

# Potentiel et coût de l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en Suisse



Zürich, 30.11.2022

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

### **Mentions légales**

**Mandant:** Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Climat, CH-3003 Berne  
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

**Mandataire:** Cyril Brunner, Reto Knutti, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.

**Auteur:** Cyril Brunner, Reto Knutti, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.

**Accompagnement OFEV:** Sophie Wenger Hintz, Martin Jiskra

**Remarque:** La présente étude / le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV.  
Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Cette version française est une traduction du rapport original en allemand.

Proposition de citation : Brunner C., Knutti R. (2022). Potenziale und Kosten der CO<sub>2</sub>-Entfernung in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern.

Illustration sur la page de couverture :

Usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) de Horgen (illustration C. Brunner), qui dans le cadre du projet Airfix sera équipée d'unités de captage du CO<sub>2</sub>, de manière à ce que l'exploitation de l'installation ait un bilan CO<sub>2</sub> globalement négatif (l'usine capturera plus de CO<sub>2</sub> qu'elle n'en émet).

## Résumé

L'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (en anglais Carbon Dioxide Removal, CDR) est un élément indispensable pour atteindre un bilan neutre en émissions de CO<sub>2</sub> et de gaz à effet de serre. La présente étude évalue le potentiel technique ainsi que les coûts des méthodes CDR suivantes : l'afforestation, le reboisement et la gestion forestière optimisée sur le plan climatique, la production de biomasse-énergie avec captage et stockage du CO<sub>2</sub>, la séquestration du carbone dans le sol, le stockage de charbon végétal (biochar), l'altération accélérée des roches (en anglais Enhanced Rock Weathering, ERW), ainsi que l'extraction directe du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et le stockage (en anglais Direct Air Capture and Storage, DACS) en Suisse. Les possibilités et les coûts de transport et de stockage du CO<sub>2</sub> en Suisse et à l'étranger sont également évalués. La littérature scientifique spécialisée existante ainsi que les publications des offices fédéraux suisses servent de base à l'élaboration du rapport.

Le potentiel technique de CDR en Suisse sans DACS est estimé à 30 MtCO<sub>2</sub>-eq/an. Aucune estimation du potentiel des DACS (pour la Suisse) n'est disponible dans les publications scientifiques. En outre, le potentiel de stockage géologique en Suisse n'est pas encore suffisamment clarifié. La présente estimation du potentiel technique CDR est nettement plus élevée que dans les estimations précédentes, ce qui s'explique en premier lieu par le fait que cette estimation inclut désormais les ERW, la récolte de bois ainsi que la biomasse déjà utilisée à des fins énergétiques. En raison de plusieurs facteurs limitants, le potentiel réellement réalisable pour les CDR en Suisse est sans doute nettement plus faible que le potentiel technique mentionné. Les restrictions écologiques et économiques ne remettent toutefois pas fondamentalement en question une contribution substantielle des CDR en Suisse à la réalisation d'un objectif zéro émission nette. La quantité de CDR effectivement mise en place en Suisse à l'avenir dépendra en outre des conditions-cadres politico-économiques, de la politique climatique, des coûts d'évitement des émissions de gaz à effet de serre ainsi que de l'implication de la population.

Les coûts estimés varient fortement selon la méthode CDR concernée et vont d'environ -40 à 930 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq. Alors que l'on s'attend à ce que les coûts de certaines méthodes CDR, actuellement plutôt élevés, baissent grâce à des économies d'échelle, on s'attend aussi à ce que les coûts des méthodes CDR les plus économiques à l'heure actuelle augmentent à l'avenir, en raison d'effets de saturation et d'une raréfaction des ressources.

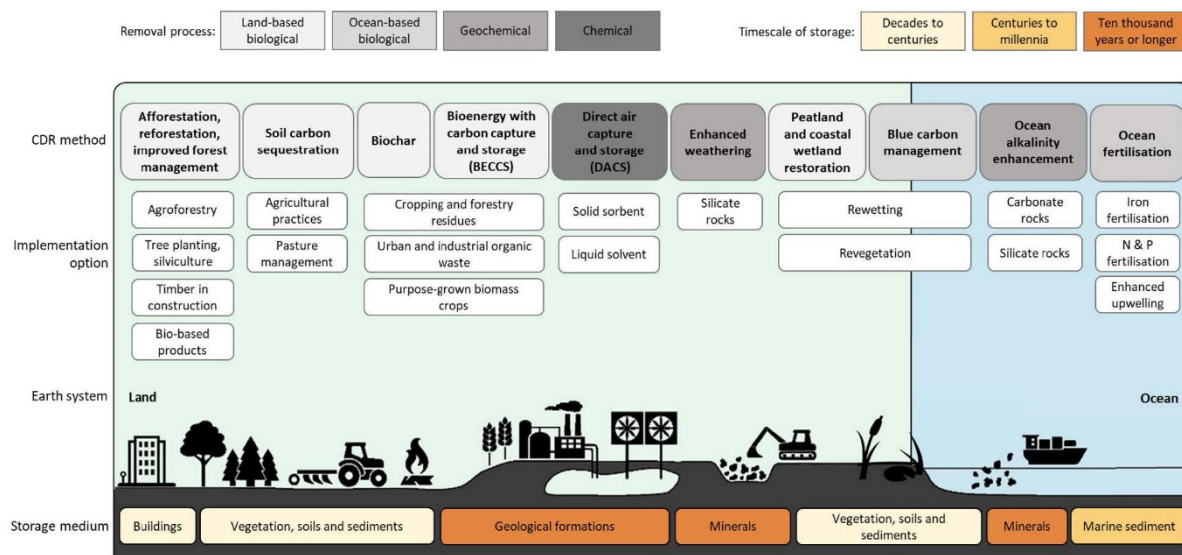
## Introduction

L'[extraction du CO<sub>2</sub>](#) (en anglais Carbon Dioxide Removal, CDR) est indispensable pour ramener les émissions de CO<sub>2</sub> ou de [gaz à effet de serre à un niveau net nul](#) (IPCC, 2022). L'extraction du CO<sub>2</sub> est obtenue par l'application de [technologies à émissions négatives](#). Il s'agit d'activités humaines qui extraient le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le stockent de manière permanente dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits (IPCC, 2022). La durée de stockage considérée comme "permanente" n'a pas encore été suffisamment clarifiée sur le plan scientifique, même si les premiers travaux montrent que la durée de stockage doit être supérieure à 300 ans (p. ex. Matthews, 2010). Le CDR ne remplace pas la réduction des émissions, mais constitue un élément essentiel d'une stratégie climatique visant à stabiliser le changement climatique d'origine humaine (IPCC, 2022).

Afin de contribuer à la réalisation des objectifs climatiques fixés par l'Accord de Paris, le Conseil fédéral souhaite que la Suisse atteigne un objectif de zéro émission nette d'ici à 2050. Dans sa stratégie climatique à long terme de janvier 2021, il a présenté des lignes directrices pour atteindre cet objectif zéro net. S'appuyant sur les perspectives énergétiques 2050+ (Kemmler et al., 2021a), la stratégie climatique à long terme montre comment le bilan des gaz à effet de serre en Suisse peut atteindre zéro net d'ici 2050. La loi fédérale sur les objectifs de la protection du climat, l'innovation et le renforcement de la sécurité énergétique (contre-projet indirect à l'initiative pour les glaciers), adoptée par le Parlement suisse le 30 septembre 2022, prévoit la même chose. Outre des valeurs cibles de réduction pour les années 2030-2050 et l'objectif intermédiaire de zéro net en 2050, il définit également des [émissions nettes négatives de gaz à effet de serre](#) après 2050, afin de contribuer à ce que l'augmentation de la température moyenne mondiale, après avoir éventuellement dépassé 1,5°C, soit à nouveau inférieure à 1,5°C d'ici la fin du siècle. La question de savoir dans quelle mesure les méthodes CDR doivent jouer un rôle dans la politique climatique suisse est d'une importance capitale pour que les institutions politiques, l'industrie, la recherche et la société puissent se positionner en conséquence, fixer aujourd'hui les conditions-cadres nécessaires, et notamment anticiper d'éventuels conflits d'objectifs dans l'utilisation de ressources limitées telles que la biomasse. Dans un rapport, le Conseil fédéral suisse montre comment le [captage et le stockage du CO<sub>2</sub>](#) (CCS) et les technologies d'émissions négatives peuvent contribuer progressivement à l'objectif climatique à long terme de la Suisse (Conseil fédéral, 2022). Dans ce contexte, le Conseil fédéral prévoit une élimination du CO<sub>2</sub> d'environ 7 MtCO<sub>2</sub>/an pour compenser les émissions résiduelles difficilement évitables en 2050.

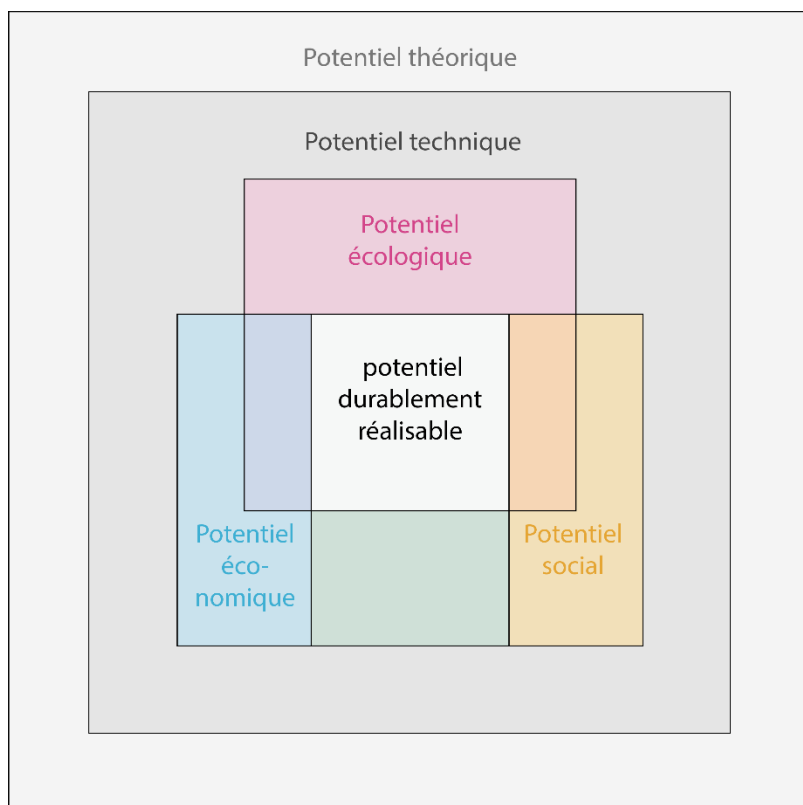
Le présent rapport a été rédigé à la demande de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Dans le cadre de ce mandat, il chiffre les potentiels et les coûts des méthodes CDR en Suisse sur la base de la littérature scientifique existante et des publications des offices fédéraux suisses.

