

Fiche technique

Puits hybrides et techniques de CO₂

Auteur	Dr. Cyril Brunner (Institut des sciences de l'atmosphère et du climat, ETH Zurich)
Lectorat	Jasmin Schwägli (cheffe de projet, South Pole), Marcel Hänggi (collaborateur scientifique, Association suisse pour la protection du climat)
Traduction	Michèle Kaennel Dobbertin, Muri (AG)
Date	Août 2021

1. Situation initiale (situation actuelle, non respectueuse du climat)

Dans un cycle naturel équilibré du carbone, les sources et les puits de CO₂ dans l'atmosphère s'équilibrent, ce qui a pour effet que pendant une période climatologique de référence d'au moins 30 ans, le CO₂ ne s'accumule ni ne se dégrade dans l'atmosphère. Cet équilibre, qui a prévalu sur terre pendant des millénaires avant l'industrialisation (Petit et al., 2019 ; Bereiter et al., 2018), a été perturbé par la combustion de grandes quantités de carbone fossile (pétrole, gaz naturel, charbon et lignite) et par la combustion non durable de la biomasse. Ces deux activités humaines ont conduit et conduisent encore à ce que les sources de CO₂ apportent plus de CO₂ dans l'atmosphère que les puits de CO₂ n'en éliminent dans le même temps. Étant donné que le CO₂ ne se dégrade que lentement dans l'atmosphère, la biosphère et les océans – on estime qu'il faut entre 3000 à 7000 ans – (Archer et al., 2009), le CO₂ en tant que gaz à effet de serre s'accumule régulièrement dans l'atmosphère, causant le changement climatique.

Il en va de même pour les cycles naturels des autres gaz à effet de serre, dont le potentiel de réchauffement global et le temps de séjour atmosphérique varient considérablement. Les activités humaines renforcent les sources, ce qui entraîne l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il s'agit de gaz à effet de serre tels que le méthane (p. ex. dus à l'élevage de bétail ou à la fermentation ou provenant de fuites de gaz naturel) et le protoxyde d'azote (dégagé p. ex. par la fertilisation des champs ou certains procédés industriels) ou des gaz à effet de serre synthétiques (liquides de refroidissement ou gaz d'isolation), qui n'ont pas de cycle naturel du carbone. Tout comme chaque molécule supplémentaire de CO₂, chaque molécule supplémentaire de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère continue à alimenter le changement climatique provoqué par l'homme.

2. Solutions concrètes : messages clés

- **Introduction et précisions terminologiques**

Pour que le climat de la terre se stabilise à un niveau supportable, il faut que pour chaque molécule à effet de serre émise dans l'atmosphère, une molécule à effet de serre équivalente soit retirée de l'atmosphère. Le **bilan des émissions** de tous les gaz à effet de serre est alors **zéro net**, car les sources et les puits de gaz à effet de serre s'annulent mutuellement. Cela vaut également pour toute stabilisation du réchauffement global, que ce soit à 1,5 °C, 2 °C ou même 5 °C : la température ne cessera d'augmenter que si la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'augmente pas non plus. Si l'on veut désamorcer partiellement le mécanisme du changement climatique d'origine humaine, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère doit être ramenée à des valeurs historiques, en prélevant dans l'atmosphère davantage de gaz à effet de serre qu'il n'en est émis dans le même temps. On parle dans ce cas d'émissions nettes négatives. Il convient de souligner que même après le rétablissement des concentrations historiques de gaz à effet de serre, les écosystèmes détruits jusqu'alors le resteront probablement à long terme. Si l'on dépasse certains points de basculement, cela déclenche des dynamiques qui ne peuvent pas être inversées par un retour à des températures plus fraîches. La question de savoir qui doit assumer les coûts immenses de ces futures émissions nettes négatives, comme le prévoit l'objectif tardif de zéro net en 2050, est jusqu'à présent un tabou politique.

L'extraction des gaz à effet de serre de l'atmosphère est très énergivore. Dans la plupart des cas, il est donc judicieux, d'un point de vue énergétique et financier, de ne pas rejeter d'émissions dans l'atmosphère.

