échelle.

Par secteur, 24 des 26 installations se trouvent dans l'industrie pétrochimique (gaz, pétrole, éthanol, méthanol, hydrogène, engrais, produits chimiques en vrac). Les deux autres équipent une centrale électrique au charbon et une aciérie. Il existe des installations pilotes à petite échelle dans le secteur du ciment et de l'incinération des déchets, mais pas encore d'installations commerciales.

Il existe trois principaux procédés pour séparer le CO<sub>2</sub> des gaz de combustion (concentration de 3 à 15 %, généralement 10 %) :

1. **La postcombustion**, de loin la plus courante, est utilisée dans 25 des 26 usines commerciales, car elle peut être adaptée aux installations existantes. Techniquement, elle est basée sur un solvant liquide qui absorbe le CO<sub>2</sub> des gaz de combustion, lequel est ensuite chauffé pour libérer du CO<sub>2</sub> de haute pureté. Les membranes sont une alternative prometteuse à la séparation par solvant, utilisée dans un certain nombre de projets pilotes ; aucune installation commerciale (>100 kt CO<sub>2</sub>/an) n'est encore déployée.
2. **La précombustion**, qui sépare chimiquement le combustible (pétrole, gaz, charbon) en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> avant d'utiliser l'hydrogène comme combustible. Il s'agit d'un processus complexe qui ne peut pas être adapté aux centrales électriques existantes et qui n'est pas encore déployé dans des installations commerciales.
3. **L'oxycombustion** utilise un combustible inchangé, mais le fait brûler dans de l'oxygène pur, produisant du CO<sub>2</sub> pur mélangé à de la vapeur d'eau. La vapeur est facile à éliminer en refroidissant les gaz de combustion, et l'ensemble du processus est très simple. L'oxycombustion est utilisée aujourd'hui dans plusieurs centrales au charbon sans CCS, mais seulement dans une installation commerciale de CCS. Le principal obstacle est le coût de l'oxygène pur.

La séparation du CO<sub>2</sub> des gaz de combustion est coûteuse sur le plan énergétique, car elle augmente la consommation de combustible d'une centrale électrique de 11 à 40 %, généralement de 20 à 25 %<sup>13</sup>. Dans le cas du CCS, 2/3 de l'énergie est utilisée pour la séparation, 1/3 pour la compression et le transport<sup>14</sup>.

## CCS : transport et stockage du CO<sub>2</sub>

Une fois séparé, le CO<sub>2</sub> peut facilement être transporté<sup>15</sup> par conduite, par bateau ou, pour de petites quantités et distances, par train ou par camion. Les oléoducs et gazoducs existants peuvent être adaptés. Actuellement, il existe très peu de conduites opérationnelles pour le CO<sub>2</sub>, principalement aux États-Unis, liés à l'EOR. Le gisement de gaz de Sleipner en Norvège, la plus grande installation de stockage géologique d'Europe, baptisée "Northern Lights", reposera exclusivement sur le transport par bateau lorsqu'elle sera ouverte à la mi-2024.

Les "CCS Hubs" construits autour d'installations de stockage telles que "Northern Lights", reliant plusieurs installations de captage par des conduites, pourraient générer des économies d'échelle, faciliter l'apprentissage et réduire les coûts.

Les principaux défis liés au transport sont le coût de la construction ou de la modernisation des conduites, les besoins énergétiques pour comprimer et transporter le CO<sub>2</sub> à grande échelle, et l'acceptation par le public. Les pays enclavés comme la Suisse sont tributaires du transport via d'autres pays pour atteindre la mer. Une option pour la Suisse serait de réaffecter l'ancien oléoduc de Gênes à Collombey (E50), inutilisé depuis 2015. Cette solution est loin d'être facile : il existe peu d'expérience en matière de réaménagement de conduites. De plus, il n'y a pas de terminal CO<sub>2</sub> à Gênes, et seule la portion vers Ferrera est inutilisée, ce qui nécessite un nouveau conduit pour les derniers 25% de Ferrera à Gênes. En Suisse, Collombey est éloigné des principaux émetteurs (cimenteries et incinérateurs de déchets), ce qui nécessite des conduites supplémentaires.

Le potentiel de stockage géologique permanent est abondant presque partout dans le monde, dans des aquifères salins, des champs pétrolifères épuisés ou des formations basaltiques. Sur terre, les aquifères salins et les gisements de pétrole épuisés sont plus courants. Une grande partie des

fonds marins et des îles océaniques sont constitués de basalte, ce qui offre un potentiel de stockage massif, de plusieurs ordres de grandeur supérieur aux besoins<sup>16</sup>. En Suisse, il existe un large éventail d'estimations du potentiel<sup>17,18</sup> allant de 50 à 2680 Mt de CO<sub>2</sub>, l'incertitude reflétant le manque de validation expérimentale. La plupart des estimations suggèrent que la Suisse est capable de stocker au moins des décennies d'émissions captées.

## CCS+EOR (récupération assistée du pétrole)

Après séparation, le CO<sub>2</sub> doit être stocké de manière permanente dans des formations géologiques appropriées. Depuis l'ouverture de la première installation commerciale opérationnelle en 1972, le but principal du CCS a été la **récupération assistée du pétrole** (EOR en anglais, RAP ou RAH en français), correspondant à 90 % de la capacité historique. Aujourd'hui encore, 75 % de la capacité de stockage relève de l'EOR, les 25 % restants étant du stockage géologique permanent.

L'EOR est un processus dans lequel le CO<sub>2</sub> est injecté dans un champ pétrolifère épuisé, où l'extraction conventionnelle du pétrole a cessé d'être rentable. Le CO<sub>2</sub> se dissout dans le pétrole, le liquéfie et permet l'extraction de la majeure partie du pétrole restant. D'un point de vue climatique, cela pose problème, car le pétrole extrait sera brûlé, émettant plus de CO<sub>2</sub> que ce qui a été utilisé pour l'extraire, augmentant les émissions totales au lieu de les réduire. Le ratio exact est complexe à calculer<sup>12</sup> et dépend de deux paramètres, le taux de récupération du pétrole brut, généralement de 2 à 3 barils de pétrole par tonne de CO<sub>2</sub>, et l'additionnalité du pétrole extrait (effet de déplacement à court terme par rapport à l'augmentation du marché pétrolier à long terme). A plus long terme, les émissions liées à la combustion du pétrole EOR correspondent à 1,5-2 fois le CO<sub>2</sub> stocké, avec une variation significative<sup>12</sup>. Les émissions nettes augmentent.

## CCU : minuscule aujourd'hui, il est peu probable qu'il grandisse de sitôt

Tout comme le CCS, le captage et l'utilisation du carbone (CCU) est un procédé permettant de retenir le CO<sub>2</sub> avant qu'il ne pénètre dans l'atmosphère. Ensuite, au lieu de stocker le CO<sub>2</sub> sous terre, on l'utilise dans des produits industriels, avant qu'il ne retourne dans l'atmosphère. Le CCU ne contribue donc pas directement à l'élimination du CO<sub>2</sub>. Sa contribution dépend de la manière dont le CO<sub>2</sub> était produit auparavant : (1) comme sous-produit de la production d'ammoniac, auquel cas le CCU n'aura aucun effet, ou (2) en brûlant du gaz naturel, auquel cas le CCU remplace le carbone fossile par du carbone atmosphérique, évitant ainsi que davantage de CO<sub>2</sub> d'origine fossile ne pénètre dans l'atmosphère. On peut considérer qu'il s'agit d'un "recyclage du carbone".

Plus de 90 % de l'utilisation totale actuelle de CO<sub>2</sub>, soit environ 250 millions de tonnes par an, est utilisée pour la production d'urée à partir de combustibles fossiles et l'EOR<sup>19</sup>. L'utilisation pour des aliments et des boissons représente 6 %, le reste étant utilisé dans les métaux, les produits chimiques, le traitement de l'eau et les soins de santé.

Le marché actuel du CO<sub>2</sub> capté est minuscule, moins de 0,1 % des émissions territoriales suisses. Il est principalement utilisé dans les serres pour accélérer la croissance des plantes, et pour les boissons gazeuses quand du CO<sub>2</sub> de pureté alimentaire peut être obtenu. Dans tous les cas, le CO<sub>2</sub> retourne dans l'atmosphère en quelques jours.

Au-delà des limites du captage, les utilisations du CO<sub>2</sub> en tant que telles sont très limitées, la plupart des utilisations nécessitant la rupture de la puissante liaison C-O à un coût énergétique élevé. C'est la limite fondamentale de tout développement futur.

Les utilisations futures potentielles à grande échelle comprennent les matières premières chimiques pour la production de plastiques, les matériaux

intermédiaires de grande valeur comme le méthanol, les combustibles liquides synthétiques ou le méthane synthétique. Tous ces produits remplacent les combustibles fossiles par du CO<sub>2</sub> atmosphérique capté, qui retourne dans l'atmosphère en quelques jours ou semaines, lorsque le combustible est brûlé ou que le plastique est incinéré à la fin de sa vie. L'avantage est évidemment d'éliminer l'utilisation de combustibles fossiles supplémentaires, ce qui rend l'ensemble du cycle potentiellement presque neutre en carbone, si une énergie 100 % propre est utilisée. Rien de tout cela n'existe aujourd'hui à une échelle significative.