## Potentiel et coût de l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en Suisse



**Figure 1 :** Taxonomie de la CDR. Illustration originale : IPCC (2022) basé sur Minx et al. (2018).

La figure 1 montre une classification courante des différentes méthodes CDR, le processus d'élimination sur lequel elles se basent (biologique terrestre, biologique océanique, géochimique ou chimique) ainsi que la durée de stockage du CO<sub>2</sub> éliminé. Toutes les méthodes ne peuvent pas être appliquées en Suisse, car il manque par exemple un accès à l'océan. La présente étude aborde les méthodes CDR pertinentes pour la Suisse, à savoir l'afforestation, le reboisement et la gestion forestière optimisée sur le plan climatique, la production d'énergie à partir de biomasse avec capture et stockage du CO<sub>2</sub>, la séquestration du carbone dans le sol, le stockage de charbon végétal, l'altération accélérée des roches ainsi que l'extraction directe du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et le stockage. Les différentes méthodes CDR sont brièvement présentées ci-dessous, avec une estimation de leur potentiel et de leur coût. Dans certaines méthodes CDR, le CO<sub>2</sub> est extrait sous forme de matière et doit être stocké. Les différentes possibilités de stockage, leurs potentiels et leurs coûts ainsi que le transport du CO<sub>2</sub> sont présentés à la suite des méthodes CDR.



**Figure 2** : Classification des différents potentiels. Graphique basé sur le Conseil fédéral (2020).

Cette étude se concentre sur le potentiel technique, qui est complété par des aspects économiques et écologiques selon la méthode CDR. Le potentiel technique chiffre la quantité qui peut être atteinte "dans les limites de la physique et de la chimie" et "selon l'état actuel de la recherche" (Conseil fédéral, 2020). Le potentiel durablement réalisable (cf. fig. 2 ; Conseil fédéral, 2020), qui constitue un sous-ensemble du potentiel technique, est pertinent pour la mise en œuvre effective. Les potentiels chiffrés ne comprennent pas les émissions de gaz à effet de serre qui se produiraient pendant la réalisation des potentiels. Ils n'incluent pas non plus la réduction indirecte d'autres émissions de gaz à effet de serre, par exemple grâce aux effets de substitution.



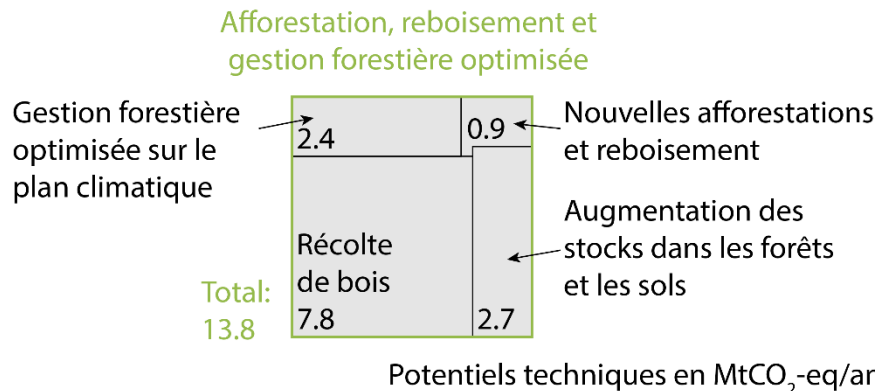
## Potentiel et coût des méthodes CDR en Suisse

### Afforestation, reboisement et gestion forestière optimisée sur le plan climatique

Grâce à la photosynthèse, la végétation de la forêt et de la campagne suisse extrait le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le stocke dans la biomasse ligneuse. La quantité extraite peut être augmentée par le reboisement, la reforestation ainsi que par une gestion forestière optimisée sur le plan climatique. Tant que la végétation reste intacte ou que la biomasse ligneuse utilisée n'est pas brûlée ou décomposée d'une autre manière, le stockage de CO<sub>2</sub> se poursuit, généralement pendant des décennies, voire des siècles pour les produits en bois à longue durée de vie.

En raison de la dynamique du cycle du carbone et de l'effet réversible de la fertilisation par le CO<sub>2</sub>, seule l'absorption de CO<sub>2</sub> par la forêt suisse résultant d'une action humaine intentionnelle constitue une méthode CDR (voir la définition de la CDR dans l'introduction). Ainsi, l'absorption de CO<sub>2</sub> par une forêt intacte n'est pas une méthode CDR du point de vue des sciences naturelles. Dans le cas de forêts exploitées, qui représentent la plupart des forêts en Suisse, seule la différence entre une valeur de référence et l'absorption de CO<sub>2</sub> effective pour la surface exploitée peut être considérée (IPCC, 2022). La valeur de référence correspond à l'absorption de CO<sub>2</sub> qui aurait lieu si l'exploitation de la surface forestière n'était pas modifiée.

#### Potentiel CDR



**Figure 3** : Les estimations du potentiel technique de l'afforestation, du reboisement et de la gestion forestière optimisée sur le plan climatique, en MtCO<sub>2</sub>-eq/an.

Le potentiel technique CDR de l'afforestation, du reboisement et de la gestion forestière optimisée sur le plan climatique en Suisse est estimé à 13,8 MtCO<sub>2</sub>/an et se compose de quatre sous-potentiels (cf. figure 3).

En ce qui concerne l'afforestation ou le reboisement en Suisse, le potentiel technique CDR est estimé à 0,87 MtCO<sub>2</sub>/an (Austin et al., 2020 ; Roe et al., 2021). Cela nécessite un changement de l'utilisation du territoire, au détriment des pâturages et des cultures ou une densification de l'habitat et une diminution des surfaces imperméables.

Pour l'estimation des autres types de sous-potentiels dans la forêt suisse, il manque jusqu'à présent une valeur de référence chiffrant l'absorption de CO<sub>2</sub> par la forêt suisse si elle était restée intacte. Par conséquent, l'absorption réelle de CO<sub>2</sub> par la forêt suisse est donc prise

comme première estimation. Comme seule la différence entre l'absorption réelle de CO<sub>2</sub> et la valeur de référence pourrait être prise en compte en tant que méthode CDR, la présente approximation conduit à une surestimation du potentiel technique CDR réel.

La forêt suisse a extrait en moyenne 12,9 MtCO<sub>2</sub>-eq/an sur la période 2010-2019 (OFEV, 2021a). Selon des simulations effectuées à l'aide d'un modèle de développement forestier, cette quantité peut être temporairement augmentée de 2,4 MtCO<sub>2</sub>-eq/an pour atteindre 15,3 MtCO<sub>2</sub>-eq/an grâce à une gestion forestière optimisée sur le plan climatique (Taverna et al., 2007). Les changements du stock forestier existant représentent également un flux de carbone. Même après déduction des pertes naturelles, de la récolte et des résidus de coupe, le stock forestier peut encore augmenter ou diminuer. En plus, la biomasse laissée sur place contribue également au stockage de carbone dans les sols forestiers. Ainsi, au cours de la période 2010-2019, le bilan<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> moyen entre perte et absorption de CO<sub>2</sub> dans la forêt suisse était de 2,7 MtCO<sub>2</sub>-eq/an (OFEV, 2021a). Finalement, le potentiel technique de récolte de bois en Suisse varie en fonction de la gestion forestière et est estimé jusqu'à 8,5 millions de mètres cube de bois fort en cas de forte demande en bois (Stadelmann et al., 2016), ce qui correspond à environ 7,8 MtCO<sub>2</sub>-eq/an.<sup>2</sup> Grâce à une utilisation en cascade prononcée, par exemple dans la construction et l'aménagement des bâtiments, dans les produits en bois ou le papier/carton, le CO<sub>2</sub> précédemment éliminé peut rester stocké pendant l'utilisation matérielle du bois. Après l'utilisation matérielle, la biomasse ligneuse doit être utilisée comme matière première pour l'exploitation de la bioénergie avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (ou pour le stockage de charbon végétal) afin que le CO<sub>2</sub> reste stocké pendant une période suffisamment longue du point de vue du climat.

En raison de divers facteurs d'influence, il faut partir du principe que le potentiel réalisable d'afforestation, de reboisement et de gestion forestière optimisée sur le plan climatique est inférieur au potentiel technique chiffré pour les raisons suivantes:

- Une valeur de référence (faisant l'hypothèse d'une forêt naturelle) n'est pas encore disponible pour la forêt suisse.
- Une modification de l'utilisation des sols en faveur de surfaces forestières supplémentaires est limitée par des conflits d'objectifs au niveau de la société.
- L'exploitation du bois entraîne une évacuation constante des substances nutritives de la forêt. En laissant les rémanents de coupe ou les résidus de récolte dans la forêt, la perte de nutriments est réduite, car la plupart des nutriments se trouvent dans les branches, les feuilles et l'écorce. La perte n'est toutefois pas stoppée. A long terme, un déficit en nutriments peut avoir des effets négatifs sur les écosystèmes ainsi que sur la croissance de la forêt.
- La réalisation du potentiel d'exploitation du bois en terrain montagneux est complexe et par conséquent plus coûteuse que l'exploitation du bois en plaine. A court et moyen terme, la récolte de bois en terrain montagneux génère également plus d'émissions de gaz à effet de serre qu'en plaine. Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'exploitation n'ont pas été chiffrées dans la présente étude.

---

<sup>1</sup> "Le bilan de CO<sub>2</sub> de la forêt se compose de l'absorption de CO<sub>2</sub> résultant de la croissance des arbres, des modifications du carbone stocké dans la litière, le sol et le bois mort, moins les pertes dues à l'exploitation forestière et aux départs naturels (arbres morts)" (OFEV, 2021b).

<sup>2</sup> Hypothèse simplifiée basée sur Taverna et al. (2007) : 1 m<sup>3</sup> de bois fort pèse environ 0,5 t, dont 50% de carbone. Stocker 1 t de carbone correspond à 3.67 t de CO<sub>2</sub>. Ainsi, 1 m<sup>3</sup> de bois fort stocke environ 0,917 tCO<sub>2</sub>.



- Le bois-énergie ainsi que les déchets de bois après une utilisation en cascade devraient être utilisés à des fins énergétiques de manière à ce que le CO<sub>2</sub> stocké dans la biomasse ligneuse reste durablement stocké sous une autre forme. Pour les petits chauffages, comme les cheminées ou les chauffages à pellets, cela n'est guère possible techniquement dans un avenir prévisible. Pour réaliser le potentiel maximal, les petits chauffages ne devraient donc plus être exploités. Pour les chauffages de taille moyenne, comme les centrales thermiques, la production et le stockage de charbon végétal offrent une possibilité de stocker partiellement à long terme le CO<sub>2</sub> absorbé par la biomasse (voir ci-dessous), mais avec pour conséquence une production réduite d'énergie thermique. La rentabilité de telles installations pourrait donc être inférieure à celle des centrales thermiques conventionnelles. Les grandes installations devraient être systématiquement exploitées avec le CCS (cf. BECCS ci-dessous).
- L'influence du changement climatique sur la végétation est incertaine. Une sécheresse persistante, des incendies ou des événements extrêmes de plus en plus fréquents pourraient décimer les stocks de carbone dans les forêts.