Cette fiche d'information se concentre sur le prélèvement de CO₂, étant entendu que d'autres gaz à effet de serre anthropiques tels que le méthane ou le protoxyde d'azote peuvent également être extraits de l'atmosphère (voir p. ex. Jackson et al., 2019). Les recherches dans ce domaine en sont encore à leurs balbutiements. Plusieurs termes synonymes sont utilisés pour désigner le prélèvement de CO₂ : **puits de CO₂**, **prélèvement de CO₂** (en anglais *carbon dioxide removal*) ou **émissions négatives de CO₂**, ou simplement émissions négatives (ici sans « net » !). Avec la réduction des émissions, ces termes sont englobés dans la notion d'*atténuation* (lutte contre les causes, en anglais *mitigation*).

Les approches visant à extraire le CO₂ de l'atmosphère sont appelées **technologies à émissions négatives (NET)**. Elles peuvent être naturelles, techniques ou hybrides. Le terme « technologies » se réfère toujours uniquement à des puits qui ne seraient pas opérationnels sans action humaine. Par exemple, une forêt qui s'est développée naturellement est certes un puits de CO₂, mais elle servirait également de puits de CO₂ sans intervention humaine et ferait donc partie du cycle naturel du carbone. Seule une forêt plantée par l'homme compte comme NET (approche naturelle). Une autre approche NET naturelle consiste à empêcher grâce à des activités humaines la décomposition naturelle du bois mort en forêt, par exemple en le transformant en charbon végétal (voir plus loin).

Le stockage à long terme du CO₂ est appelé **séquestration**.

Il est facile de déterminer si on se trouve en présence d'une émission négative ou si le CO₂ est simplement en équilibre :

- Émissions négatives : le CO₂ prélevé provient directement ou indirectement de l'atmosphère, et au final, le CO₂ – ou le carbone de ce CO₂ – se trouve dans un autre réservoir de carbone. Un exemple en est la roche basaltique qui réagit avec le CO₂ de l'atmosphère pour former des carbonates stables à long terme (p. ex. du calcaire).
- CO₂ en équilibre (processus neutre en CO₂) : le CO₂ prélevé provient de l'atmosphère et s'y trouve à nouveau à la fin du processus. Les carburants synthétiques ou biogéniques en sont un exemple. Contrairement aux carburants fossiles, ils ne libèrent pas de CO₂ supplémentaire, mais sont élaborés à partir du CO₂ atmosphérique, qui est renvoyé dans l'atmosphère lors de la combustion. De même, un processus qui transfère du CO₂ d'une source non atmosphérique (par exemple, des énergies fossiles) vers un autre réservoir non atmosphérique (par exemple, des réservoirs géologiques dans des roches poreuses profondes) est également neutre en termes de CO₂. C'est ce qui se passe par exemple dans une centrale à charbon avec captage et stockage du carbone (CSC).¹

¹Une centrale au charbon avec CSC est idéalement neutre en carbone et donc meilleure qu'une centrale au charbon sans CSC, mais elle ne génère pas d'émissions négatives. En revanche, une centrale thermique avec CSC qui brûle du carbone provenant de l'atmosphère – comme le bois ou les déchets organiques – a une empreinte carbone négative.

Comme mentionné, il existe des approches naturelles, techniques et hybrides des émissions négatives. Cette fiche traite des approches techniques et hybrides, tandis que les approches naturelles font l'objet d'une fiche d'information séparée.

- **Approches techniques et hybrides**

Bioénergie avec captage et stockage du dioxyde de carbone (BECCS, BECS ou Bio-CCS)

Lorsqu'un processus consiste à brûler des biocombustibles, à utiliser la chaleur produite à des fins énergétiques ou thermiques, et à capturer et stocker à long terme le CO₂ produit, il s'agit d'une méthode de type « Bioénergie avec captage et stockage du dioxyde de carbone (BECCS) », en anglais *bioenergy with carbone and storage (BECCS)*. Parmi les biocombustibles pour lesquels le processus de capture et de stockage du carbone est utilisé, on peut citer :

- le bois dans une centrale thermique à bois ;
- Le biogaz ou le gaz de bois dans une centrale à gaz à cycle combiné ;
- la lignine contenue dans le bois lors de la fabrication du papier ;
- Les déchets biogéniques ou boues d'épuration dans une usine d'incinération d'ordures ménagères (la part fossile des déchets, qui représente environ 48 % du poids du combustible en Suisse, est neutre en carbone) ;
- les déchets biogéniques ou les boues d'épuration des fours à ciment.