Ce processus est très énergivore, car il faut deux à trois fois plus d'énergie pour produire le carburant synthétique que l'énergie chimique contenue dans le carburant produit, soit généralement 100 MJ pour produire un kg de carburant liquide dégageant 45 MJ d'énergie lorsqu'il est brûlé. Cela signifie que l'échelle requise du système énergétique pour parvenir à une substitution significative de la consommation actuelle de plastique ou de carburant sera très probablement inaccessible avant des décennies : il faudrait non seulement remplacer les 500 EJ annuels d'énergie fossile d'aujourd'hui par des énergies renouvelables, mais une grande partie de cette énergie multipliée par 2 ou 3 (voir la section "Analyse technique des limites des NET").

## Limites du CCUS

En résumé, le captage du carbone est limité par son coût énergétique et financier élevé. De plus, si le CO<sub>2</sub> stocké est utilisé pour l'EOR, il finit par augmenter les émissions et contribuer à la crise climatique. Le CCS élimine 80 à 95 % du CO<sub>2</sub> et aucun des autres polluants, qui, dans le cas des centrales au charbon, comprennent les PM<sub>2,5</sub>, le dioxyde de soufre, le benzène, l'ozone, les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone (la combustion du gaz est plus propre, car elle ne produit pas de SOx ni de benzène, et peu de NOx et de CO). Les autres polluants augmentent en fait, en raison du combustible fossile supplémentaire utilisé pour alimenter le CCS lui-même. Sur la base du cycle

de vie, y compris le coût en énergie et en CO<sub>2</sub> de la construction de l'équipement nécessaire, seuls 63 à 82 % du CO<sub>2</sub> sont éliminés, la limite supérieure de cette fourchette nécessitant un captage par oxycombustion coûteux<sup>13</sup>.

Le CCU est limité par le marché restreint de l'utilisation du CO<sub>2</sub> sans autre transformation. Le CO<sub>2</sub> est une molécule très stable, dont la transformation en matière première ou en combustible nécessite beaucoup d'énergie, généralement 2 à 3 fois l'énergie contenue dans le combustible. À long terme, on peut imaginer un avenir moins contraignant sur le plan énergétique, ce qui réduirait l'importance de cette contrainte, mais certainement pas avant plusieurs décennies.

Il n'y a pas de problèmes insurmontables dans le transport ou le stockage, mais de nombreux défis d'ingénierie tels que le coût, les exigences énergétiques, les risques, la perception et l'acceptation du public, et le temps nécessaire pour construire l'infrastructure.

Enfin, le potentiel du CCUS diminuera avec l'abandon des énergies fossiles, et ne sera que partiellement compensé par la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS), décrite dans le chapitre sur les NET. Une fois que nous aurons complètement éliminé les combustibles fossiles, comme nous devons le faire pour des raisons de climat mais aussi de santé et de biodiversité, le CCUS pourrait conserver un rôle limité dans les processus industriels comme la production de ciment.

# 4. TECHNOLOGIES D'ÉMISSIONS NÉGATIVES (NET)

## Méthodes et technologies: nombreuses méthodes complémentaires à petite échelle

Les technologies d'émissions négatives (NET) diffèrent des CCUS car elles éliminent le CO<sub>2</sub> après qu'il ait été libéré dans l'atmosphère. Elles présentent l'avantage évident de pouvoir être mises en œuvre partout dans le monde, par exemple là où l'espace, l'eau, l'énergie ou le stockage géologique sont disponibles. Elle présente également un inconvénient majeur : Le CO<sub>2</sub> ne constitue que 0,04 % (420 ppm) de l'atmosphère, contre environ 10 % des gaz de combustion. Par conséquent, la tâche est beaucoup plus difficile (pression partielle plus faible, débit d'air beaucoup plus important par tonne de CO<sub>2</sub>), et le processus est environ 3 à 4 fois plus énergivore.

C'est également la raison pour laquelle il est généralement plus intéressant de restaurer ou d'accélérer les cycles naturels du carbone que de créer un processus entièrement artificiel (voir Figure 2).

Alternativement et plus communément (adapté de Minx et al 2018<sup>8</sup> et Fuss et al<sup>20</sup>), le large éventail de NET peut être classé par mode d'extraction et de stockage. L'extraction et le stockage biologiques sont souvent désignés par l'expression "solutions fondées sur la nature". La fertilisation des océans n'est pas incluse en raison de son potentiel très limité et de ses nombreux effets secondaires, altérant les propriétés physiques, chimiques et biologiques des écosystèmes marins.

1. **Extraction et stockage biologiques** : la photosynthèse extrait du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le

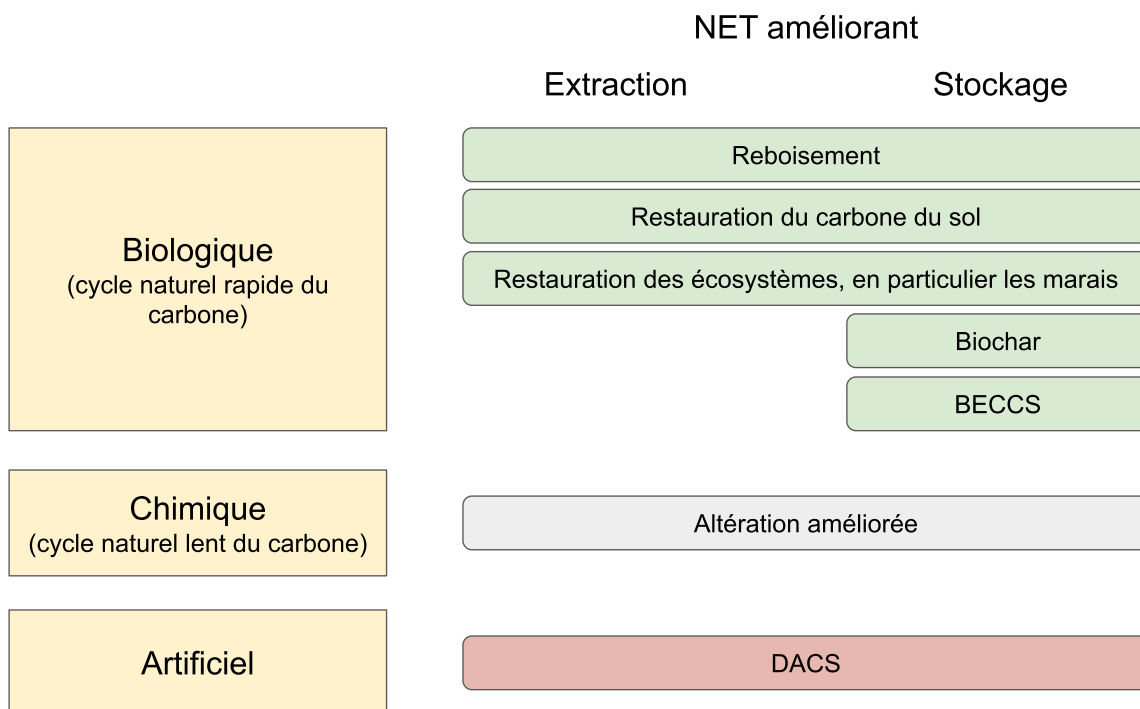


Fig. 2 : Classification des NET

convertit en biomasse, qui peut être stockée directement, de plusieurs façons :

- **Reboisement ou afforestation**, stockage du carbone dans les arbres : cette méthode est relativement facile et généralement peu coûteuse, mais elle nécessite une grande superficie de terrain. Par exemple, pour extraire l'équivalent de toutes les émissions actuelles territoriales suisses, soit 47 Mt de CO<sub>2</sub>e, en utilisant de jeunes forêts moyennes<sup>21</sup> à 6 tonnes/ha/an, il faudrait deux fois la superficie totale de la Suisse, replantée tous les 20 ans. Pour obtenir des avantages significatifs en matière de biodiversité, il faut des *"forêts primaires d'espèces indigènes, où il n'y a pas d'indications clairement visibles d'activités humaines et où les processus écologiques ne sont pas sensiblement perturbés"*<sup>22</sup> ce qui prend des décennies. Cela suggère un compromis à trouver entre l'extraction du CO<sub>2</sub>, car les jeunes arbres poussent plus vite, et la biodiversité, qui nécessite des forêts anciennes. Une difficulté supplémentaire consiste à garantir la permanence, car les forêts peuvent être coupées. Elles pourraient également brûler, libérant rapidement le CO<sub>2</sub> capté, ce qui devient plus probable avec un climat plus chaud et des schémas de précipitations modifiés.
- **Restaurer les écosystèmes**, en particulier les marais : c'est l'une des actions climatiques les plus prometteuses. Il est relativement facile et rapide de ré-inonder et d'arrêter les émissions continues provenant de la biomasse tourbeuse en décomposition (l'inondation coupe les flux d'oxygène). En l'espace de quelques mois, cette action génère d'importants co-bénéfices en termes de biodiversité, les marais étant généralement des "hotspots" de la biodiversité. Les marais à nouveau inondés cessent immédiatement d'émettre et commencent lentement à recapter le carbone perdu, car la matière végétale

s'accumule pendant des décennies, voire des siècles, dans des conditions humides, acides et anoxiques. Le principal défi consiste à vaincre les oppositions, car la plupart des marais drainés sont des terres agricoles productives, en raison de la richesse de leurs sols organiques. Dans le monde, les marais représentent 3 % de la surface terrestre et stockent 30 % du carbone du sol (550 GtC). Pour la Suisse, sur les 2500 km<sup>2</sup> de marais du début des années 1800<sup>23</sup> plus de 90 % ont été asséchés et une grande partie du reste a été dégradé. Le potentiel total d'émissions supplémentaires évitées ou de carbone récupéré n'est pas encore quantifié, mais la décomposition de la matière organique continue d'émettre annuellement des milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> par km<sup>2</sup> (généralement 3500 t pour les sols organiques utilisés comme terres cultivées et 2000 t pour la minéralisation des tourbières hautes drainées). Ces seules émissions atteignent probablement des millions de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année, et pourraient être arrêtées rapidement et relativement facilement.