### Coûts

Les coûts d'afforestation ou du reboisement sont estimés globalement entre 0 et 240 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq (Smith et al., 2016 ; Fuss et al., 2018). Les coûts estimés de la récolte de bois en Suisse varient en fonction de l'utilisation du bois, de la situation géographique et de la période. Pour la période 2027-2056, on estime que 4,3 millions de m<sup>3</sup> de bois fort par an (3,9 MtCO<sub>2</sub>-eq/an) pourraient être récoltés pour moins de 87 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq, 3,4 millions de m<sup>3</sup> de bois derby par an (3,1 MtCO<sub>2</sub>-eq/an) pour 87 à 164 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq et 1,4 million de m<sup>3</sup> de bois derby par an (1,3 MtCO<sub>2</sub>-eq/an) pour plus de 164 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq (Stadelmann et al., 2016). La gestion des forêts entraîne encore des coûts supplémentaires.

## Utilisation de la bioénergie avec captage et stockage du CO<sub>2</sub>

Dans le cas de l'utilisation de la bioénergie avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (en anglais, BECCS), la biomasse ligneuse et non ligneuse est utilisée à des fins énergétiques, puis le CO<sub>2</sub> issu des gaz de combustion est capturé et stocké au moyen de méthodes CCS. Parmi les exemples de BECCS, on peut citer l'incinération de déchets végétaux dans des usines de traitement des ordures ménagères avec CCS, le traitement du biogaz suivi d'un stockage du CO<sub>2</sub> capturé, la combustion de biogaz ou de combustibles non fossiles dans des centrales à gaz avec CCS ou la combustion de bois usagé dans des cimenteries avec CCS.

### Potentiel CDR

Le potentiel des BECCS en Suisse dépend en premier lieu du potentiel de biomasse pour l'utilisation énergétique ainsi que de possibilités de stockage appropriées pour le CO<sub>2</sub> capté. Thees et al. (2017) ont estimé le potentiel de biomasse durablement réalisable pour l'utilisation énergétique en Suisse à 97 PJ par an. L'étude a également pris en compte des facteurs économiques. La combustion de cette biomasse libérerait 12,0 MtCO<sub>2</sub>/an, dont 49% proviendraient de la biomasse ligneuse (voir l'annexe A1 pour les détails du calcul). Les installations de capture du CO<sub>2</sub> (post-combustion) sont généralement efficaces à 90% et plus, les coûts augmentant avec le taux de capture du CO<sub>2</sub> (Brandl et al., 2021). Ainsi, le potentiel technique des BECCS serait de 10,8 MtCO<sub>2</sub>/an, dont 5,3 MtCO<sub>2</sub>/an proviendraient de la biomasse ligneuse.

Pour réaliser l'ensemble du potentiel CDR des BECCS, il faudrait que toute la biomasse utilisée à des fins énergétiques soit brûlée de manière à ce que le CO<sub>2</sub> produit par la combustion soit capté et stocké à long terme. Cela exclurait probablement l'utilisation énergétique de la biomasse comme le bois ou le biogaz dans des installations plus petites, comme celles des ménages ou des véhicules. Le potentiel réalisable est ainsi réduit si les petites installations sont exploitées sans CCS et si seules les grandes installations sont exploitées en BECCS : Rosa et al. (2021) ont estimé à 2,0 MtCO<sub>2</sub>/an le potentiel technique pour les BECCS en équipant de CCS les usines de cellulose et de papier existantes, les stations d'épuration des eaux usées, les installations alimentées en biomasse et les usines de traitement des ordures ménagères en Suisse. Ont été prises en compte les installations qui ont émis au moins 0,1 MtCO<sub>2</sub> en 2018. Les usines de traitement des ordures ménagères suisses ont enregistré une tendance continue à brûler toujours plus de biomasse : En 2010 et 2019 respectivement, 31% et 50% de biomasse en plus ont été incinérés par rapport à l'année 2000 (toujours par rapport au pouvoir calorifique; OFEV 2021a). En 2019, la combustion de biomasse dans les usines suisses de traitement des déchets a entraîné des émissions de CO<sub>2</sub> de 2,3 MtCO<sub>2</sub>/an (OFEV 2021a). Une application complète du CCS dans les usines suisses de traitement des déchets ne conduirait donc pas seulement à des CDR, mais réduirait aussi fortement les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'incinération des déchets fossiles, qui s'élevaient à 2,1 MtCO<sub>2</sub>/an en 2019 (OFEV 2021a). D'un point de vue technique, il serait possible d'appliquer le CCS à toutes les installations si l'on dispose de suffisamment d'espace, d'une source de chaleur appropriée et d'une possibilité de transport ou de stockage du CO<sub>2</sub> capté. Comme l'expliquent Rosa et al. (2021), la rentabilité des petites installations devient toutefois plus difficile. Pour les cimenteries suisses également, le CCS pourrait, d'une part, réduire fortement les émissions de CO<sub>2</sub> fossile ou géogène et, d'autre part, conduire à des CDR grâce à l'utilisation de la biomasse comme combustible. L'Association suisse de l'industrie du ciment prévoit que les cimenteries suisses équipées de BECCS conduiront à des CDR de l'ordre de 0,3 MtCO<sub>2</sub>/an en 2050 (Cemsuisse, 2021). De manière générale, en ce qui concerne les BECCS, le stockage géologique du CO<sub>2</sub> au sein de la Suisse n'est pas encore suffisamment clarifié (voir ci-dessous).

### Coûts

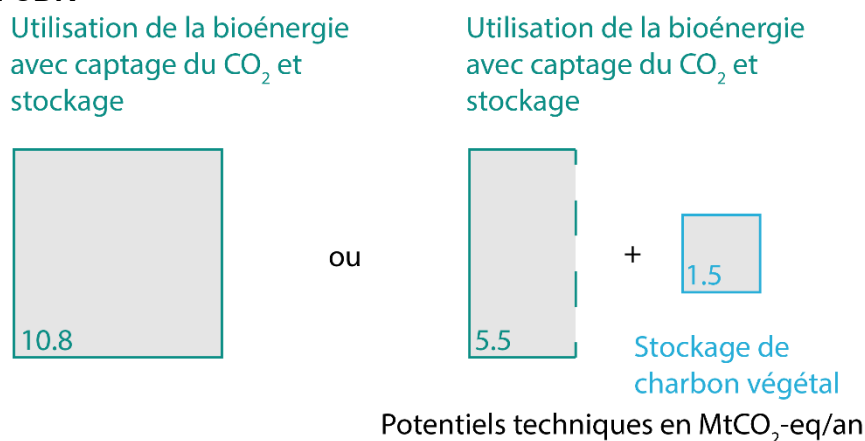
Les coûts des BECCS varient en fonction du type d'installation de valorisation de la bioénergie. Pour les installations suisses de valorisation des déchets avec CCS, les coûts initiaux sont estimés à 156-190 CHF/tCO<sub>2</sub> (transport et stockage inclus). Transport et stockage exclus, on estime que le captage et la compression du CO<sub>2</sub> coûtent 45-51 CHF/tCO<sub>2</sub> lors de la première mise en œuvre et 32-46 CHF/tCO<sub>2</sub> à l'avenir (Eckle et al., 2021). A l'avenir, on peut s'attendre à une raréfaction de la ressource en biomasse, ce qui pourrait entraîner une augmentation des coûts.

### Apport de charbon végétal

Le charbon végétal (biochar) est produit par la pyrolyse de la biomasse végétale. La pyrolyse a lieu entre 450-750°C dans un environnement pauvre en oxygène, et environ 20-50% du CO<sub>2</sub> que la biomasse a auparavant éliminé de l'atmosphère reste stocké pendant des siècles, voire plusieurs millénaires (par ex. Schmidt et al., 2021). Le charbon végétal peut être introduit dans les sols ou les matériaux de construction, où le carbone qu'il contient ne se dégrade que lentement. Une installation de pyrolyse peut fournir de la chaleur et,

selon l'installation, de l'électricité. Le rendement énergétique est toutefois inférieur à celui offert par une combustion complète de la biomasse végétale. Une température de pyrolyse plus élevée entraîne généralement un stockage de carbone plus stable mais dans ce cas, le potentiel CDR diminue, car une plus petite partie du carbone initial de la biomasse reste dans le charbon végétal (Lehmann et al., 2021). Des procédés adaptés et un choix sélectif de la biomasse évitent, lors de la fabrication du charbon végétal, une éventuelle pollution du charbon végétal par des substances nocives.

### Potentiel CDR



**Figure 4** : Le BECCS et la production de charbon végétal sont en concurrence pour la même biomasse en tant que matière première. Potentiels techniques en MtCO<sub>2</sub>-eq/an.

La même biomasse que celle utilisée pour les BECCS peut en partie être utilisée comme matière première pour la production de charbon végétal (cf. fig. 4). Schmidt et al. (2021) estiment, sur la base du potentiel de biomasse pour l'utilisation énergétique en Suisse de Thees et al. (2017), un potentiel technique CDR de 1,5 MtCO<sub>2</sub>-eq/an pour la production et le stockage de charbon végétal dans les sols, ce qui permettrait d'utiliser 49% de la biomasse durablement disponible. Si la biomasse restante était utilisée pour les BECCS, le potentiel CDR pour les BECCS (en complément du charbon végétal) serait de 5,5 MtCO<sub>2</sub>/an. Les installations de pyrolyse sont typiquement plus petites que les installations avec CCS. De ce fait, les installations de pyrolyse conviennent par exemple pour remplacer les centrales thermiques à bois conventionnelles existantes. Le rendement plus faible et, par conséquent, la consommation de combustible plus élevée par rapport aux centrales de chauffage au bois existantes constituent néanmoins un obstacle potentiel, étant donné que la combustion est délibérément incomplète. Pour les petits foyers, comme les cheminées ou les chauffages à pellets, les installations de pyrolyse correspondantes font encore défaut. En l'absence de telles installations, le potentiel maximal ne peut pas être atteint.

### Coûts

Les coûts de stockage du charbon végétal (y compris la production du charbon végétal) sont estimés globalement à 9-320 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq (10-345 USD/tCO<sub>2</sub>-eq ; IPCC, 2022). Les estimations de coûts se réfèrent souvent à la biomasse ligneuse comme matériau de base. Étant donné que la disponibilité de la biomasse ligneuse comme matériau de base est plus limitée en Suisse que dans d'autres États, on peut partir du principe que la limite inférieure des coûts n'est probablement pas réaliste pour le stockage de charbon végétal en Suisse.

## Séquestration du carbone dans le sol

La séquestration du carbone dans le sol (SCS) consiste à modifier les pratiques de gestion des terres afin d'établir un nouvel équilibre supérieur du carbone dans le sol, l'accumulation temporaire de carbone dans le sol entraînant une élimination nette du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. L'apport de carbone organique est augmenté et sa dégradation est réduite. Cela peut être réalisé, par exemple, par une modification de la rotation des cultures, des cultures intermédiaires, un labour profond, etc. Néanmoins, la séquestration réalisée est potentiellement perdue si les pratiques de gestion favorables sont un jour abandonnées. Elle n'est donc permanente que si les pratiques de gestion sont maintenues indéfiniment. Grâce au postulat Bourgeois ([19.3639](#)), un rapport sur la séquestration du carbone dans les sols est actuellement en cours d'élaboration.