Dans certaines sources, le **biochar** (charbon végétal, voir aussi la fiche d'information sur les puits naturels) est inclus dans BECCS, mais il est souvent considéré comme une approche distincte. Avec cette approche, la biomasse (par exemple de la paille, des feuilles mortes, des balles de céréales, des résidus de fermentation ou de presse, ou des boues d'épuration) est chauffée à 500-600 °C à l'abri de l'air ou avec de la vapeur et transformée en charbon par pyrolyse – comme lors de la fabrication de charbon de bois pour barbecue. Des substances cancérigènes (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP) peuvent se former dans les installations rudimentaires, mais elles n'apparaissent plus qu'à l'état de traces infimes dans les installations modernes et certifiées (Schmidt et al., 2021). Selon la quantité de biomasse utilisée pour la production de charbon végétal, on estime que le potentiel supplémentaire utilisable de manière durable en Suisse se situe entre 2,2 et 4 mégatonnes de CO₂/an au prix de 10 à 370 francs/tonne de CO₂ (Beuttler et al., 2019 ; Schmidt et al., 2021), le prix lors de la mise en œuvre de cette technologie se situant plutôt dans la partie supérieure de cette fourchette.

La **fermentation** de la biomasse libère également du CO₂, qui peut être séparé et stocké pour assurer un effet de puits. Le biogaz produit lors de la fermentation peut être utilisé en tant que matière première, et le résidu après fermentation peut être pyrolysé ou brûlé (avec CSC).

Séquestration géologique

Si le CO₂ est directement séparé dans le cas de la BECCS, la dépense énergétique supplémentaire nécessaire pour la séparation est de 0,27 à 1,1 kWh par tonne de CO₂, selon la méthode utilisée. La séparation entraîne des coûts supplémentaires de 45 à 51 francs/tonne de CO₂ (sus.lab, 2021). Le CO₂ doit être stocké de manière appropriée, ce qui peut se faire suivant quatre principales méthodes regroupées sous le terme générique de *séquestration géologique* :

- i. le CO₂ est enfoui dans des gisements épuisés de pétrole, de gaz naturel ou de CO₂. Ces gisements sont constitués de roches poreuses, par exemple de grès, recouvertes de couches de roches imperméables. Le CO₂ est piégé dans les pores par les forces capillaires, ou refoule le pétrole ou le gaz naturel qui y est emprisonné. Cette technique est utilisée depuis les années 1960 pour l'extraction du pétrole et du gaz naturel (récupération assistée du pétrole ou RAP, en anglais *enhanced oil recovery* ou EOR). Elle a donc contribué à l'effet de serre, mais peut désormais aussi être utilisée pour les NET. L'utilisation de la séquestration géologique pour l'extraction de pétrole et de gaz montre que cette méthode est désormais au point. À l'échelle mondiale, 39 mégatonnes de CO₂ ont été séquestrées de cette manière en 2019 (Global CCS Institute, 2019), ce qui correspond approximativement aux émissions de CO₂ de la Suisse. Rien qu'en 2021, les capacités de stockage mondiales ont augmenté de 32 % (Global CCS Institute, 2021).
- ii. Le CO₂ est injecté à plus de 800 mètres de profondeur dans des réservoirs géologiques poreux ou cavernaux remplis en permanence d'une solution saline. Non seulement le CO₂ est piégé dans les pores, mais il réagit à terme avec l'eau salée environnante pour former du gaz carbonique, qui réagit chimiquement avec la roche et se

minéralise. Cette minéralisation est très lente et s'étend sur des décennies, voire des siècles. De tels sites sont utilisés pour le stockage saisonnier de gaz naturel depuis 1975. En Allemagne, par exemple, la quantité de gaz naturel stockée de façon saisonnière en 2018 correspond à 61 mégatonnes de CO₂ (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 2019). La capacité de stockage en Europe est de 232 à 2120 gigatonnes de CO₂ (hors aires marines protégées), dont au moins 200 gigatonnes sous la mer du Nord (Poulsen et al., 2014 ; Consoli et Wildgust, 2017 ; Kearns et al., 2017). On estime le potentiel en Suisse à 2,68 gigatonnes de CO₂ (Chevalier et al., 2010), mais des analyses plus détaillées sont nécessaires.