- **Restauration des sols / stockage du carbone dans les sols** : les sols contiennent naturellement environ 5 % de matière organique, dont la moitié environ est du carbone, avec des variations locales importantes. L'agriculture industrielle dégrade tous les composants des sols, y compris la teneur en carbone. La restauration naturelle des sols prend des décennies, voire des siècles. L'agroécologie peut contribuer à accélérer la restauration des sols, en apportant des co-bénéfices importants en matière de biodiversité, mais il s'agit d'une entreprise complexe, qui n'est pas encore totalement quantifiée.
- **Biochar** : le chauffage de la biomasse sans oxygène (pyrolyse) produit du biochar, qui est stable et peut être stocké pendant



longtemps, ou appliqué sur les sols pour aider à les restaurer, ce qui améliore à la fois la biodiversité et la production alimentaire. Le potentiel est limité par la quantité de biomasse disponible. Pour la Suisse, voir l'analyse de la biomasse dans la section BECCS ci-dessous.

## 2. Extraction biologique, stockage géologique :

cette méthode, également appelée "bioénergie avec captage et stockage du carbone" (BECCS), combine la gazéification ou la combustion directe de la biomasse à des fins énergétiques avec le captage et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Cette méthode fonctionne très bien à petite échelle :

- S'il se limite à la biomasse excédentaire et aux déchets agricoles, et s'il est combiné au stockage biologique décrit ci-dessus, il reste limité en taille mais offre des co-bénéfices en termes de biodiversité. En Suisse, le potentiel supplémentaire non utilisé de biomasse durable est de 2,6 Mt de masse sèche<sup>24</sup>. En atteignant 80% de ce potentiel, avec 50% de carbone dans la masse sèche, on obtient un potentiel BECCS de  $2,6 \text{ Mt} \times 80\% \times 50\% \times 44/12 = 3,8 \text{ Mt CO}_2$  ou 8% des émissions territoriales suisses en 2020. Sur la base du cycle de vie, 5 à 6 % est plus réaliste.
- Pratiquer la BECCS à grande échelle est vite très problématique, car il faut beaucoup de terres et d'eau pour planter une biomasse à croissance rapide, ce qui entre en concurrence avec la biodiversité (la biodiversité a besoin de forêts anciennes, à l'opposé des monocultures de jeunes arbres à croissance rapide) et l'alimentation (bien que cela soit davantage lié à l'inefficacité de notre système alimentaire qu'au BECCS lui-même), utilise très probablement de l'énergie fossile pour la vaste logistique nécessaire et génère une pollution atmosphérique importante qui n'est pas prise en compte par le CCS.

## 3. Extraction et stockage chimique naturels :

il s'agit du cycle naturel lent du carbone, qui extraira tout le CO<sub>2</sub> excédentaire de l'atmosphère, même si nous ne faisons rien, dans des milliers d'années, par l'altération des roches, à un rythme de 10 à 100 Mt C/an. Comme nous ne disposons pas d'autant de temps, nous pouvons accélérer ce processus :

- L'altération améliorée est le nom donné à tous les processus accélérés de broyage de roches silicatées et carbonatées, voire de béton recyclé. Bien que le processus absorbe efficacement le carbone, il pourrait être difficile d'aller au-delà de la simple réduction des émissions du béton recyclé, en raison du manque d'espace pour placer la roche broyée et de l'énergie nécessaire. Une tonne de CO<sub>2</sub> peut nécessiter environ deux tonnes de roche.

## 4. Extraction chimique artificielle, stockage géologique :

également appelé extraction directe dans l'air (DAC) avec stockage (DACS). Ce procédé est similaire au CCS, avec plusieurs différences importantes :

- Flexibilité géographique : Le DAC peut être placé n'importe où, par exemple à proximité de sources d'énergie ou de formations géologiques de stockage.
- Besoin limité en terres et en eau.
- Type de matériau utilisé : généralement des sorbants solides utilisant l'adsorption, c'est-à-dire capturant le CO<sub>2</sub> à leur surface (des solvants liquides sont également utilisés, nécessitant généralement des températures élevées, et dans les climats chauds et secs, beaucoup d'eau<sup>25</sup>). Le procédé est relativement nouveau et l'échelle des installations est beaucoup plus petite que celle du CCS, par un facteur de 100 à 1000 par installation (état en octobre 2021). Les recherches les plus récentes montrent toutefois que la consommation et la fabrication de sorbants ou de solvants ne sont pas un facteur limitant<sup>26</sup>. Des approches

hybrides, comme adsorbant+membrane, pourraient être utilisées à l'avenir.

- Consommation d'énergie : c'est de loin le problème le plus important, et très probablement la limite fondamentale du DAC. En raison de la faible concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air, il faut au moins 7 GJ par tonne extraite; aujourd'hui, l'énergie nécessaire est plus proche de 10 GJ par tonne de CO<sub>2</sub>.

En résumé, il existe de nombreuses méthodes efficaces et complémentaires d'extraction du carbone, dont beaucoup présentent des co-bénéfices importants pour la biodiversité. Un effort important est nécessaire pour développer correctement les connaissances, puis pour développer largement cette capacité dans la société. Le principal problème est l'échelle possible, avant que les inconvénients ne prédominent. Dans la perspective actuelle, il semble difficile d'éliminer plus de quelques pour cent des émissions actuelles de 40 Gt/an. Cela souligne encore plus l'urgence de réduire rapidement les émissions.

Pour la Suisse, toutes les méthodes biologiques (Fig. 2) doivent être explorées et mises en œuvre dans les limites des terres et de la biomasse disponibles, en mettant l'accent sur les co-bénéfices de la biodiversité. En raison des limites de l'énergie et des terres, l'altération améliorée sera probablement limitée à la production de ciment et de béton ; il est peu probable que la DACS puisse être appliquée à grande échelle (voir le chapitre suivant).

## Analyse technique des limites des NET

Toutes les NET ont des limites fondamentales, qui sont de nature très différente :

1. Extraction et stockage biologiques : Utilisation globale des terres, régimes alimentaires dominants, pratiques agricoles et autosuffisance alimentaire ; et plus spécifiquement :
  - Superficie des forêts et des marais

- Biomasse pour le biochar
  - Pratiques agricoles pour le carbone du sol
2. Extraction biologique, stockage géologique (BECCS) : disponibilité de la biomasse excédentaire et des déchets agricoles
    - Goulets d'étranglement supplémentaires à court terme : stockage géologique, transport du CO<sub>2</sub> et méthanisation.
    - Remarque : les limites ci-dessus s'appliquent à la BECCS à petite échelle. La BECCS à grande échelle est beaucoup plus problématique, voir le commentaire de la section précédente.
  3. Stockage naturel dans les roches : terrain pour placer les roches broyées, énergie
    - Goulets d'étranglement supplémentaires à court terme : intégration avec la production de ciment et de béton
  4. DACS : voir l'analyse ci-dessous

En résumé, pour les méthodes 1-2-3 ci-dessus, la contrainte fondamentale est l'utilisation des terres, au niveau national et mondial, et l'interaction avec / la concurrence avec la production alimentaire, la préservation de la biodiversité et l'utilisation de l'eau.

**Extraction directe dans l'air avec stockage (DACS):** il s'agit de la méthode NET la plus mal comprise, car il existe peu de limites fondamentales absolues et, en théorie, des dizaines de Gt de CO<sub>2</sub> par an pourraient être extraites et stockées. En pratique, la DACS jouera probablement un rôle beaucoup plus modeste dans les décennies critiques pour la stabilisation du climat.