### Potentiel CDR

De manière générale, les estimations du potentiel CDR des SCS sont très incertaines et la quantité de CO<sub>2</sub> retirée diminue avec le temps, car la différence avec le nouvel état d'équilibre se réduit de plus en plus. Lee et al. (2020) chiffrent, selon les mesures, que le carbone du sol pourrait être reconstitué chaque année de 0,4 à 1,8 tCO<sub>2</sub>-eq/ha, ce qui correspondrait pour toutes les terres arables en Suisse à un potentiel technique CDR de 0,17 - 0,77 MtCO<sub>2</sub>/an pour les SCS jusqu'à ce que le nouvel équilibre du carbone du sol soit atteint<sup>3</sup>. Cependant, cette étude a été critiquée pour des pertes en carbone trop importantes dans le calcul de la valeur de référence, ce qui rend le potentiel probablement trop élevé (Nesme et al., 2020).

Pour le canton de Fribourg, Guillaume et al. (2022) ont estimé qu'une part plus importante de prairies temporaires dans la rotation des cultures pouvait générer une accumulation de 0,85 MtC (total cumulé, à répartir sur le temps nécessaire pour atteindre le nouvel équilibre). Il pourrait s'écouler plus d'un siècle avant que ce nouvel équilibre ne soit atteint, les taux d'accumulation de carbone du sol les plus élevés se produisant au début (Poeplau et al., 2011 ; Smith, 2014).

Sur la base de modèles globaux, le potentiel technique du SCS sur les sols des prairies permanentes suisses est estimé à 0,65 MtCO<sub>2</sub>-eq/an (Soils Revealed, 2020 ; Roe et al., 2021).

### Coûts

Les coûts des SCS sont estimés globalement entre -42 et 93 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq (-45 à 100 USD/tCO<sub>2</sub>-eq ; Smith et al., 2016 ; Fuss et al., 2018 ; NASEM, 2019).

## Altération accélérée des roches siliceuses

Les roches siliceuses riches en calcium et en magnésium s'altèrent et fixent ainsi le CO<sub>2</sub>. L'altération accélérée des roches siliceuses (Enhanced Silicate Rock Weathering, ERW) consiste à accélérer ce processus naturel très lent, par exemple en broyant la roche et en augmentant ainsi la surface exposée à l'air libre, puis en l'épandant sur les sols.

### Potentiel CDR

Le potentiel CDR des ERW dépend de certaines grandeurs telles que la nature du sol (par ex. pH), l'activité biologique (champignons, bactéries, faune, flore), le type et la taille des particules de roche, le taux d'application ainsi que les conditions climatiques (par ex.

température et humidité). Beerling et al. (2020) ont estimé le potentiel technique CDR pour les terres arables en Allemagne, en France et en Italie à l'équivalent de 6,1 tCO<sub>2</sub>/ha par an en moyenne (4,1 et 8,0 tCO<sub>2</sub>/ha par an respectivement pour une altération lente et rapide). Pour les terres arables suisses, cela correspondrait à un potentiel technique CDR de 2,3 MtCO<sub>2</sub>/an<sup>3</sup> (1,6 et 3,1 MtCO<sub>2</sub>/an respectivement pour une altération lente et rapide). Outre les terres arables, les ERW peuvent également être appliqués aux pâturages, aux prairies (p. ex. Groll et al., 2021 ; Hagens et al., 2021) et aux forêts (p. ex. Taylor et al., 2021), ce qui augmente le potentiel technique de CDR des ERW d'environ 10 MtCO<sub>2</sub>/an supplémentaires, selon les estimations. Des essais sur le terrain et des simulations spécifiques avec un modèle de surface terrestre sont nécessaires pour déterminer plus précisément le potentiel technique CDR des ERW. Il n'est pas encore définitivement établi si des roches appropriées pour les ERW sont présentes en Suisse.

### Coûts

Beerling et al. (2020) estiment globalement les coûts des ERW pour les terres arables à 80-180 USD/tCO<sub>2</sub> (74-166 CHF/tCO<sub>2</sub> y compris le transport des roches depuis l'étranger).

## Extraction directe du CO<sub>2</sub> ambiant et stockage

Direct Air Capture and Storage (DACs) est une méthode CDR permettant d'extraire le CO<sub>2</sub> directement de l'atmosphère grâce à des processus industriels spécialement conçus à cet effet, puis de stocker le CO<sub>2</sub> de manière permanente.

### Potentiel CDR

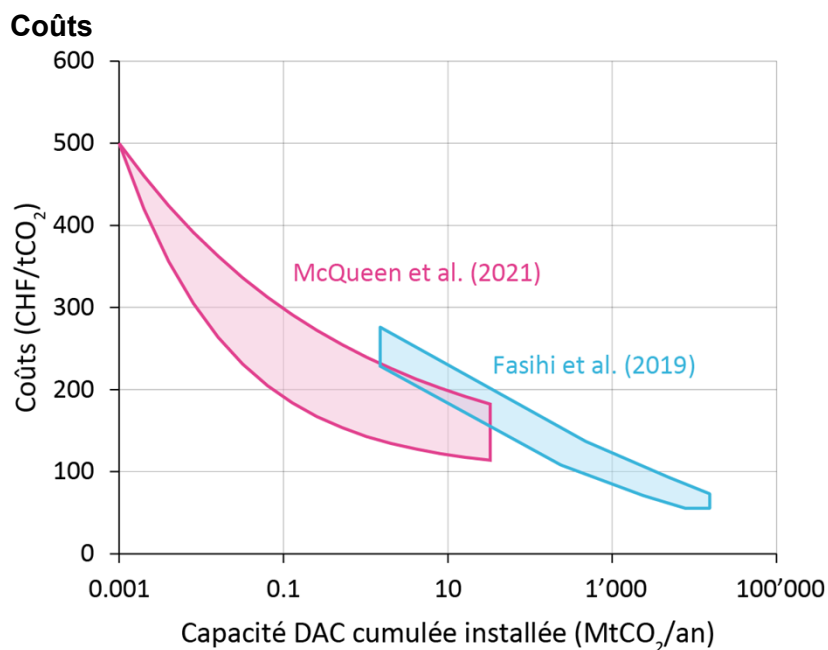
Le potentiel technique CDR des DACs est principalement limité par trois facteurs externes (McQueen et al., 2021 ; Erans et al., 2022) : (1) le potentiel inutilisé ou excédentaire d'énergie électrique, (2) le potentiel inutilisé ou excédentaire d'énergie thermique ainsi que son niveau de température et (3), les possibilités de stockage du CO<sub>2</sub> extrait. Les exigences en matière d'énergie électrique et thermique nécessaires varient en fonction du processus DAC (par exemple, Erans et al., 2022). Par exemple, les processus DAC électrochimiques ne dépendent que du premier et du troisième facteur et ne nécessitent pas d'énergie thermique. Wohland et al. (2018) ont estimé le potentiel technique CDR des DAC fonctionnant avec de l'électricité renouvelable excédentaire en Europe à 500 MtCO<sub>2</sub>/an. Les auteurs n'ont pas connaissance d'une étude chiffrant un potentiel pour les DACs spécifiquement en Suisse. Périodiquement, il peut y avoir en Suisse de l'énergie électrique (par exemple Kemmler et al., 2021a) et thermique excédentaire, la réalisation du potentiel jusqu'ici inexploité pour les énergies renouvelables et les sources de chaleur faisant peu de progrès. Il existe toutefois toute une série d'autres objectifs et d'applications sociétaux pour lesquels l'énergie excédentaire ou nouvellement exploitée pourrait être utilisée, par exemple pour réduire les émissions dans d'autres applications, pour le commerce international de l'électricité ou pour la production de combustibles et de carburants synthétiques. La question de savoir si l'énergie excédentaire suisse devrait être utilisée pour le DACs, et dans quelle proportion, reste ouverte. Des travaux de recherche sont actuellement en cours à ce sujet

---

<sup>3</sup> Surfaces en Suisse (OFS, 2021) : Surfaces arables 388'383 ha ; prairies naturelles et pâturages domestiques 512'788 ha, respectivement pour la période 2013-2018. Surfaces forestières : 730'960 ha dans les régions économiques IFN 1,2,3,4,5,6,7,8 et 14, respectivement sans les surfaces de réserve (IFN, 2015 ; Thees et al., 2017, p. 42 & 45). Surfaces arables du canton de Fribourg 75'657 ha (Guillaume et al., 2022).

## Potentiel et coût de l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en Suisse

(par ex. SWEET DeCarbCH WP12.4). L'exploitation d'éventuels réservoirs de stockage géologiques en Suisse prendrait probablement des décennies (voir ci-dessous), et les coûts de l'énergie seraient parfois nettement plus élevés qu'à l'étranger, où se trouvent éventuellement des possibilités de stockage appropriées.



**Figure 5** : Die von Fasihi et al. (2019) und McQueen et al. (2021) geschätzte DAC-Kostenentwicklung im Bezug zur global kumulativ installierten DAC-Kapazität.

Avec 28-926 CHF/tCO<sub>2</sub> (30-1000 USD/tCO<sub>2</sub>), les estimations globales des coûts du DAC varient fortement dans la littérature scientifique (par exemple Keith et al., 2018 ; Krekel et al., 2018 ; Fasihi et al., 2019 ; NASEM, 2019 ; Voskian et Hatton, 2019 ; McQueen et al., 2021 ; Kahsar et al., 2022). Les facteurs d'influence sont les processus DAC utilisés, l'emplacement, l'origine de l'énergie électrique et thermique ainsi que les effets d'échelle. La plupart du temps, on s'attend à ce que les coûts diminuent avec l'augmentation de la capacité cumulée installée (voir figure 5) : par exemple, McQueen et al. (2021) prévoit un taux d'apprentissage de 10-20% et Fasihi et al. (2019) de 10-15%, ce qui correspond à une fourchette de coûts de 120-230 CHF/tCO<sub>2</sub> à partir d'une capacité cumulée d'environ 10 MtCO<sub>2</sub>/an (stockage et transport non compris).



# Potentiel et coût du stockage et du transport du CO<sub>2</sub>

## Stockage géologique du CO<sub>2</sub>

Les aquifères salins profonds et les bassins sédimentaires, les gisements de pétrole, de gaz naturel ou de CO<sub>2</sub> épuisés ou les couches de roches réactives conviennent au stockage géologique des émissions capturées ou du CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère. Le stockage géologique dans des couches de roches réactives conduit à un stockage permanent du CO<sub>2</sub>, tandis que les autres méthodes de stockage géologique conduisent à un stockage quasi permanent.