- iii. Le CO₂ est enfoui dans des couches rocheuses profondes poreuses et minéralisées (p. ex. du basalte ou d'autres roches mafiques et ultramafiques). Celles-ci se trouvent principalement à proximité des régions volcaniques, mais forment la majorité de tous les gisements rocheux mondiaux. Le CO₂ réagit rapidement avec la roche et forme des minéraux stables comme le calcaire. Dans un projet en Islande, cette minéralisation a pris moins d'un an (Matter et al., 2016).
- iv. Les effluents gazeux passent à travers de la soude caustique, qui réagit avec le CO₂ pour former du carbonate de sodium (ou soude des ménagères, Na₂CO₃). Ce dernier se trouve naturellement dans les couches rocheuses et y est stable à long terme.

D'un point de vue scientifique, le stockage dans les roches profondes (i, ii et iii) est sûr et stable à long terme (78 à 98 % sur 10 000 ans ; Alcalde et al., 2018) grâce aux méthodes de confinement physique et chimique. À titre d'exemple pour une application dans un délai proche en Suisse, le transport (vers la mer du Nord) coûte 78 francs par tonne de CO₂ et le stockage entre 33 et 61 francs par tonne de CO₂, soit au total (y compris la séparation du CO₂ dans une usine d'incinération des ordures ménagères) entre 156 et 190 francs par tonne de CO₂, une somme qui devrait baisser à moyen terme pour se situer entre 68 et 108 francs par tonne de CO₂ (sus.lab, 2021).

Le CO₂ est naturellement lié chimiquement par les roches, ce qui entraîne la formation de carbonates, par exemple le calcaire du Jura ou des Dolomites. Sur une échelle de temps géologique, ce processus est le principal puits de CO₂, mais il est très lent. C'est pourquoi, dans le cas de l'**altération accélérée** (*enhanced weathering*), des roches carbonatées et silicatées sont broyées et répandues sur le sol. La roche réagit chimiquement avec le CO₂ et s'y lie. Ce processus libère parallèlement des nutriments favorisant la croissance des plantes, qui à leur tour éliminent du CO₂ de l'atmosphère. Il représente 87 % de l'effet de puits (Taylor et al., 2021). L'extraction et le broyage mécaniques sont déjà largement utilisés dans l'industrie aujourd'hui, mais nécessitent de grandes quantités d'énergie. Les roches déjà broyées sont produites lors de l'extraction de minerais métalliques, p. ex. le nickel ou le platine (Harrison et al., 2013 ; Power et al. 2014). Il existe des gisements exploitables de roches appropriées à proximité de la Suisse en France, en Allemagne et en Italie (Pilorgé et al., 2021). Beerling et al. (2020) ont estimé le potentiel pour l'Allemagne, la France et l'Italie, entre autres. Appliqué à la Suisse, ce potentiel serait de 3,7 mégatonnes de CO₂ par an pour un coût de 190 francs par tonne de CO₂.

Le ciment s'altère également en absorbant une partie des émissions générées au cours de sa fabrication par décomposition chimique du calcaire (émissions géogéniques). Pour que ce processus puisse être comptabilisé comme un puits de CO₂, il est indispensable que le CO₂ produit lors de la fabrication soit capté, par exemple via la capture et le stockage du carbone (CSC). Toutefois, le ciment ne réagit que lentement avec le CO₂ dans l'atmosphère, et essentiellement à proximité de la surface. C'est pourquoi le ciment recyclé, issu de la démolition de structures en béton, convient sous forme broyée pour fixer le CO₂, par exemple en l'étalant pendant un an sur une surface de stockage. En Suisse, ce potentiel est estimé à 0,075 mégatonnes de CO₂ par an à l'heure actuelle, et à 2,5 mégatonnes de CO₂ par an en 2050 (Beuttler et al., 2019) (voir la fiche Béton).