Notre analyse technique est basée sur "Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants"<sup>25</sup> l'une des évaluations (optimistes) les mieux documentées sur les systèmes d'extraction directe du CO<sub>2</sub>, qui évalue la faisabilité d'un déploiement massif, permettant d'éliminer 7 à 15 Gt de CO<sub>2</sub> en 2050. L'analyse proposée est basée sur les courbes d'apprentissage de la technologie, affirmant que l'extraction directe du CO<sub>2</sub> à l'échelle de la

Gt est rentable avec une mise à l'échelle rapide: "Les coûts de captage du CO<sub>2</sub> des systèmes DAC basse température alimentés par des systèmes hybrides PV-vent-batterie pour les conditions marocaines et sur la base d'un scénario conservateur, sans/ avec utilisation de la chaleur résiduelle gratuite sont estimés à 222/133, 105/60, 69/40 et 54/32 €/tCO<sub>2</sub> en 2020, 2030, 2040 et 2050, respectivement". Bien que l'analyse soit solide, nous remettons en question les hypothèses fondamentales sous-jacentes :

1. **État de préparation technologique** : le document<sup>25</sup>, rédigé en 2018, suppose une capacité totale installée de 1,5 à 3 Mt de CO<sub>2</sub> par an en 2020. En novembre 2021, la capacité mondiale de DAC est bien inférieure à 10 kt, soit un facteur  $2^8=256$  inférieur à l'hypothèse, c'est-à-dire 8 doublings. Aujourd'hui, il n'existe aucun plan concret pour construire des installations de DAC de 1 Mt, la taille standard pour un déploiement à grande échelle, ce qui représente à nouveau le même facteur de 250x par rapport à la plus grande usine en service. Il est clair que nous n'apprenons pas au rythme requis par ce scénario. Le scénario de base implique l'ouverture d'une nouvelle installation DAC fonctionnelle de 1 Mt par semaine de 2020 à 2030, une par jour de 2030 à 2040, et enfin 3 par jour de 2040 à 2050. Comme nous ne savons toujours pas comment construire une seule installation de 1 Mt, ce scénario est très ambitieux. Même le scénario prudent, qui sert de base aux chiffres définitifs des coûts, suppose la moitié de ce rythme de déploiement (une installation de 1 Mt toutes les deux semaines, deux jours, 16h dans les années 2020, 2030, 2040, respectivement).
2. **Fiabilité des données sur les coûts** : la plupart des données initiales sur les coûts proviennent d'une poignée d'entreprises du DAC, qui ne divulguent généralement pas leurs coûts (leurs contrats interentreprises comportent une clause de confidentialité), qui sont fortement incitées à comptabiliser leurs coûts de la

manière la plus favorable et qui ne font l'objet d'aucun audit public. Il est impossible d'évaluer la fiabilité de manière indépendante.

3. **Forme de la courbe d'apprentissage** : les courbes d'apprentissage couvrent les économies d'échelle, le coût des intrants, l'expérience des travailleurs et des gestionnaires, la normalisation et les discontinuités telles que les nouveaux produits, processus ou technologies. Toute courbe d'apprentissage finit par s'aplatir, parfois de façon abrupte. Les composants essentiels d'un système de DAC, tels que le PV, les éoliennes, le stockage, les ventilateurs, les solvants, les pompes à chaleur, présenteront probablement des taux de réduction des dépenses d'investissement beaucoup plus faibles en raison de l'importance de leur base installée initiale, ce qui limitera les doublons induits par le DAC (voir Ferioli et al. 2009 pour une discussion sur l'hypothèse d'apprentissage des composants<sup>27</sup>). Il faut s'attendre à de grandes incertitudes en raison de la mise à l'échelle très limitée à ce jour du DAC sur lequel toutes les données de coûts sont basées<sup>28</sup>.
4. **Échelle du système énergétique requis**
  - a. **Besoin énergétique total du DAC** : en utilisant le modèle développé dans le document (250 kWh-el + 1750 kWh-th par tonne de CO<sub>2</sub>), pour 15 Gt de CO<sub>2</sub>, nous avons besoin de 30 PWh d'énergie, ou en utilisant une pompe à chaleur avec un COP de 3,5, un total de 11,25 PWh, ou 40,5 EJ. Cela représente presque la moitié de la production mondiale d'électricité d'aujourd'hui (26 PWh) et 150 % de la production mondiale d'électricité renouvelable de 2020 (8 PWh). Ce chiffre ne tient pas compte de la compression, du transport, du stockage du CO<sub>2</sub>, ni de la conversion en combustibles synthétiques ou en matières premières.
  - b. **Estimation des combustibles liquides et des matières premières** : les combustibles liquides contiennent environ 45 MJ/kg ; leur production à partir de CO<sub>2</sub> et

d'hydrogène nécessite au moins deux fois cette énergie, généralement 100 MJ/kg<sup>29</sup>. Pour convertir 7 Gt de CO<sub>2</sub> en combustibles liquides, qui contiennent environ 87 % de carbone, on obtient  $7 \text{ Gt} * 12/44 / 0,87 = 2,2 \text{ Gt}$  de combustibles. Cela nécessite environ 220 EJ d'énergie, ce qui est beaucoup plus que le DAC seul (mais inclut le DAC pour la partie convertie en combustibles).

- c. Stockage par batterie : pour assurer un fonctionnement de 8000 h/an, nécessaire en raison des investissements élevés, le stockage de l'électricité par batterie couvre 56 % de l'énergie totale, soit  $40,5 \text{ EJ} / 365 * 56 \% = 62 \text{ PJ}$  ou 17,26 TWh. Cela représente environ 86 Mt de batteries (200 Wh/kg) ou 4,3 Mt de lithium (250 g li/kWh), soit environ 50 fois la production mondiale de lithium de 2020.
- d. Chaleur résiduelle : compte tenu de l'énergie thermique totale nécessaire de près de 100 EJ, cela dépasse probablement la chaleur résiduelle mondiale attendue en 2050, en supposant une meilleure efficacité énergétique et donc moins de chaleur résiduelle. Cela rendrait improbable la deuxième série de chiffres sur les coûts (222/133, 105/60, 69/40 et 54/32 €/tCO<sub>2</sub> en 2020, 2030, 2040 et 2050, respectivement).

Sur la base des résultats de ce modèle détaillé<sup>25</sup> nous avons montré plusieurs raisons fondamentales pour lesquelles l'optimisme à l'égard de la DACS semble déplacé, en particulier le potentiel de la courbe d'apprentissage et les contraintes énergétiques. Sans essayer de prédire l'avenir, nous appelons à la prudence quant aux perspectives de la DACS à l'échelle mondiale au cours des 3 ou 4 prochaines décennies critiques pour le climat.

## 5. COÛTS ET FINANCEMENT

### Aperçu des coûts

Presque tous les aspects du retrait du CO<sub>2</sub> évoqués ci-dessus sont problématiques, pour différentes raisons dont les principales sont :

- **Consommation d'énergie**, perte d'efficacité, coût
  - Le CCS post-combustion nécessite de séparer le CO<sub>2</sub> des autres gaz de combustion, en partant d'une faible pression partielle, et exige une compression et un filtrage.
  - L'oxycombustion et la précombustion simplifient la séparation en ajoutant des processus coûteux et complexes pour transformer le milieu de combustion ou le combustible.
- **Utilisation des terres**, nécessité de réformer l'agriculture, coût
  - La restauration des marais est relativement facile car il suffit généralement de les ré-inonder. S'ils sont pollués, la dépollution est un processus lent et coûteux. Cependant, de nombreux anciens marais sont aujourd'hui des terres agricoles productives, ce qui nécessite un changement important des pratiques agricoles.
  - Des milliards d'années d'évolution ont rendu la photosynthèse très résiliente. Pourtant, elle est inefficace, ne convertissant que 1 à 2 % de l'énergie solaire en énergie chimique. Cela entraîne des besoins très élevés en terres, en eau et en nutriments, et entre en concurrence avec d'autres utilisations des terres, notamment l'agriculture telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, ce qui limite le potentiel de toutes les méthodes d'extraction et de stockage biologiques. Cela ne diminue en rien l'importance

des méthodes biologiques, mais signifie simplement qu'elles ne permettront pas d'éliminer plus de quelques pour cent des émissions actuelles.

- **Défis techniques**, temps de déploiement, coût
  - Presque aucun site industriel n'est aujourd'hui équipé du CCS. Beaucoup pourraient être équipés, mais à un coût important.
  - La compression et le transport du CO<sub>2</sub> nécessitent des infrastructures, de l'énergie, et doivent surmonter la corrosivité et le risque de fuites potentiellement dangereuses.
  - Le stockage du CO<sub>2</sub> dans des formations géologiques nécessite le développement de sites appropriés, ce qui prend des années, voire plus d'une décennie, et nécessite une surveillance attentive et constante. Souvent, les sites sont éloignés des sources d'émission, ce qui rend le transport plus coûteux et plus complexe.
  - La BECCS est basée sur une méthanisation coûteuse, ou sur la combustion de biomasse très polluante, nécessitant un filtrage.
  - La collecte et le transport de la biomasse à grande échelle doivent se faire sans combustibles fossiles. Une telle infrastructure n'existe pratiquement pas aujourd'hui.
  - Il existe aujourd'hui très peu de capacités de pyrolyse pour la fabrication de biochar.

Il n'est pas surprenant que l'extraction du carbone soit coûteuse<sup>8</sup> à l'exception de certaines méthodes biologiques :

- Le reboisement ou le boisement est la seule méthode peu coûteuse, généralement bien inférieure à 100 dollars par tonne de CO<sub>2</sub>

- Carbone du sol, selon la méthode <100\$/t
- Biochar, 8-300 \$/t
- BECCS, 45-250 \$/t
- DACS, environ 1000 \$/t en 2021, qui devrait diminuer lentement (l'UE REF2020<sup>30</sup> estime à 894 € en 2030, et à 495 € à terme) ; voir également "Analyse technique des limites des NET".
- Altération améliorée, 40-1000 \$/t

À mesure que l'extraction du carbone prend de l'ampleur, elle subit simultanément deux effets de coût opposés :

- **Les coûts diminueront** avec l'échelle, le long d'une courbe d'apprentissage : les techniques deviennent moins coûteuses avec le temps, les méthodes s'améliorent, des normes émergent, les gens sont formés, etc.
- **Les coûts augmenteront** avec l'échelle, à mesure que le portefeuille de projets évolue. Les projets les moins coûteux sont financés en premier, par exemple : la biomasse la plus

accessible, le stockage géologique le plus facile à exploiter, les écosystèmes les plus appropriés et non pollués à restaurer. Avec l'augmentation de l'échelle, des projets plus coûteux doivent être ajoutés.