### Potentiel

Le potentiel théorique de stockage géologique du CO<sub>2</sub> en Suisse n'est actuellement pas encore suffisamment clarifié. Chevalier et al. (2010) ont estimé pour la première fois grossièrement le potentiel théorique effectif dans des aquifères salins de plus de 800 m de profondeur à 2'680 MtCO<sub>2</sub>. Les aquifères du Muschelkalk contribuaient à hauteur de 708 MtCO<sub>2</sub> au potentiel total. Sur la base de nouvelles données, le potentiel théorique dans le Muschelkalk est actuellement estimé à 52 MtCO<sub>2</sub> (Diamond, 2019 ; Giardini et al., 2021). La réduction du potentiel estimé dans le Muschelkalk ne permet toutefois pas de conclure à une modification des potentiels des aquifères salins restants. Les estimations actuelles sont donc encore très incertaines, mais devraient être clarifiées plus précisément dans les années à venir sur la base de la motion [20.4063](#). En Europe, le potentiel technique de stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans les aquifères et les bassins sédimentaires est estimé à 232'000-2'120'000 MtCO<sub>2</sub> (Consoli and Wildgust, 2017 ; Kearns et al., 2017). À titre de comparaison, on suppose globalement que la CDR sera exploitée à hauteur de 6'400 MtCO<sub>2</sub>/an en 2050 (médiane de la catégorie de scénarios C1; GIEC, 2022). Le potentiel dans les couches rocheuses réactives devrait être encore plus important, puisque rien que pour l'Islande, on estime le potentiel technique à 60'000-7'000'000 MtCO<sub>2</sub> (Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016). D'autres couches rocheuses appropriées présentant des conditions réactives proches de la Suisse sont supposées se trouver en Norvège, en Turquie, en Bosnie-Herzégovine, en Croatie, en Grèce, en Italie, en Espagne ainsi qu'en Allemagne (Pilorgé et al., 2021, ainsi que les sources qui y sont mentionnées).

### Coûts

Le coût du stockage dans les aquifères salins est estimé à 6-19 CHF/tCO<sub>2</sub> (7-20 USD/tCO<sub>2</sub>; DOE, 2014; NASEM, 2019) et à 2-23 CHF/tCO<sub>2</sub> (2-25 USD/tCO<sub>2</sub>) dans les couches de roches réactives (Gunnarsson et al., 2018 ; Carbfix, 2021).

## Stockage de CO<sub>2</sub> dans le béton recyclé

Lorsque le béton recyclé entre en contact avec du CO<sub>2</sub>, cela entraîne une minéralisation du CO<sub>2</sub> dans le béton, qui fixe le CO<sub>2</sub> chimiquement sous forme de carbonates. La minéralisation du CO<sub>2</sub> est une méthode de stockage permanente.

### Potentiel

Le potentiel technique de stockage de CO<sub>2</sub> dans le béton recyclé en Suisse est estimé à 0,56 MtCO<sub>2</sub>/an en 2050 (Tiefenthaler et al., 2021).

### Coûts

Les auteurs n'ont pas connaissance d'estimations de coûts dans la littérature scientifique concernant le stockage du CO<sub>2</sub> dans du béton recyclé<sup>4</sup>. Un fournisseur suisse de cette méthode de stockage estime les coûts à 200-700 USD/tCO<sub>2</sub>, ces coûts comprenant également le captage, la liquéfaction et le transport du CO<sub>2</sub> provenant du biogaz (Stripe, 2021).

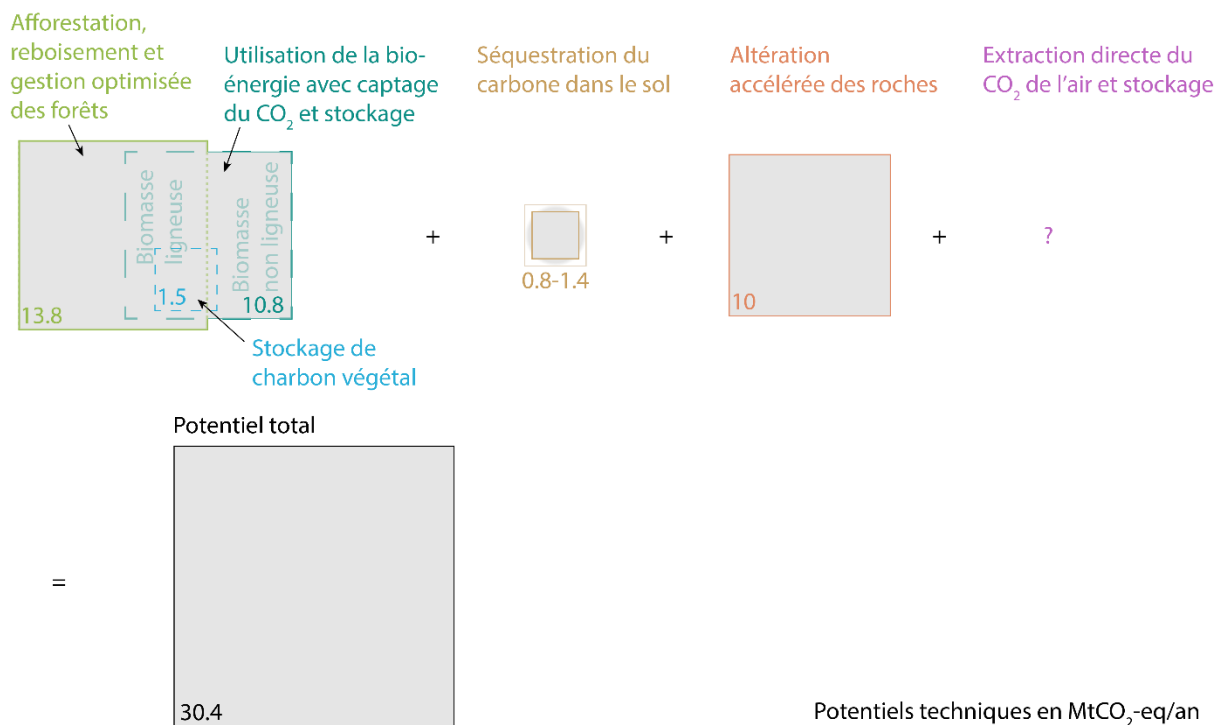
## Transport du CO<sub>2</sub>

La plupart du temps, il est nécessaire de transporter le CO<sub>2</sub> du lieu d'extraction, ou de captage, au lieu de stockage. Eckle et al. (2021) ont étudié comment le transport du CO<sub>2</sub> depuis la Suisse vers un stockage géologique en Norvège pourrait être organisé. Différents moyens sont proposés, en fonction de la quantité de CO<sub>2</sub> à stocker chaque année (Eckle et al., 2021) : Pour des quantités allant jusqu'à 100 000 tCO<sub>2</sub>/an, il est proposé que le CO<sub>2</sub> soit transporté par une combinaison de camions, d'un pipeline court et d'un train jusqu'à Rotterdam, où il est ensuite acheminé par bateau jusqu'au hub de CO<sub>2</sub> du projet [Northern Lights](#). Le coût du transport sans stockage intermédiaire est estimé à 78 CHF/tCO<sub>2</sub>. Pour les quantités moyennes ou importantes de CO<sub>2</sub> à transporter, un transport par pipeline est proposé. Les coûts de transport, y compris la pressurisation du CO<sub>2</sub>, sont estimés à 23-29 CHF/tCO<sub>2</sub> (Eckle et al., 2021). Une autre étude de Maggiore et al. (2021) a examiné un réseau de collecte et de transport de CO<sub>2</sub> provenant de 32 sources ponctuelles en Suisse. Les investissements initiaux sont estimés à 2,8-3,2 mrd. CHF et les coûts d'exploitation s'élèvent à environ 210 millions de CHF par an, ce qui correspondrait à une combinaison d'environ 36 CHF/tCO<sub>2</sub> pour le transport depuis les sources ponctuelles jusqu'à la frontière suisse (Maggiore et al., 2021). L'étude de Eckle et al. a estimé ce coût à 8,20 CHF/tCO<sub>2</sub>. Comme pour le transport vers la Norvège, un transport vers des sites de stockage en Islande est envisageable. Cette chaîne de transport doit être quantifiée et démontrée dans le cadre du projet pilote [DemoUpCARMA](#).

---

<sup>4</sup> Il existe des estimations de coûts pour la carbonatation du béton pendant ou avant son utilisation dans l'élément de construction (p. ex. Strunge et al., 2022 ; Wang et al., 2022). Cela implique que des scories ou des roches silicatées soient incorporées dans le béton, ce qui augmente la capacité d'absorption de CO<sub>2</sub> du béton. Du fait qu'un tel béton frais absorberait plus de CO<sub>2</sub> qu'un béton recyclé datant de plusieurs décennies, les estimations de coûts pour la carbonatation du béton ne sont pas comparables à l'estimation des coûts pour le béton recyclé.

## Discussion et conclusion



**Figure 6** : Les potentiels techniques estimés des méthodes CDR prises en compte ainsi que le potentiel technique total en MtCO<sub>2</sub>-eq/an.

Le potentiel CDR technique total en Suisse, hors DACS, est estimé à 30 MtCO<sub>2</sub>-eq/an (cf. figure 6 et tableau 1). Étant donné que la biomasse ligneuse disponible peut être utilisée soit comme moyen de stockage dans des produits faits à partir de bois (avec captage et stockage des émissions en fin de vie), soit comme matière première dans le cadre du BECCS et de la production de charbon végétal, le potentiel technique total forêts+BECCS+biochar est forcément inférieur à la somme des potentiels techniques individuels. Alors que les potentiels techniques pour BECCS et pour le stockage de charbon végétal sont relativement robustes, il existe encore de grandes incertitudes pour l'afforestation, le reboisement et la gestion optimisée des forêts, ainsi pour les méthodes SCS et ERW. Un chiffrage des incertitudes n'est possible que pour certaines composantes et ne reflète que les résultats publiés dans différentes études. De même, le potentiel de stockage géologique en Suisse n'est pas encore suffisamment clarifié. Pour le DACS, aucune estimation du potentiel spécifique à la Suisse n'a été trouvée dans des publications scientifiques.

## Potentiel et coût de l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en Suisse

**Table 1** : Potentiels techniques estimés des méthodes CDR prises en compte en Suisse, comparaison avec des études antérieures (Beuttler et al., 2017 ; Kemmler et al., 2021b) et avec la quantité de CDR utilisée en 2050 dans le scénario "ZERO Basis" des Perspectives énergétiques 2050+ (EP2050+) (Kemmler et al., 2021b), ainsi qu'estimation des coûts. Les potentiels considérés de manière isolée utilisent en partie la même biomasse comme matière première, ce qui fait que le potentiel combiné est plus petit.

\* Aucune valeur publiée pour la composition du potentiel combiné.

\*\* Aucune valeur publiée.

\*\*\* Cumule les émissions de CO<sub>2</sub> évitées (par rapport au status quo) et le CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère.