Capture et stockage directs du carbone dans l'air (DACCS)

L'approche de la capture et du stockage direct du carbone dans l'air consiste à produire des substances qui réagissent avec le CO₂ de l'air puis à le libérer séparément selon la méthode DACCS. Si le CO₂ est présent non pas directement dans un composé chimique stable à long terme mais sous forme pure, par exemple sous forme de gaz, il doit ensuite être stocké à long terme pour agir comme une émission négative. Le DACCS est aujourd'hui encore très gourmand en énergie (1,83 à 2,66 kWh/tonne de CO₂, Fasihi et al., 2019) et donc très cher (USD 600/tonne de CO₂ selon Evans, 2017 ; Gertner, 2019). Un groupe de recherche du MIT a présenté en 2019 une technologie alternative (*electro-swing adsorption*) qui ne nécessite que 252 à 568 kWh/tonne de CO₂ (Voskian et Hatton, 2019). Le potentiel des DACCS est limité en premier lieu par la

disponibilité des énergies renouvelables et par les moyens financiers que l'on est prêt à investir dans la construction des installations. Comme il n'est pas pertinent en termes de physique climatique de savoir où le CO₂ est extrait de l'atmosphère, le DACCS devrait être mis en œuvre de préférence là où il existe un grand potentiel d'énergies renouvelables ainsi que des réservoirs géologiques appropriés, par exemple en Islande. C'est là que se trouve le plus grand projet de DAC au monde, Orca (avec une participation suisse). Sa capacité de 4000 tCO₂ ne représente toutefois qu'un dix-millième des émissions suisses. Orca a été mis en service en septembre 2021 (The Guardian, 2021).

Beutler et al. (2019) ont estimé le potentiel de certains NET pour la Suisse à 6 mégatonnes de CO₂ par an. Le DACCS n'est pas pris en compte dans cette estimation, son potentiel dépendant principalement de la volonté d'investir financièrement. Le chiffre de 6 mégatonnes de CO₂ par an est inférieur à la somme des potentiels de toutes les approches réunies, car ces approches sont en partie en concurrence pour les matériaux de base (p. ex. la biomasse pour la BECCS ou le biochar). Le Conseil fédéral (2020) a repris cette évaluation dans son rapport sur l'importance des émissions négatives de CO₂ pour la Suisse. Une extension à toutes les approches ainsi qu'un ajustement des notions de potentiel aux potentiels durables de toutes les technologies d'émissions négatives utilisables pour la Suisse, leurs avantages et inconvénients, leur prix et leur pérennité (durée de stockage à long terme du CO₂) font actuellement l'objet d'un projet de recherche des hautes écoles fédérales. Les résultats devraient être disponibles au milieu de l'année 2022. La personne de contact est Cyril Brunner (cyril.brunner@env.ethz.ch).

3. Exemples déjà mis en œuvre

- Biochar : Verora, IWB Basel, Energie360 Frauenfeld West, Carbon Gold
- BECCS : Drax
- Séquestration géologique : Sleipner, Carbfix, Shute Creek, Terrell, Core Energy, Snøhvit, Century Plant
- DACCS : Projet Orca (Climeworks & Carbfix), Carbon Engineering, Global Thermostat, Carbyon, CarbonCapture, Mission Zero Technologies, Heirloom, Soletair Power, AirCapture
- Altération accélérée : Projet Vesta, Neustark, Eberhard

4. Mesures nécessaires

- Fixer le budget carbone (ou quota d'émissions) suisse et préciser comment un excédent sera financé.
- Sélectionner les NET admissibles, certifier les NET et leur stockage, ou sous quelle forme leurs effets de puits peuvent être reconnus au niveau national et international.
- Intégrer dans le système d'échange de droits d'émission (sous-optimal, car le système d'échange de droits d'émission ne favorise que très modestement la mise à l'échelle des technologies à émissions négatives. En effet, le système d'échange de droits d'émission prévoit d'abord un prix du CO₂ bas et une grande quantité de CO₂, et évolue vers un prix plus élevé et une plus faible quantité de CO₂ ; cependant, un secteur à développer débute avec un prix élevé et une faible quantité, et prend de l'ampleur tandis que le prix diminue (courbe d'apprentissage technologique).

Merk et al. (2018) recommandent de séparer explicitement l'objectif net zéro en un objectif de réduction des émissions et un objectif de réduction des puits, afin de ne retarder ni la réduction des émissions ni la mise à l'échelle des émissions négatives :

- Retard dans la réduction des émissions car des puits seraient plus tard disponibles qui pourraient assainir les émissions actuelles (pas de vérité des coûts / contraire au principe du pollueur-payeur), et retard dans l'expansion des émissions négatives, puisque (i) on oublie le fait que non seulement la réduction des émissions, mais aussi les émissions négatives sont indispensables et (ii) les émissions négatives sont initialement trop chères.
- Elles le resteront tant que la mise à l'échelle n'a pas démarré.