Le premier effet, la réduction des coûts liée à la courbe d'apprentissage, peut être quantifié sur la base de l'expérience. Le Global CCS Institute estime ainsi les coûts de mise à l'échelle<sup>14</sup> du CCS, en fonction de la taille de l'installation :

indice de coût de captage = facteur d'échelle<sup>n-1</sup>  
 À pression partielle de CO<sub>2</sub> constante, n est généralement compris entre 0,6 (installation unique) et 0,8 (installations multiples).

Pour la Suisse, cela signifie par exemple :

- Le passage de 100 à 500 kt CO<sub>2</sub> réduit le coût de captage de 47 % :  $1 - 5^{0.6-1}$  (de l'usine d'incinération à la cimenterie)
- Le passage de 1 à 20 sources ponctuelles réduit le coût de captage de 45 % :  $1 - 20^{0.8-1}$  (de 1 à 20 incinérateurs)

Revenus de la contribution basée sur les émissions de CO<sub>2</sub> et dépenses pour l'extraction (CHF, concept)

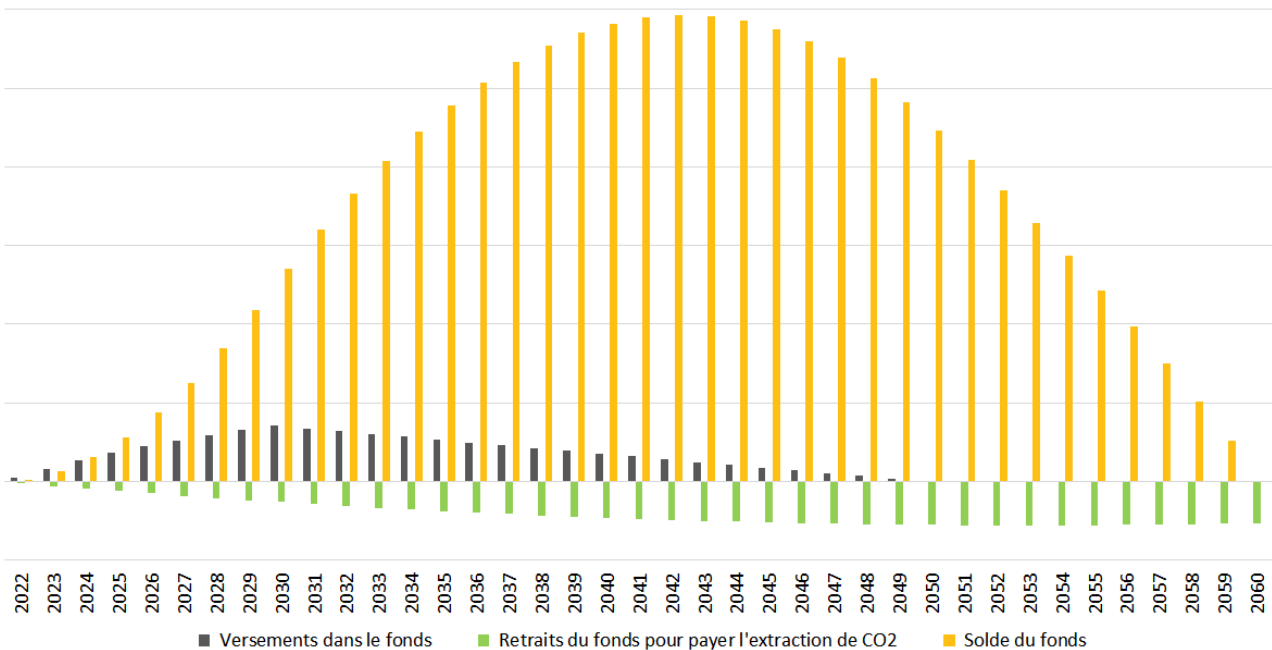


Fig. 3 : Exemple de séparation des revenus des projets d'extraction via un fonds de dépollution climatique

Ces chiffres sont conformes à la seule estimation détaillée des coûts du CCS en Suisse, réalisée par l'ETHZ Sus.Lab pour l'incinérateur KVA de Linth<sup>31</sup>, qui estime que le coût de l'exploitation initiale d'une seule installation est de 156 à 190 CHF par tonne de CO<sub>2</sub> et que le potentiel d'extension permet de réduire ce coût à 68-108 CHF par tonne.

Ce chiffre est peut-être optimiste, car il suppose une mise à l'échelle suffisante du stockage géologique norvégien. Une fois que nous aurons atteint l'échelle Mt du CCS en Suisse, le stockage devra peut-être être national, afin d'éviter les goulets d'étranglement du transport et du stockage internationaux, ce qui ajoutera de l'incertitude aux coûts futurs.

## Incitations financières

Le retrait du CO<sub>2</sub> est coûteux, qu'il s'agisse du captage à la cheminée ou d'une NET, un coût qui ne peut être couvert par la vente du CO<sub>2</sub>. La raison fondamentale est que le CO<sub>2</sub> est une molécule stable, dont l'utilisation en tant que telle est très limitée (boissons gazeuses, serres). Pour toute autre utilisation, en tant que matériau ou combustible, les liens étroits entre le carbone et l'oxygène doivent être rompus, au prix d'un coût énergétique élevé, dans le cadre de processus complexes, à l'aide d'équipements coûteux. En outre, l'utilisation du CO<sub>2</sub> conduit à son rejet final dans l'atmosphère. Cela serait au mieux neutre, s'il remplace le CO<sub>2</sub> fossile.

La compression, le transport et le stockage permanent du CO<sub>2</sub> capté à la cheminée ou extrait par le biais d'une NET augmentent encore les coûts. Les options permettant de couvrir les coûts de retrait et de stockage diffèrent selon qu'il s'agit de CCS ou de NET.

Le CCS est mis en œuvre par un émetteur de CO<sub>2</sub> comme moyen de réduire ses émissions de CO<sub>2</sub>. Par conséquent, les incitations à la réduction des émissions pourraient contribuer à couvrir les coûts du CCS. Les implications pour les émissions nettes mondiales dépendent du type d'incitation à l'atténuation choisi :

1. **Taxe ou subvention sur les émissions de CO<sub>2</sub>.** L'émetteur obtient la couverture des coûts du CCS si la taxe évitée ou la subvention obtenue dépasse ces coûts. Il ne choisit l'option CCS que s'il ne dispose pas de moyens moins coûteux pour réduire ses émissions. Dans ce cas, le CCS constitue une réduction nette des émissions mondiales.
2. **Droits d'émission (cap-and-trade).** Si l'émetteur bénéficie d'une allocation de droits d'émission, le CCS lui libère une quantité de ces droits qu'il peut vendre. S'il ne bénéficie d'aucune dotation ou d'une dotation trop faible, le CCS le dispense d'acheter des droits d'émission. Les coûts du CCS sont couverts pour l'émetteur si le prix de marché des droits d'émission dépasse les coûts du CCS par tonne de CO<sub>2</sub> captée et stockée. Comme les droits d'émission non achetés ou vendus grâce au CCS seront utilisés par un autre émetteur, le CCS n'entraîne pas de réduction nette des émissions mondiales dans le cadre d'un régime de plafonnement et d'échange.
3. **Subvention spécifique.** Une subvention pour la mise en place et l'exploitation du CCS pourrait, bien sûr, encourager l'émetteur de CO<sub>2</sub> à adopter cette solution si elle couvre la totalité des coûts. En cas de couverture partielle des coûts, la subvention doit être complétée par d'autres incitations à l'atténuation.

Ainsi, le CCS entraîne une réduction nette des émissions de CO<sub>2</sub> si l'émetteur reçoit une subvention ou est soumis à une taxe sur le CO<sub>2</sub> qui l'incite à adopter cette technologie et à réduire ainsi ses émissions au-delà du niveau qu'il aurait choisi de réduire par d'autres moyens d'atténuation.

Une NET est généralement exploitée par un opérateur qui n'émet pas beaucoup de CO<sub>2</sub>. Ses coûts peuvent être couverts par ces instruments :

1. **Compensation volontaire.** Un émetteur de CO<sub>2</sub> paie l'extraction par NET parce qu'il souhaite être neutre en carbone d'un point de vue comptable. Dans ce cas, la NET compense des

émissions qui, autrement, n'auraient pas été réduites.

2. **La compensation légale.** Un émetteur de CO<sub>2</sub> paie pour l'extraction par NET, la quantité de CO<sub>2</sub> extraite étant soustraite de ses propres émissions en vue d'atteindre un objectif d'atténuation ou d'éviter l'achat de droits d'émission. Comme la NET compense des émissions qui auraient autrement dû être réduites, elle ne contribue pas à une réduction nette des émissions de CO<sub>2</sub>.
3. **Droits d'émission.** L'exploitant de la NET se voit accorder des droits d'émission par tonne de CO<sub>2</sub> extraite de l'atmosphère. Il peut ensuite vendre ces droits pour couvrir ses coûts. Dans ce cas, la NET ne contribue pas à la réduction des émissions totales dans le cadre de la "bulle" créée par le système de plafonnement et d'échange, car elle permet simplement à un autre émetteur d'émettre davantage de CO<sub>2</sub>, l'émetteur qui achète les permis à l'exploitant de la NET.
4. **Subvention.** L'opérateur de la NET reçoit une subvention pour la mise en place et l'exploitation du système ou par tonne de CO<sub>2</sub> extraite de l'atmosphère. Dans ce cas, la NET entraîne une réduction effective de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Ainsi, les NET n'entraînent une réduction réelle de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que lorsqu'elles sont payées par des subventions ou qu'elles sont volontaires.