	Cette étude		Beuttler et al., (2018)		EP2050+ Kemmler et al., (2021b)		Cette étude Coût (CHF/tCO <sub>2</sub> -eq)
	Le potentiel technique, considéré isolément (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	Potentiel technique combiné (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	Potentiel théorique isolé (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	Potentiel théorique combiné (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	Potentiel (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	Utilisé dans le scénario "ZERO Basis" (MtCO <sub>2</sub> -eq/an)	
Afforestation, reboisement et gestion forestière optimisée sur le plan climatique	13.8	13.8	3.1	*	2	0	0 - 240
Utilisation de la bioénergie avec Captage et stockage du CO <sub>2</sub> (BECCS)	10.8	5.5	5.1	*	**	2.04	156 -190
Dont issus de la biomasse ligneuse	5.3	0					
Dont issus de la biomasse non ligneuse	5.5	5.5					
Stockage de charbon végétal (biochar)	1.5	0.0	2.2	*	2.5***	0.01	9 - 320
Séquestration du carbone du sol (SCS)	0.8 - 1.4	1.1	3.6	*	**	0	-42 - 93
Altération accélérée des Roches de silicate (ERW)	10.0	10.0			**	0	80 - 180
Extraction directe du CO <sub>2</sub> de l'air et stockage (DACs)	?	?				0	28 - 926
<b>Total</b>		<b>30.4</b>		<b>6</b>			<b>-42 - 926</b>

Il reste à savoir quelle partie du potentiel technique pourra être réalisée de manière durable. En raison des aspects suivants, la quantité réalisable de CDR sera inférieure au potentiel technique indiqué ci-dessus :

- La réalisation du potentiel mentionné présuppose parfois d'importants changements de comportement, par exemple dans l'utilisation des sols ou dans la manière dont la biomasse est utilisée au sein de la société et de l'industrie sur le plan des matériaux et de l'énergie. En l'absence de ces changements, le total réalisable de CDR se réduit considérablement.
- La biomasse pour les BECCS et le charbon végétal peut également être utilisée à d'autres fins sans CDR, par exemple pour remplacer des matières premières fossiles ou des sources d'énergie. Le CO<sub>2</sub> capté peut également servir à la fabrication de matières premières auparavant basées sur le pétrole, comme les matières plastiques, les carburants et combustibles synthétiques ou les médicaments. Cela entraînerait une réduction correspondante de la quantité de CDR réalisée.
- Reste également à savoir dans quelle mesure la population et l'économie suisses sont prêtes à supporter les coûts des CDR. Dans la plupart des cas, une réduction des émissions de gaz à effet de serre sera une mesure plus avantageuse et

techniquement plus simple qu'une compensation des émissions de gaz à effet de serre par des CDR.

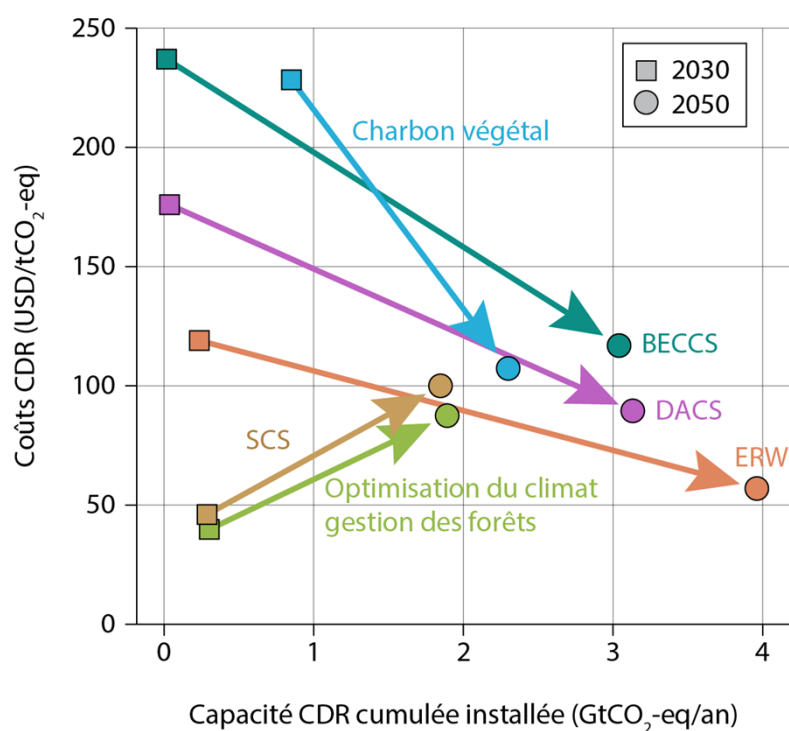
- Les potentiels chiffrés ne comprennent pas encore les éventuelles émissions de gaz à effet de serre générées par l'application de la méthode CDR concernée. Le montant net de CDR réalisé s'en trouvera donc réduit. Seule une analyse des émissions sur l'ensemble du cycle de vie permettra d'évaluer l'ampleur de cette réduction.
- Comme indiqué précédemment, les méthodes CDR comprennent "les activités humaines qui éliminent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le stockent de manière permanente dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques ou dans des produits" (GIEC, 2022). La durée du stockage "permanent" n'a pas encore été définie scientifiquement. Une fois que cela aura été défini, le potentiel des méthodes CDR avec une durée de stockage plus courte disparaîtra sans doute. Celles-ci peuvent toujours contribuer à extraire le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, mais elles devraient alors ré-extraire et stocker la partie non permanente de manière répétée.

Les premières estimations approximatives indiquent que le potentiel écologique des méthodes CDR devrait être environ deux fois plus faible que le potentiel technique, mais toutefois plus important que ce que l'on pensait jusqu'à présent. D'un point de vue économique, l'application de méthodes CDR n'entraîne pas seulement des coûts en Suisse, mais ouvre également la possibilité de participer à de nouveaux secteurs économiques locaux et mondiaux lucratifs ainsi que de réduire les coûts liés aux effets du changement climatique. Des simulations technico-économiques peuvent aider à évaluer également les potentiels économiques CDR, même si les incertitudes pour certaines méthodes de CDR devraient rester importantes en raison de leur échelle encore réduite. L'extraction effective de CO<sub>2</sub> d'ici 2030 ou 2050 dépendra de manière critique des conditions-cadres politico-économiques, d'une politique climatique nationale et internationale intersectorielle efficace, ainsi que du coût des technologies visant à éviter l'émission de gaz à effet de serre (motorisations alternatives, pompes à chaleur, carburants synthétiques, etc. Un dialogue actif et ouvert avec la population peut également contribuer à ce que l'objectif et le fonctionnement des méthodes CDR appliquées en Suisse soient compris et largement soutenus.

Dans une estimation antérieure du potentiel CDR en Suisse par Beuttler et al. (2019), le potentiel théorique total était estimé à environ 6 MtCO<sub>2</sub>-eq/an (voir tableau 1). Les différences avec la présente étude proviennent d'une part du fait que l'altération accélérée des roches et la récolte de bois n'ont pas été prises en compte par Beuttler et al. D'autre part, Beuttler et al. n'ont considéré pour les méthodes BECCS que la biomasse non utilisée jusqu'à présent pour une utilisation énergétique, telle qu'estimée par Thees et al. (2017) (poids sec d'environ 101'000 t/an), alors que la présente étude a également intégré la biomasse déjà utilisée (poids sec d'environ 246'000 t/an). Cette biomasse est actuellement en partie brûlée dans des usines de traitement des ordures ménagères ou des cimenteries. Le Conseil fédéral suisse ainsi que l'Association suisse de l'industrie du ciment prévoient d'équiper ces installations de CCS (Cemsuisse, 2021 ; Conseil fédéral, 2022), ce qui permettrait de réaliser le potentiel CDR pour la biomasse déjà utilisée.

Dans le cadre des perspectives énergétiques 2050+ (Kemmler et al., 2021a ; 2021b ; cf. tab. 1), le potentiel de la gestion forestière en Suisse a été estimé entre quelques centaines de milliers de tonnes jusqu'à un maximum de 2 MtCO<sub>2</sub>-eq/an, mais sans définir de quelle classe

de potentiel (technique, économique, etc.) il s'agit dans cette estimation. Il a également été estimé que la production de charbon végétal à partir d'un PJ de biomasse permettrait d'économiser plus de 40 ktCO<sub>2</sub>. Pour un potentiel annuel de biomasse de 63 PJ, cela correspondrait à 2,5 MtCO<sub>2</sub>/an. Toutefois, cette valeur combine les émissions de CO<sub>2</sub> évitées (par rapport au status quo) et le CO<sub>2</sub> extrait de l'atmosphère, or seul le CO<sub>2</sub> extrait peut être retenu comme méthode CDR dans la présente étude. En outre, le ciment est également discuté en tant que puits de CO<sub>2</sub> comme méthode CDR et le potentiel est estimé entre 1,1 et 2,5 MtCO<sub>2</sub>/an. Pour les ERW, seul un potentiel global est chiffré. Aucun potentiel n'est mentionné pour les BECCS et les DACS, bien que les scénarios des perspectives énergétiques 2050+ prévoient l'utilisation de CDR. Le scénario « ZERO Basic », par exemple, prévoit que les méthodes BECCS y contribuent à hauteur de 2,04 MtCO<sub>2</sub>/an et le charbon végétal à hauteur de 0,01 MtCO<sub>2</sub>/an (cf. tableau 17, Kemmler et al., 2021b). Pour que la Suisse atteigne l'objectif zéro émissions nettes en 2050, ce scénario prévoit aussi que 4,7 MtCO<sub>2</sub>/an soient extraites à l'étranger par DACS pour le compte de la Suisse.



**Figure 7** : Estimation de l'évolution globale des coûts entre 2030 et 2050 selon l'échelle d'application pour les méthodes CDR prises en compte. Figure adaptée de Kahsar et al. (2022).

Les coûts estimés pour les différentes méthodes CDR varient fortement au sein de la littérature étudiée, allant de -42 à 926 CHF/tCO<sub>2</sub>-eq. Les méthodes CDR plutôt avantageuses sont, du moins au début, la gestion forestière optimisée sur le plan climatique ainsi que le SCS. Grâce aux économies d'échelle, toutes les autres méthodes deviennent probablement moins chères à mesure que la capacité installée grandit. Kahsar et al. (2022) conclut que la variation entre les méthodes CDR prises en compte diminuera à l'avenir (cf. figure 7). De manière générale, les estimations de coûts pour l'avenir sont incertaines.



## Remerciements

Nous remercions l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour le mandat et en particulier la Dr Sophie Wenger, le Dr Martin Jiskra, la Dr Regine Röthlisberger ainsi que le Dr Reto Burkard pour l'accompagnement du projet. Nous remercions également Christian Bach, Dr Jannis Wernery de l'EMPA, Prof Dr André Bardow, Dr Viola Becattini, Nicoletta Brazzola, Marian Krüger, Dr Moritz Laub, Prof Dr Marco Mazzotti, Prof Dr Anthony Patt, Prof Dr Johan Six, Prof Dr Michael Stauffacher et Juanita von Rothkirch de l'ETH Zurich, Christian Bauer et Dr Alexander Muroyama du PSI, Dr Vanessa Burg, Lena Gubler et Dr Esther Thürig du WSL, Dr Nikolas Hagemann de l'Institut Ithaka, Dr Sonja G. Keel, Dr Jens Leifeld et Dr Chloé Wüst de l'Agroscope, Prof Dr Daniel Meier de la ZHAW ainsi que Dr Sascha Nick et Prof Dr Philippe Thalmann de l'EPFL pour leurs échanges et leur précieuse collaboration ainsi que Dr Vincent Humphrey pour son aide à la traduction. Enfin, nous remercions Christian Aebischer, Keith Anderson, Dr Michael Bock, Clémence Dirac Ramohavelo, Elena Havlicek, Marjo Kunnala, Dr Roger Ramer et Dr Nele Rogiers de l'OFEV ainsi que Dr Carina Alles, Dr Valentin Gischig, Dr Andreas Haselbacher, Dr Sandra Hermle, Christian Minnig, Denis Peytregnet et Jonathan Vouillamoz de l'Office fédéral de l'énergie pour leurs commentaires sur le projet de rapport.