5. Réduction potentielle des émissions

1 000 000 à 10 000 000 tonnes de CO₂ par an

6. Calendrier jusqu'en 2050

Selon le rapport spécial du GIEC sur l'objectif de 1,5 degré (2018) : commencer la mise à l'échelle en 2020. En 2025, 8 % du potentiel cible seront utilisés, en 2030 17 %, en 2035 34 %, en 2040 56 %, en 2045 81 %, et pour l'année cible du net zéro 100 %. Les valeurs se réfèrent aux médianes de toutes les trajectoires d'émissions compatibles avec 1,5 degré (N = 90 ; IAMC 1.5°C Scenario Explorer, 2018).

7. Résumé

Pour stabiliser le climat mondial, les émissions mondiales de gaz à effet de serre doivent être ramenées à zéro net. À cet effet, il faut, d'une part, réduire au mieux et de manière conséquente les émissions existantes et, d'autre part, compenser avec des émissions négatives les émissions résiduelles restantes et difficilement évitables, de manière à obtenir un bilan net nul. Des émissions négatives supplémentaires sont nécessaires afin de réduire tout dépassement du budget carbone (par exemple pour l'objectif de 1,5 degré) avec un bilan net négatif des gaz à effet de serre, selon la trajectoire de réduction jusqu'à zéro net en 2050.

Il existe différentes approches pour la technologie des émissions négatives : naturelle, technique et hybride. Cette fiche d'information aborde les approches techniques et hybrides :

- biochar
- utilisation énergétique de la biomasse avec séparation et stockage du CO₂ (BECCS)
- extraction directe du CO₂ de l'atmosphère avec séparation et stockage du CO₂ (DACCS)
- altération accélérée.

Les approches naturelles font l'objet de la fiche « Puits naturels ».

Une estimation de toutes les approches possibles en Suisse (y compris naturelles) situe leur potentiel à 6 mégatonnes de CO₂ par an, ce qui serait suffisant pour compenser les émissions de gaz à effet de serre restantes et difficiles à éviter en Suisse. Les prix varient selon l'approche et se situent entre 0 et 1000 francs par tonne de CO₂.

Dans l'optique du zéro net, il est essentiel que les technologies d'émissions négatives soient développées dès à présent afin que la quantité projetée requise de CO₂ puisse être extraite de l'atmosphère à l'avenir. Étant donné que l'élimination du CO₂ de l'atmosphère n'a pas encore fait l'objet d'une analyse de rentabilisation (*business case*), il est nécessaire d'adapter les lois en vigueur et/ou de prévoir des aides financières.

8. Recouvrements avec d'autres thèmes

L'application des émissions négatives dès que possible, ainsi qu'une réduction cohérente des émissions, est indispensable pour atteindre l'objectif de zéro net émission de gaz à effet de serre en 2050.

- Secteur de l'énergie :
 - Besoins en chaleur et en électricité pour certaines approches des émissions négatives ou de l'utilisation incomplète de combustibles calorimétriques
- Stockage saisonnier Power2X :
 - Concurrence des stockages géologiques locaux : la production de carburants de synthèse et de carburants autres que l'hydrogène ou l'ammoniac nécessite du CO₂, qui est finalement rejeté dans l'atmosphère (pas d'effet de puits). Cela augmente le prix des deux classes (synfuels et émissions négatives, par exemple Ueckerdt et al., 2021).
- Agriculture :
 - Réduction significative des émissions d'oxyde nitreux et de méthane (voir p. ex. Schmidt et al., 2021)
 - Stabilisation du rendement en cas de sécheresse ou d'humidité stagnante grâce à l'amélioration du sol par le biochar et par le carbone du sol.
 - Globalement : concurrence pour l'utilisation des terres par certaines approches de technologies d'émissions négatives et les écosystèmes existants, la production alimentaire ou la population locale.

9. Sources

Alcalde, J., Flude, S., Wilkinson, M. et al. Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nat Commun* 9, 2201, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>, (2018).

Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., Tokos K.: Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2009 37:1, 117-134, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100206>, (2009).

Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>, (2020).

Bereiter, B., Shackleton, S., Baggenstos, D. et al. Mean global ocean temperatures during the last glacial transition. *Nature* 553, 39–44, <https://doi.org/10.1038/nature25152>, (2018).