En vertu du principe du pollueur-payeur, les ressources financières de la subvention devraient être fournies par les émetteurs de CO<sub>2</sub>, passés ou présents. En fixant ces contributions au prorata de leurs émissions de CO<sub>2</sub>, cela leur fournirait une incitation supplémentaire à réduire ces émissions. En outre, la quantité de CO<sub>2</sub> extraite de l'atmosphère grâce à la subvention qu'ils rendent possible pourrait être interprétée comme une compensation pour leurs émissions.

## Déconnecter le paiement du pollueur des coûts de dépollution

Compte tenu du coût élevé des NET, la proportion d'émissions de CO<sub>2</sub> compensées par ce biais et le moment de ces compensations sont essentiels. Considérons cette expérience de pensée. Supposons que les NET puissent être déployées à grande échelle dès 2023 à un coût moyen de 500 CHF par tonne de CO<sub>2</sub> définitivement extraite de l'atmosphère. Si l'on visait une compensation à 100 %, il faudrait prélever une contribution de 500 CHF sur chaque tonne de CO<sub>2</sub> émise en 2023. Cela représenterait une charge énorme. En outre, le coût des NET diminue avec le temps, mais les émissions de CO<sub>2</sub> aussi. À un moment donné, entre 2040 et 2050, les émissions de CO<sub>2</sub> seraient réduites à zéro, de sorte qu'il n'y aurait plus de base pour financer la subvention des NET, alors qu'elles pourraient précisément extraire du CO<sub>2</sub> à des coûts très réduits.

Il est donc préférable de déconnecter chronologiquement la collecte de la contribution et le paiement des coûts d'extraction. Ceci peut être réalisé par le biais d'un fonds, tel que le Fonds suisse de dépollution climatique proposé dans le document de travail E4S "Climate Cleanup Fund - getting to Swiss Net Zero". La Fig. 3 illustre comment cela pourrait fonctionner. Dans cet exemple, l'émetteur verse au fonds un montant constant de 200 CHF par tonne de CO<sub>2</sub> émise. Ces paiements diminuent en même temps que le volume des émissions, pour atteindre zéro en 2050. En 2022, lorsque l'extraction du CO<sub>2</sub> coûte 500 CHF par tonne, seul 1 % des émissions de cette année-là est extrait de l'atmosphère. La dépense est soustraite du fonds. À mesure que les coûts d'extraction diminuent, le volume de CO<sub>2</sub> extrait augmente, jusqu'à son maximum en 2060, où il est plus de 50 fois supérieur au volume extrait en 2022. Entre 2022 et 2060, toutes les émissions accumulées entre 2022 et 2050 ont été extraites à un coût cumulé qui est égal au montant total des contributions au fonds (avec les intérêts ajoutés).



Enfin, et c'est un point crucial, le mécanisme du fonds est autocorrectif, car le prix du carbone dépendra fortement de la vitesse de décarbonation. Pour une année donnée, il existe un portefeuille de projets d'extraction de carbone disponibles, avec des coûts par tonne très différents. Les projets les moins coûteux sont financés en premier, et le prix moyen dépendra fortement du volume : une décarbonation rapide laissera peu d'émissions résiduelles, et un prix moyen d'extraction faible. Si la décarbonation est lente, le volume d'extraction du carbone sera élevé, avec un prix moyen très élevé. Cela créera une forte incitation à décarboner plus rapidement.

## 6. STRATÉGIE ET IMPLICATIONS

---

### Les arguments en faveur d'une planification conjointe CCS+NET

Sur le plan conceptuel, le CCS et les NET sont très différents, le premier réduisant les émissions et les seconds extrayant le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Cependant, il est préférable d'analyser ensemble le CCS et les NET, pour les raisons suivantes :

- De nombreuses technologies ou systèmes non technologiques sont partagés : le captage du carbone (CCS fossile et BECCS), les pipelines de CO<sub>2</sub>, le stockage géologique, ainsi que le monitoring, le financement, l'établissement de rapports et la gouvernance.
- Le CCS est nécessaire à court terme, tant que nous brûlons encore des combustibles fossiles, mais il a peu de potentiel à long terme en dehors du ciment. La construction de l'infrastructure devient plus réalisable si elle est utilisée ultérieurement pour la BECCS. En cas de disponibilité limitée d'infrastructures partagées, une perspective commune est essentielle.
- Le CCS et les NET pourraient être plus efficaces s'ils utilisaient les mêmes instruments politiques, par exemple un prix pour les émissions ou un crédit pour le retrait du CO<sub>2</sub>, ou encore un mandat pour retirer toutes les émissions.

### Conditions géopolitiques de déploiement

Il y a une grande différence entre :

1. L'extraction et le stockage biologiques (reboisement, restauration des écosystèmes, carbone du sol, biochar), où le stockage du carbone est soit une partie vivante de la biodiversité (arbres, marais), soit un facteur important (sols riches en carbone),

2. BECCS, si elle est limitée à la biomasse excédentaire et aux déchets agricoles, sans effets négatifs sur la biodiversité, et

3. Autres méthodes, telles que le CCS ou la DACS

Si elle est conçue et gérée correctement, et si son échelle est limitée (voir §4 NET), la première mesure contribue à la biodiversité (et à la résilience, aux services écosystémiques, à l'adaptation au climat), la deuxième produit de l'électricité et de la chaleur, et la troisième n'a pas d'autres avantages que l'élimination du carbone, et surtout pas d'avantages locaux.

Les deux premières mesures peuvent donc fonctionner si elles sont soutenues dans le contexte local. Étant donné que le CCS ou la DACS ne présentent pas d'autres avantages que le retrait du CO<sub>2</sub>, ils nécessitent une coordination mondiale presque parfaite. Même une fuite de 20 à 25 %, c'est-à-dire le fait qu'un quart de la population mondiale continue d'émettre du CO<sub>2</sub> sans modération, réduirait à néant l'ensemble des efforts déployés : en supposant que le "monde de l'action climatique", qui représente 80 % des émissions de 2020, parvienne à décarboner ses émissions conformément à l'objectif SR15 du GIEC<sup>1</sup> et donc à réduire ses émissions de 90 %, le "monde sans action climatique" représenterait plus des 2/3 des émissions mondiales - dans ce cas, le retrait du carbone dans le premier groupe serait tout aussi coûteuse mais aurait peu d'impact. Au minimum, cette coordination devrait couvrir la réduction des émissions, la réglementation du transport et de la séquestration du CO<sub>2</sub>, et le financement du CCS et des NET. Cela est beaucoup plus difficile que d'accélérer les approches existantes telles que les NDCs (Contributions déterminées au niveau national) de l'Accord de Paris, le CBAM (Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières), les taxes et la réglementation sur le carbone, et le financement de l'élimination du CO<sub>2</sub> avec la biodiversité locale ou les co-bénéfices sociétaux, qui

peuvent tous être efficaces à l'échelle régionale ou dans des coalitions partielles ("clubs climatiques").

La Carnegie Climate Governance Initiative<sup>32</sup> (C2G) donne un bon aperçu de la gouvernance du retrait du carbone et des nombreuses lacunes qui subsistent.

En particulier, les partisans de la DACS massive<sup>25</sup> mentionnent parfois le scénario théorique où nous attendons si longtemps que rien d'autre que la DACS à l'échelle de plusieurs Gt ne parvienne à stabiliser le climat. Ce scénario est particulièrement improbable - si les services écosystémiques commencent à s'effondrer, entraînant une famine généralisée, des migrations, des conflits, voire des guerres, une action mondiale coordonnée vers des objectifs à long terme devient encore plus difficile. Un SRM unilatéral et non coordonné pourrait être une issue plus probable.

## Objectif du retrait du carbone

Rappelons l'objectif principal du retrait du carbone: contribuer à atteindre le zéro net en éliminant les émissions résiduelles, après une décarbonation suffisamment profonde. À plus long terme, au-delà du zéro net, l'extraction du carbone pourrait réduire progressivement la concentration de CO<sub>2</sub>. Toutefois, l'urgence reste d'atteindre le zéro net d'ici 2050 au plus tard<sup>1</sup>.

Comme cela inclut le CCS et les NET, il pourrait y avoir un scénario dans lequel le déploiement rapide du CCS seul atteindrait 10 à 15 % des émissions de 2020, avant de décliner en raison de l'abandon obligatoire des combustibles fossiles pour des raisons de santé et de protection des écosystèmes. Toutefois, les coûts élevés, la difficulté de parvenir à la coordination géopolitique presque parfaite nécessaire (voir ci-dessus) et le fait que cette énorme transformation de la société ne serait utile que pendant deux ou trois décennies peut-être, rendent ce scénario plutôt improbable.