## Glossaire

**Carbon Capture and Storage (CCS; IPCC, 2021)** : “Un procédé dans lequel dans lequel un courant relativement pur de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), habituellement de source industrielle, est purifié (capturé), conditionné, comprimé et transporté vers un lieu de stockage à long terme”. Les méthodes CCS permettent d'éviter des émissions de CO<sub>2</sub> mais pas nécessairement d'extraire du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, en particulier lorsque le CO<sub>2</sub> capturé provient de sources fossiles. En revanche, dans les méthodes BECCS par exemple, les procédés CCS sont utilisés pour capturer et stocker des émissions de CO<sub>2</sub> issues de sources renouvelables (comme le biogaz), dont la fabrication repose elle sur l'extraction de CO<sub>2</sub> atmosphérique (par la photosynthèse).

**Atténuation du changement climatique (UNFCCC, 2022)** : “Dans le contexte du changement climatique, une intervention humaine visant à réduire les sources ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre. Les exemples incluent l'utilisation plus efficace des combustibles fossiles pour les processus industriels ou la production d'électricité, le passage à l'énergie solaire ou à l'énergie éolienne, l'amélioration de l'isolation des bâtiments et l'expansion des forêts et autres "puits" pour extraire de plus grandes quantités de dioxyde de carbone de l'atmosphère.”

**Extraction du dioxyde de carbone / Carbon Dioxide Removal (CDR; IPCC, 2021)** : “Les activités humaines qui extraient le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère et le stockent durablement dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits. Cela comprend le renforcement des puits de CO<sub>2</sub> biologiques ou géochimiques et l'extraction et le stockage direct du CO<sub>2</sub> ambiant (DACs), mais exclut l'absorption naturelle de CO<sub>2</sub> qui n'est pas directement causée par les activités humaines.” Un effet indirect exclu serait par exemple l'absorption de CO<sub>2</sub> par les océans et les lacs résultant de l'augmentation

de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air. Les méthodes CDR sont synonyme d'émissions négatives de CO<sub>2</sub>.

**Puits** (IPCC, 2021) : "Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre (Article 1.8 de la CCNUCC (CCNUCC, 1992))." Un puits qui élimine de façon permanente le CO<sub>2</sub> par le biais d'activités humaines est considéré comme méthode CDR.

**Technologies d'émission négative (NET)** : Les technologies d'émission négative sont utilisées pour extraire le CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre de l'atmosphère. Voir aussi 'Extraction du dioxyde de carbone'. L'extraction de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> n'est pas abordée dans ce rapport.

**Émissions négatives de gaz à effet de serre** : Dans un système de référence donné, l'émission négative est le résultat d'une activité humaine qui a pour effet de retirer plus de gaz à effet de serre de l'atmosphère qu'elle n'en émet.

**Zéro émission nette, neutralité en matière de gaz à effet de serre** (IPCC, 2021) : "Condition dans laquelle les émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques pondérées par le système métrique sont équilibrées par les extractions de GES anthropiques pondérées par le système métrique sur une période donnée. La quantification des émissions nettes de GES nulles dépend de la mesure des émissions de GES choisie pour comparer les émissions et les extractions de différents gaz, ainsi que de l'horizon temporel choisi pour cette mesure.

Note 1 : La neutralité des GES et les émissions nettes de GES nulles sont des concepts qui se chevauchent. Le concept d'émissions nettes nulles de GES peut être appliqué à l'échelle mondiale ou inframondiale (par exemple, régionale, nationale et infranationale). À l'échelle mondiale, les termes "neutralité des GES" et "zéro émission nette de GES" sont équivalents. À l'échelle inframondiale, l'expression "émissions nettes de GES nulles" s'applique généralement aux émissions et aux extractions sous le contrôle direct ou la responsabilité territoriale de l'entité déclarante, tandis que l'expression "neutralité GES" englobe généralement les émissions anthropiques et les extractions anthropiques à l'intérieur et au-delà du contrôle direct ou de la responsabilité territoriale de l'entité déclarante. Les règles comptables spécifiées par les programmes ou les schémas relatifs aux GES peuvent avoir une influence significative sur la quantification des émissions et des extractions pertinentes.

Note 2 : En vertu du Manuel de Paris (Décision 18/CMA.1, annexe, paragraphe 37), les parties ont convenu d'utiliser les valeurs GWP100 du RE5 du GIEC ou les valeurs GWP100 d'un rapport d'évaluation ultérieur du GIEC pour déclarer les émissions et extractions globales de GES. En outre, les parties peuvent utiliser d'autres paramètres de mesure pour communiquer des informations supplémentaires sur les émissions et les extractions globales de GES.

**Séquestration** : Processus de stockage des gaz à effet de serre dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques ou dans des produits.

## Bibliographie

Austin, K. G., Baker, J. S., Sohngen, B. L., Wade, C. M., Daigneault, A., Ohrel, S. B., Ragnauth, S., & Bean, A. (2020). The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change. *Nature Communications*, 11(1), 5946.

<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19578-z>

Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et al. (2020). Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248.

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>

Beuttler, C., Keel, S. G., Leifeld, J., Schmid, M., Berta, N., Gutknecht, V., Wohlgemuth, N., Brodmann, U., Stadler, Z., Tinibaev, D., Wlodarczak, D., Honegger, M., & Stettler, C. (2019). 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.

Bowman G., L. Ayed und V. Burg: The role of anaerobic digestion in the circular economy: Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland, challenges and future perspectives. In preparation.

Brandl, P., Bui, M., Hallett, J. P., and Mac Dowell, N. (2021). Beyond 90 Possible, but at what cost?, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105, 103 239,

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103239>

Carbfix. (2021). Our Story. Carbfix. Last accessed: 8.8.2022. <https://www.carbfix.com/our-story>

Cemsuisse. (2021). Roadmap 2050: Klimaneutraler Zement als Ziel. Bern.

Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. (2010). Potential for deep geological sequestration of CO<sub>2</sub> in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J Geosci* 103, 427–455.

<https://doi.org/10.1007/s00015-010-0030-4>

Conseil fédéral. (2020). Von welcher Bedeutung könnten negative CO<sub>2</sub>-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018. Bern.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/62745.pdf>

Conseil fédéral. (2021). Langfristige Klimastrategie der Schweiz.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/65874.pdf>

Conseil fédéral. (2022). CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET): Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können. Bericht des Bundesrates. Bern.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/71551.pdf>

Consoli, C.P., Wildgust, N. (2017). Current Status of Global Storage Resources. Energy Procedia 114, 4623–4628. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1866>

Diamond, L. (2019). Use hot water, store CO<sub>2</sub> – the potential deep beneath our feet. Last accessed: 8.8.2022. <https://nfp-energie.ch/en/projects/960/>

DOE. (2014). FE/NETL CO<sub>2</sub> Saline Storage Cost Model: Model Description and Baseline Results. Report No. DOE/NETL-2014/1659. Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, DOE.

Eckle P., Spokaite M., Krueger M. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant.

Erans, M., Sanz-Pérez, E. S., Hanak, D. P., Clulow, Z., Reiner, D. M., and Mutch, G. A. (2022). Direct air capture: process technology, technoeconomic and socio-political challenges, Energy Environ. Sci., 15, 1360–1405, <https://doi.org/10.1039/D1EE03523A>

Fasihi, M., Efimova, O., and Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants, Journal of Cleaner Production, 224, 957–980, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M., and Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects, Environmental Research Letters, 13, 063 002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

Giardini, D., Guidati, G. (eds.), Amann, F., Driesner, T., Gischig, V., Guglielmetti, L., Hertrich, M., Holliger, K., Krause, R., Laloui, L., Lateltin, O., Lecampion, L., Löw, S., Maurer, H., Mazzotti, M., Meier, P., Moscariello, A., Saar, M.O., Spada, M., Valley, B., & Zappone, A. (2021). Swiss Potential for Geothermal Energy and CO<sub>2</sub> Storage, Synthesis Report. ETH Zurich.

Guillaume, T., Makowski, D., Libohova, Z., Elfouki, S., Fontana, M., Leifeld, J., Bragazza, L., and Sinaj, S. (2022). Carbon storage in agricultural topsoils and subsoils is promoted by including temporary grasslands into the crop rotation, Geoderma, 422, 115 937, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115937>

Goll, D.S., Ciais, P., Amann, T. et al. (2021). Potential CO<sub>2</sub> removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. Nat. Geosci. 14, 545–549. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>

Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Oelkers, E. H., Clark, D. E., Þór Arnarson, M., Sigfússon, B., Snæbjörnsdóttir, S., Matter, J. M., Stute, M., Júlíusson, B. M., and Gíslason, S. R. (2018). The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site, International Journal of Greenhouse Gas Control, 79, 117–126, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>

Hagens M, Hoosbeek M, Smet I, Bijma J, Hartmann J, Steffens R & Paessler D. (2021). Quantifying CO<sub>2</sub> Removal Through Enhanced Weathering: Grassland and pot Experiments. <https://doi.org/10.7185/gold2021.5775>

IFN (2015). Schweizerisches Landesforstinventar: Waldflächen pro Kanton. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt.

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Kahsar et al. (2022). Kahsar Rudy, Guy Wohl, Charlie Bloch, and James Newcomb, Scoping the Potential Need for Direct Air Capture, RMI, 2022, <https://www.third-derivative.org/first-gigaton-captured#insight-brief-2>.

Kearns, J., Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Kheshgi, H., Chen, Y.-H.H., Paltsev, S., Herzog, H. (2017). Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO<sub>2</sub> Storage Capacity Worldwide. Energy Procedia 114, 4697–4709. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., and Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere, Joule, 2, 1573–1594, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Kemmler A., Kirchner a., Kreidelmeyer S., et al. (2021a). Energieperspektiven 2050+: Technischer Bericht. Herausgegeben durch Prognos AG, INFRAS AG, TEP Energy GmbH, Ecoplan AG. Im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE, Bern, Switzerland.

Kemmler A., Lübbers S., Ess F., Thormeyer Ch. und Althaus H. (2021b). Energieperspektiven 2050+: Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz. Herausgegeben durch Prognos AG, INFRAS AG, TEP Energy GmbH, Ecoplan AG. Im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE, Bern, Switzerland.