Beuttler, C., Keel, S., Leifeld, J., Schmid, M., Berta, N., Gutknecht, V., Wohlgemuth, N., Brodmann, U., Stadler, Z., Tinibaev, D., Wlodarczak, D., Honegger, H., Stettler C. The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy – Fundamentals and Recommended Actions. Report by Risk Dialogue Foundation. Commissioned by the Federal Office for the Environment. Bern (2019).

Consoli Ch. P. and Wildgust N.. Current status of global storage resources. *Energy Procedia* 114, 4623-4628, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1866>, (2017)

Evans, S., The Swiss company hoping to capture 1% of global CO₂ emissions by 2025, <https://www.carbonbrief.org/swiss-company-hoping-capture-1-global-co2-emissions-2025>, Carbon Brief, (2017)

Fasihi M., Efimova O., and Breyer Ch., Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957-980, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086> (2019)

Gertner, J.. The tiny Swiss company that thinks it can help stop climate change (<https://www.nytimes.com/2019/02/12/magazine/climeworks-business-climate-change.html>). *New York Times*, (2019).

Global CCS Institute. The Global Status of CCS: 2019. Australia, (2019).

Global CCS Institute. Global Status Report. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>, (2021)

Harrison A., Power I. M., and Dipple G. M. *Environmental Science & Technology* 47 (1), 126-134 DOI: 10.1021/es3012854, (2013).

IAMC 1.5°C Scenario Explorer, hosted by IIASA <https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer>, (2018)

Jackson, R. B., Solomon, E. I., Canadell, J. G., Cargnello, M., & Field, C. B. (2019). Methane removal and atmospheric restoration. *Nature Sustainability*, 2, 436-438. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0299-x>, (2019).

- Kearns, J., Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Kheshgi, H., Chen, Y.-H.H., Paltsev, S., and Herzog, H. Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide. *Energy Procedia* 114, 4697–4709. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>, (2017)
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2018, Hannover, (2019)
- Matter J.M., M. Stute, S.Ó. Snæbjörnsdóttir, E.H. Oelkers, S.R. Gislason, E.S. Aradóttir, B. Sigfusson, I. Gunnarsson, H. Sigurdardóttir, E. Gunnlaugsson, G. Axelsson, H.A. Alfredsson, D. Wolff-Boenisch, K. Mesfin, F. de la Reguera, D. Taya, J. Hall, K. Dideriksen, and W.S. Broecker. “Rapid carbon mineralisation for permanent and safe disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions” *Science* 352 (2016)
- Petit, J., Jouzel, J., Raynaud, D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436 <https://doi.org/10.1038/20859> (1999).
- Pilorgé H., Kolosz B., Wu G. C., and Freeman J. “Global Mapping of CDR Opportunities” CDR Primer, edited by Wilcox J., Kolosz B., and Freeman J. (2021)
- Poulsen, N., Holloway, S., Neele, F., Smith, N.A., and Kirk, K.. CO₂StoP Final Report: Assessment of CO₂ storage potential in Europe. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/56-2014%20Final%20report.pdf> (2014).
- Power, I.M.; McCutcheon, J.; Harrison, A.L.; Wilson, S.A.; Dipple, G.M.; Kelly, S.; Southam, C.; Southam, G. Strategizing Carbon-Neutral Mines: A Case for Pilot Projects. *Minerals* 2014, 4, 399-436. <https://doi.org/10.3390/min4020399>, (2014).
- Schmidt, H.P., Hagemann N., Abächerli, F., Leifeld J., and Bucheli T. Pflanzenkohle in der Landwirtschaft : Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, 112, 1-71. <https://doi.org/10.34776/as112g>, (2021).
- Sus.lab, <https://www.suslab.ch/ms-ccs-feasibility> (2021)
- Taylor, L. L., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Rau, G. H., Blum, J. D., and Beerling, D. J.: Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition, *Biogeosciences*, 18, 169–188, <https://doi.org/10.5194/bg-18-169-2021>, (2021).
- The Guardian. World’s biggest machine capturing carbon from air turned on in Iceland. <https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/09/worlds-biggest-plant-to-turn-carbon-dioxide-into-rock-opens-in-iceland-orca>, (2021).
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A. et al. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 11, 384–393, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>, (2021).
- Voskian, S., and Hatton, T.A. Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy Environ. Sci.* 12, 3530–3547. <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>, (2019).