En outre, l'objectif est d'offrir de réels co-bénéfices en matière de biodiversité et de produire de

l'électricité et de la chaleur (BECCS).

Ce n'est pas du tout de cette façon que le CCS s'est développé historiquement, mais plutôt pour extraire davantage de pétrole de gisements presque épuisés. Ce n'est pas non plus la raison pour laquelle les principaux acteurs manifestent aujourd'hui leur enthousiasme pour le CCS et leur confiance dans les futures NET. Ils veulent plutôt prolonger l'ère des fossiles, prolonger la durée de vie des actifs menacés comme les centrales électriques au charbon, ouvrir de nouveaux marchés pour les compagnies pétrolières (solvants du CCS), ou simplement bénéficier des nombreuses subventions "vertes" disponibles. La stabilisation du climat est manifestement absente des objectifs de presque tous les principaux acteurs.

Le retrait du carbone étant essentiel, il est urgent de fixer les bonnes priorités et mettre en place les bonnes politiques. Sinon, cela restera un transfert de richesse des contribuables vers les entreprises, et ne contribuera pas à stabiliser le climat.

Comme l'écrivait The Economist<sup>33</sup> (nous traduisons) juste avant l'ouverture de la COP 26 : *"L'un des problèmes est que les industries des combustibles fossiles et les gouvernements qui les soutiennent ont intérêt à dire qu'ils poursuivent le CCS, parce qu'il semble offrir un avenir à certains combustibles fossiles, sans aucune raison pressante de le mettre en œuvre. Cette technologie rend les centrales plus coûteuses et moins efficaces, et en l'absence d'un prix élevé du carbone, c'est une pénalité que personne ne veut payer"*.

## Aléa moral

En économie, l'aléa moral (moral hazard) est une situation dans laquelle une organisation est incitée à prendre trop de risques parce qu'elle n'est pas entièrement responsable des conséquences.

L'aléa moral lié à l'élimination du carbone pourrait se produire s'il limitait ou retardait les réductions d'émissions<sup>34</sup>.

Comme nous le soutenons dans ce texte, l'aléa moral peut être considérablement réduit si le retrait du carbone est considéré comme une méthode permettant d'éliminer uniquement les émissions résiduelles, en supposant que la voie de la décarbonation profonde est raisonnablement bien définie. Il est particulièrement important de définir le calendrier et la séquence des activités prévues pour la sortie des combustibles fossiles, ainsi que les émissions résiduelles "acceptables" pour d'autres secteurs comme le ciment ou l'agriculture. En l'absence de feuilles de route claires, de nombreux secteurs pourraient considérer leurs propres émissions comme "inévitables" et prétendre faire partie des derniers 10 %.

Le succès du déploiement initial du CCS ou des NET avec une baisse rapide des coûts pourrait également créer un aléa moral, réduisant la pression pour une décarbonation rapide, créant une incitation à investir encore plus dans le retrait du carbone, ce qui en ferait le point d'échec unique de la politique climatique. Cet échec pourrait se matérialiser en raison d'un obstacle imprévu ou simplement de l'aplatissement de la courbe d'apprentissage (voir "Analyse technique des limites des NET" ci-dessus), laissant le monde dangereusement mal préparé à l'urgence climatique.

## Acceptation sociale

Dans ce nouveau domaine, la perception du public évolue constamment, et beaucoup dépend de la façon dont les questions sont formulées. L'Assemblée britannique sur le climat, composée de 108 citoyens choisis au hasard selon une méthode de tri stratifié et donc représentatifs de la société, a délibéré entre janvier et mai 2020, afin de déterminer comment le Royaume-Uni pourrait atteindre le niveau net zéro. Son rapport final<sup>35</sup> inclut spécifiquement le retrait du carbone, avec quatre mesures largement acceptées (la reforestation et une meilleure gestion des forêts, la restauration des marais, l'utilisation du bois dans la construction et la valorisation du carbone du sol), et deux mesures très controversées (BECCS et DACS). Les

préoccupations par rapport à ces deux dernières méthodes étaient liées à :

- Fuites potentielles du stockage géologique
- Ne pas s'attaquer au problème, détourner l'attention des réductions d'émissions
- Moins naturel, coûteux et non éprouvé, car la DACS "nécessite également beaucoup d'énergie".

Il est très intéressant de noter que les membres de l'Assemblée britannique sur le climat ont également déclaré que la BECCS et la DACS "ne devraient être utilisés qu'avec modération comme moyen de capter la dernière partie du carbone qui ne peut être captée par une combinaison de méthodes naturelles de stockage du carbone et de mesures visant à produire une énergie neutre en carbone". En outre, l'énergie fossile avec CCS a été fortement rejetée comme moyen de produire de l'électricité à faible teneur en carbone, bien plus que la BECCS et la DACS.

## Limites énergétiques et utilisations alternatives

Les combustibles fossiles représentent encore bien plus de 80 % de la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire, qui s'élève à près de 600 EJ<sup>36</sup>. L'abandon rapide des énergies fossiles est un impératif pour le climat, la biodiversité, la santé et l'éthique. L'installation du CCS dans les centrales électriques au charbon et au gaz est bénéfique pour le climat mais augmente les polluants autres que le CO<sub>2</sub>, en raison de la consommation accrue de carburant, ce qui nuit aux écosystèmes et aux personnes les plus vulnérables. Elle prolonge également l'âge des fossiles. Remplacer ces 500 EJ par de l'énergie propre sera une tâche colossale, ce qui rendra la disponibilité énergétique contraignante pour les décennies à venir, très probablement à des niveaux inférieurs au total actuel de 600 EJ.

Dans ce contexte, quelles utilisations de cette précieuse énergie propre disponibles permettront-elles d'atteindre le plus haut niveau de bien-être

humain ? Cette question mérite bien sûr d'être posée pour de nombreuses activités. Compte tenu de l'intensité énergétique et de l'échelle nécessaires à l'extraction du carbone de l'atmosphère, elle est particulièrement importante pour la DACS et les carburants synthétiques.

En moyenne, chaque humain utilise 63 GJ d'énergie fossile par an, émettant 4,8 t de CO<sub>2</sub>. L'élimination de ce CO<sub>2</sub> en utilisant la DACS nécessite environ 48 GJ sans compter la compression, le transport et le stockage, soit environ ¾ de l'énergie primaire et 100% de l'énergie finale générée par la combustion de ces 63 GJ d'énergie fossile. Le remplacement de cette énergie fossile par la DACS et des carburants synthétiques (une forme de CCU, où le carbone est réémis en quelques semaines) nécessiterait au moins 150 GJ d'énergie propre par personne et par an (voir Échelle du système énergétique dans Analyse technique des limites des NET). Il s'agit d'une quantité d'énergie qui ne sera probablement pas disponible avant très longtemps et qui représente environ 10 fois l'énergie nécessaire pour satisfaire tous les besoins humains<sup>10</sup>.

En perspective, 15 GJ d'énergie propre peuvent alimenter des services énergétiques permettant de satisfaire les besoins annuels d'une personne. Ou encore, elle pourrait permettre de séquestrer 1,5 tonnes de CO<sub>2</sub> à l'aide de la DACS, soit un tiers de ses émissions. Ou encore, elle permettrait de produire environ 6 GJ de carburant synthétique ou 130 kg, ce qui correspond à 1/10 de leur consommation actuelle.

Il existe de nombreuses bonnes raisons de développer des énergies propres aussi rapidement que possible. Cependant, dans un monde sous contrainte énergétique, à tout moment, la priorité absolue doit être l'accès universel aux services énergétiques de base. Sortir rapidement des combustibles fossiles, développer les énergies renouvelables et assurer l'inclusion sont déjà des objectifs très ambitieux. Il est très peu probable que l'on puisse doubler ou tripler simultanément le système énergétique pour alimenter en plus la DACS et fournir des carburants synthétiques à grande échelle.

## Limites potentielles du retrait du carbone

Y a-t-il des limites physiques absolues au retrait du carbone ? Oui, mais trop loin pour avoir une importance pratique dans les décennies ou même les siècles à venir. Le rayonnement solaire entrant sur la Terre est limité ; cette énergie a de nombreuses autres utilisations essentielles. Quelle que soit la source d'énergie, toute conversion énergétique génère de la chaleur résiduelle qui, à une échelle suffisante, réchauffera la planète. D'autre part, le stockage géologique est probablement suffisant pour stocker tout le carbone de la planète.

Dans les décennies à venir, les services écosystémiques seront essentiels pour stabiliser le climat<sup>1</sup>. Faut-il optimiser la BECCS pour le rendement en plantant des monocultures à forte croissance, ou pour la biodiversité et la résilience, en donnant à la forêt primaire le temps nécessaire à sa croissance, même si cela implique d'extraire et stocker lentement le carbone ? Comment transformer notre système alimentaire pour qu'il soit sain, durable et résilient, et qu'il complète le retrait du carbone sans lui faire concurrence ? Pour une santé optimale des sols, quelle quantité de biomasse végétale pouvons-nous retirer, tout en réduisant les engrais chimiques ?

L'échelle du CCS est limitée par les sources ponctuelles appropriées, qui réduiront toutes tôt ou tard leur utilisation de combustibles fossiles. Cela limite la fenêtre temporelle pendant laquelle le CCS fonctionnera et, à moins d'être potentiellement converti en BECCS, le rend plus difficile à financer. La limitation de l'approvisionnement en énergie pourrait modifier nos priorités, comme nous l'avons indiqué dans la section précédente.

Le projet ENGAGE de l'IASA<sup>37,38</sup> analyse des scénarios "nets négatifs" avec une décarbonation lente et une extraction massive du carbone plus tard dans le siècle, conduisant à des "niveaux dangereux de dépassement". Pour limiter ce dépassement du réchauffement, il faut une décarbonation plus rapide et, en fin de compte, une moindre nécessité

d'extraire le carbone, comme sur les sentiers prévisionnels P1 et P2 du GIEC compatibles avec 1,5°C<sup>1</sup>.

Enfin, il faudra du temps pour apprendre : affiner les méthodes, former les gens, développer le suivi et la gouvernance, partager les meilleures pratiques, normaliser les composants clés et leur production, créer les conditions géopolitiques nécessaires au déploiement, structurer le financement et lever des fonds. Le CCS bénéficie de dizaines d'années d'expérience dans le domaine de l'EOR ; aujourd'hui, nous sommes confrontés à un défi totalement différent et nous avons peu d'expérience.

Compte tenu de l'extraordinaire complexité et de toutes ces pièces mobiles, nous n'avons pas connaissance d'un modèle complet approprié, au-delà des estimations de reboisement et de BECCS utilisées dans les modèles d'évaluation intégrés (IAM). Il serait donc difficile de modéliser, et encore moins de prouver, notre estimation selon laquelle le retrait du carbone ne dépassera probablement pas 5 à 10 % des émissions actuelles. Nous montrons toutefois les estimations pour la Suisse, qui sont cohérentes avec ce niveau. Au niveau mondial, cet effort reste en cours ; le WG3 du GIEC fournira une nouvelle estimation.

Les questions en suspens ne doivent pas retarder l'adoption de mesures urgentes en faveur du climat, et le retrait du carbone est clairement l'une des bonnes solutions pouvant contribuer à 10 % des réductions. Elle ne doit pas être considérée comme la solution à la crise climatique.

## Implications pour la Suisse

Qu'est-ce que cela signifie pour la Suisse ? La Suisse présente quelques spécificités, qui ont chacune leurs propres implications (→) :

- Des écosystèmes riches mais fragiles, en partie en haute altitude, stressés par l'agriculture industrielle, déjà exposés à un réchauffement de 2°C
  - Importance des mesures ayant des co-bénéfices en matière de biodiversité,

notamment la restauration des écosystèmes et les projets de biochar/carbone du sol.

- Petite taille, forte densité : biomasse très limitée, utilisations multiples et concurrentes.
  - Forte limitation du potentiel total d'extraction du carbone par la reforestation, la restauration des écosystèmes, le biochar ou la BECCS, ce qui souligne l'importance d'une décarbonation rapide et profonde.
- Structure géologique propice au stockage permanent dans les aquifères salins inexploités, mais seules des évaluations théoriques sont disponibles. Pays enclavé, sans stockage significatif dans les pays voisins.
  - Urgence d'explorer le stockage géologique domestique, d'autant plus que les délais d'exploration et d'autorisation sont longs.
- Un potentiel important de CCS à court terme pour le ciment, la chimie et l'incinération des déchets.
  - Ce potentiel ne pourra être exploité à grande échelle que si le stockage géologique domestique est développé rapidement. Il est probable que la décarbonation profonde réduira considérablement le potentiel du CCS, peut-être après 20-30 ans.
- Acceptation croissante de l'idée d'équiper les incinérateurs de déchets de CCS
  - Comme environ la moitié des déchets incinérés est constituée de bois et d'une autre biomasse, cette partie compterait comme NET (BECCS). La BECCS permet d'allonger la durée de vie des infrastructures communes de CCS : captage, transport et stockage, au moins pour l'incinération des déchets.
- Aucune source d'énergie appropriée pour la DACS à une échelle significative.
  - La DACS a peu de chances de se développer à grande échelle en Suisse.

- Importations importantes d'émissions grises,  $\frac{2}{3}$  du total<sup>39</sup>.
  - Dans une logique où le retrait du carbone suit les émissions, seules les émissions territoriales pourraient probablement être retirées au niveau national. La décarbonation profonde va très probablement reconfigurer complètement la chaîne de valeur, de sorte que ces proportions peuvent changer.

Le potentiel de retrait du carbone en Suisse, les coûts et un mécanisme de financement sont développés dans le livre blanc E4S "Climate Cleanup Fund - getting to Swiss Net Zero".

## 7. RÉFÉRENCES

---

1. Masson-Delmotte, V., Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, & United Nations Environment Programme. Global warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty : summary for policy-makers. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).
2. IPCC AR6 SPM Climate Change 2021: The Physical Science Basis. in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Masson-Delmotte, V. et al.) (Cambridge University Press, 2021).
3. Hepburn, C. et al. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature* 575, 87–97 (2019).
4. WWF (2020) Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss. Almond, R.E.A., Grooten M. and Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Switzerland.
5. Arrhenius, S. XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41, 237–276 (1896).
6. BAFU et.al., 2020: Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 2013: 105 S.
7. Climate Action Tracker | Warming Projections Global Update - November 2021.
8. Minx, J. C. et al. Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environ. Res. Lett.* 13, 063001 (2018).
9. Grubler, A. et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nat Energy* 3, 515–527 (2018).
10. Millward-Hopkins, J., Steinberger, J. K., Rao, N. D. & Oswald, Y. Providing decent living with minimum energy: A global scenario. *Global Environmental Change* 65, 102168 (2020).
11. Markandya, A. & Wilkinson, P. Electricity generation and health. *The Lancet* 370, 979–990 (2007).
12. Davy Guidicelli, J.-A. Key CCS topics: Worldwide deployment, EOR side-effects and Switzerland's potential. (EPFL, 2021).
13. Cuéllar-Franca, R. M. & Azapagic, A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 9, 82–102 (2015).
14. Kearns, D., Lui, H. & Consoli, C. Technology Readiness and Costs of CCS. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-and-costs-of-ccs/> (2021).
15. Onyebuchi, V. E., Kolios, A., Hanak, D. P., Biliyok, C. & Manovic, V. A systematic review of key challenges of CO<sub>2</sub> transport via pipelines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2563–2583 (2018).



16. Snæbjörnsdóttir, S. Ó. & Gislason, S. R. CO<sub>2</sub> Storage Potential of Basaltic Rocks Offshore Iceland. *Energy Procedia* 86, 371–380 (2016).
17. SCCER-SoE (2020): CO<sub>2</sub> Capture and Storage (CCS) – An Essential Element of the Swiss Climate Strategy, Results from the ELEGANCY Project, ETHZ (in preparation).
18. Chevalier, G., Diamond, L. W. & Leu, W. Potential for deep geological sequestration of CO<sub>2</sub> in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J Geosci* 103, 427–455 (2010).
19. IEA (2019), Putting CO<sub>2</sub> to Use, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.
20. Fuss, S. et al. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Lett.* 13, 063002 (2018).
21. Bernal, B., Murray, L. T. & Pearson, T. R. H. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance and Management* 13, 22 (2018).
22. FAO Terms and Definitions - FRA 2015, Forest Resources Assessment Working Paper 180, FAO, 2015.
23. Klaus G. (editor) 2007 : État et évolution des marais en Suisse. Résultats du suivi de la protection des marais. État de l'environnement no 0730. Office fédéral de l'environnement, Berne. 97 pp.
24. Steubing, B., Zah, R., Waeger, P. & Ludwig, C. Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2256–2265 (2010).
25. Fasihi, M., Efimova, O. & Breyer, C. Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production* 224, 957–980 (2019).
26. Madhu, K., Pauliuk, S., Dhathri, S. & Creutzig, F. Understanding environmental trade-offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life-cycle assessment. *Nat Energy* 1–10 (2021) doi:10.1038/s41560-021-00922-6.
27. Ferioli, F., Schoots, K. & van der Zwaan, B. C. C. Use and limitations of learning curves for energy technology policy: A component-learning hypothesis. *Energy Policy* 37, 2525–2535 (2009).
28. Yeh, S. & Rubin, E. S. A review of uncertainties in technology experience curves. *Energy Economics* 34, 762–771 (2012).
29. Meunier, C. Power-to-Liquids – Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. (Umweltbundesamt, 2016).
30. Directorate-General for Climate Action (European Commission) et al. EU reference scenario 2020: energy, transport and GHG emissions : trends to 2050. (Publications Office of the European Union, 2021).
31. CCS Feasibility | sus.lab. <https://www.suslab.ch/ms-ccs-feasibility>.
32. C2G (2021) Carnegie Climate Governance Initiative Evidence Brief: Carbon Dioxide Removal and its Governance.
33. Why the world needs negative emissions. *The Economist* (2021).
34. International governance issues on climate engineering Information for policymakers. (EPFL International Risk Governance Center, 2020). doi:10.5075/epfl-irgc-277726.

35. Report - The Path to Net Zero - Climate Assembly UK. <https://www.climateassembly.uk/report/www.climateassembly.uk/report/> (2020).
36. bp Statistical Review of World Energy 2021.
37. IIASA Policy Brief #30, October 2021.
38. Riahi, K. et al. Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. *Nat. Clim. Chang.* 11, 1063–1069 (2021).
39. Nathani, C. and Soceco, R., Greenhouse gas footprint of Swiss consumption. (2019).