Krekel, D., Samsun, R. C., Peters, R., and Stolten, D. (2018). The separation of CO<sub>2</sub> from ambient air – A techno-economic assessment, AppliedEnergy, 218, 361–381, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.144>

Lamlom S.H. und R.A. Savidge. (2003). A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, (25) 4: 381-388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)

Lee, J., Necpálová, M., and Six, J. (2020). Biophysical potential of organic cropping practices as a sustainable alternative in Switzerland, *Agricultural Systems*, 181, 102 822, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102822>

Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A. et al. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 14, 883–892 . <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>

Matthews, D. H. (2010). Can carbon cycle geoengineering be a useful complement to ambitious climate mitigation? *Carbon Management*, 1:1, 135-144, <https://doi.org/10.4155/cmt.10.14>

Maggiore L., E. Bonato, A. Terenzi. (2021). CO<sub>2</sub>NET Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO<sub>2</sub> Sammel-Netzwerk in der Schweiz. Der Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA). <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47346>

McQueen, N., Gomes, K. V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., and Wilcox, J. (2021). A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future, *Progress in Energy*, 3, 032 001, <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>

Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., & del Mar Zamora Dominguez, M. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. In *Environmental Research Letters* (Vol. 13, Issue 6, p. 063001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>

NASEM. (2019). Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>.

Nesme, T., Barbieri, P., Gaudaré, U., Pellerin, S., and Angers, D. A. (2021). Sound methods are needed to assess GHG mitigation potential of organic farming deployment. A comment on Lee et al (2020), *Agricultural Systems*, 187, 102 994, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102994>

OFEV. (2021a). Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019: National Inventory Report. Including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of April 2021. Bundesamt für Umwelt, Bern.

OFEV (Hrsg.). (2021b). Jahrbuch Wald und Holz 2021. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2125: 103 S.



OFS. (2021). Arealstatistik (AREA). Bundesamt für Statistik.

Oreggioni, G.D., Gowreesunker, B.L., Tassou, S.A., Bianchi, G., Reilly, M., Kirby, M.E., Toop, T.A. und Theodorou, M.K. (2017). Potential for Energy Production from Farm Wastes Using Anaerobic Digestion in the UK: An Economic Comparison of Different Size Plants. *Energies*, 10, 1396. <https://doi.org/10.3390/en10091396>

Phyllis2. (2021). Database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar. TNO Biobased and Circular Technologies. Last accessed: 13.5.2022. <https://phyllis.nl/>

Pilorgé H., Kolosz B., Wu G. C., and Freeman J. (2021). Global Mapping of CDR Opportunities. CDR Primer, edited by J Wilcox, B Kolosz, J Freeman.

Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J. And Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17: 2415-2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J., Chapman, M., Daioglou, V., Deppermann, A., Doelman, J., Emmet-Booth, J., Engelmann, J., Fricko, O., Frischmann, C., Funk, J., Grassi, G., Griscom, B., Havlik, P., Hanssen, S., Humpenöder, F., Landholm, D., ... Lawrence, D. (2021). Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, 00, 1– 34. <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>

Rosa, L., Sanchez, D. L., and Mazzotti, M. (2021). Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe, *Energy Environ. Sci.*, 14, 3086–3097, <https://doi.org/10.1039/D1EE00642H>

Schmidt, H., Hagemann, N., Abächerli, F., Leifeld, J., & Bucheli Th. (2021). Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, (112). 2296-729X. <https://doi.org/10.34776/as112g>

Soils Revealed. (2020). Soils revealed. Last accessed 8.8.2022. <https://soilsrevealed.org/>

Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon?. *Glob Change Biol*, 20: 2708-2711. <https://doi.org/10.1111/gcb.12561>

Smith, P., Haszeldine, R. S., and Smith, S. M. (2016). Preliminary assessment of the potential for, and limitations to, terrestrial negative emission technologies in the UK, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 18, 1400–1405, <https://doi.org/10.1039/C6EM00386A>

Snæbjörnsdóttir, S. and Gislason, S. R. (2016). CO<sub>2</sub> Storage Potential of Basaltic Rocks Offshore Iceland, *Energy Procedia*, 86, 371–380, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.038>

Stadelmann G., A. Herold, M. Didion, B. Vidondo, A. Gomez, E. Thürig. (2016) Holzertepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 167 (3). 152–161. <https://doi.org/10.3188/szf.2016.0152>

Stripe. (2021). Application from Nuestartk - Stripe. Last accessed 8.8.2022. <https://github.com/stripe/carbon-removal-source-materials/blob/master/Project%20Applications/Spring2021/Nuestartk%20-%20Stripe%20Spring21%20CDR%20Purchase%20Application.pdf>

Strunge, T., Renforth, P. & Van der Spek, M. (2022). Towards a business case for CO<sub>2</sub> mineralisation in the cement industry. Commun Earth Environ 3, 59. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>

Taverna R., Hofer P., Werner F., Kaufmann E., Thürig E. (2007). CO<sub>2</sub>-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Umwelt-Wissen Nr. 0739. Bundesamt für Umwelt, Bern. 102 S. Daten zur Verfügung gestellt von Taverna R..

Taylor, L. L., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Rau, G. H., Blum, J. D., and Beerling, D. J. (2021). 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>

Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., & Lemm, R. (2017). Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung: Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, WSL Berichte, Heft 57.

Tiefenthaler J, Braune L, Bauer C, Sacchi R and Mazzotti M. (2021). Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector. Front. Clim. 3:729259. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.729259>

UNFCCC. (2022). UNFCCC Process: Glossary of climate change acronyms and terms. Last accessed 9.8.2022. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms>

Voskian, S., & Hatton, T. A. (2019). Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO<sub>2</sub> capture. Energy & Environmental Science, 12(12), 3530–3547. <https://doi.org/10.1039/c9ee02412c>

Wang, T., Yi, Z., Song, J., Zhao, C., Guo, R., and Gao, X. (2022). An industrial demonstration study on CO<sub>2</sub> mineralization curing for concrete, iScience, 25, 104 261, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104261>

Wohland, J., Witthaut, D., Schleussner, C.-F. (2018). Negative emission potential of Direct Air Capture powered by renewable excess electricity in Europe. Earth's Future, 6, 1380–1384. <https://doi.org/10.1029/2018EF000954>

## Annexe

### A1 Détails de l'estimation du potentiel CDR des BECCS

Le tableau A1 montre la quantité de CO<sub>2</sub> convertie contenue dans la biomasse durablement disponible pour une utilisation énergétique en Suisse et qui conduit à des CDR en cas d'utilisation énergétique avec CCS comme BECCS. Thees et al. (2017) ont évalué les potentiels de biomasse durablement réalisables pour une utilisation énergétique en Suisse. Dans ce cadre, une partie de la biomasse est directement utilisée à des fins énergétiques (biomasse ligneuse), tandis qu'une autre partie est partiellement transformée en biogaz. Tant le biogaz que le reste de la biomasse sont utilisés à des fins énergétiques (biomasse non ligneuse comme les sous-produits agricoles, les engrais de ferme, les déchets industriels organiques, les déchets organiques, les déchets verts et les boues d'épuration). La teneur en carbone de la biomasse sèche est estimée à 3,8 MtC/an à l'aide de valeurs issues de la littérature (sur la base de Lamlo et Savidge, 2003 ; Oreggioni et al., 2017 ; Phillis<sup>2</sup>, 2021 ; Bowman et al., in prep.) En supposant que chaque molécule de carbone transmise par la plante correspond à une molécule de CO<sub>2</sub> préalablement retirée de l'atmosphère, la biomasse contient 12,0 MtCO<sub>2</sub>-eq/an. Cette quantité serait réémise dans l'atmosphère en cas d'utilisation énergétique sans CCS. Si, lors de l'utilisation énergétique avec CCS, 90% du CO<sub>2</sub> est capturé et stocké de manière permanente, cela donne un potentiel technique CDR de 10,8 MtCO<sub>2</sub>/an pour BECCS.

# Potentiel et coût de l'extraction du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en Suisse

**Table A1** : La biomasse durablement disponible en Suisse pour une utilisation énergétique, la teneur estimée en carbone ainsi que la quantité convertie de CO<sub>2</sub> stockée que la biomasse a préalablement extrait de l'atmosphère.

		Source: Thees et al., 2017					C content (t <sub>C</sub> /t dw)	Source	C in biomass (Mt/Yr)	C in biogas (Mt/Yr)	CO <sub>2</sub> stored in biomass (Mt/Yr)
Feedstock	Sub-categories	Dry weight (t-tw)	Primary energy content (PJ)	Potential biomethane production (PJ)							
Woody	Forest wood*1	Hardwood (with bark)	1822650	26.1		0.48	Lamlom and Savidge	0.894	0.000	3.276	
		Softwood (with bark)	638880	16.1		0.51	Lamlom and Savidge	0.568	0.000	2.082	
	Wood from landscape maintenance*1	Residential area	305257	4.8				0.156	0.000	0.570	
		Road sides	61863	1.0		0.51	Bowman et al., in prep.	0.032	0.000	0.116	
		Agricultural area	56855	0.9		0.51	Bowman et al., in prep.	0.038	0.000	0.138	
		Groves and shrubberies	22800	0.4		0.51	Bowman et al., in prep.	0.029	0.000	0.106	
		Hedges	48633	0.8		0.51	Bowman et al., in prep.	0.012	0.000	0.043	
	Waste wood	Shore area	41272	0.6		0.51	Bowman et al., in prep.	0.025	0.000	0.091	
		Natural wood (only mechanically processed)	653676	11.7		0.51	Bowman et al., in prep.	0.021	0.000	0.077	
	Non-woody	Agricultural crop by-products	Glued, painted, laminated, varnished wood	152415	2.7		0.51	Bowman et al., in prep.	0.333	0.000	1.222
Halogen-organic compounds (e.g. plated with PVC)			338199	6.0		0.51	Bowman et al., in prep.	0.078	0.000	0.285	
Wood residues		Treated with wood preservatives (Railway sleepers, electric poles, etc.)	100303	1.8		0.51	Bowman et al., in prep.	0.172	0.000	0.632	
			62760	1.1		0.51	Bowman et al., in prep.	0.051	0.000	0.187	
Agricultural crop by-products		Cereals (chaff only)	458041	7.6		0.51	Bowman et al., in prep.	0.032	0.000	0.117	
		Other crops	134485	2.6	1.0			0.234	0.000	0.856	
Animal manure*1		Intermediate crops	84894	1.7	0.6		0.49	Phyllis2	0.066	0.025	0.241
			21032	0.4	0.1		0.49	Phyllis2	0.042	0.014	0.152
Non-woody		Organic fraction of household garbage	Cows	1692924	26.9	9.9	0.59	Oreggioni et al., 2017	0.975	0.246	3.571
			Pigs	1279489	20.2	7.0	0.54	Phyllis2	0.750	0.175	2.748
	Green waste from households and landscape	Horses	81134	1.1	0.5	0.54	Phyllis2	0.044	0.012	0.161	
		Sheep	178212	3.2	1.4	0.54	Phyllis3	0.097	0.035	0.355	
	Organic fraction of household garbage	Goat	104916	1.6	0.7	0.54	Phyllis4	0.057	0.017	0.209	
		Poultry	20964	0.3	0.1	0.54	Phyllis5	0.011	0.003	0.042	
	Green waste from households and landscape	Already collected separately today	28209	0.4	0.2	0.54	Phyllis6	0.015	0.005	0.056	
		Organic fraction of the household garbage*2	210455	3.9	0.4	0.4	Phyllis2	0.103	0.010	0.378	
	Commercial and industrial organic waste	Paper, cardboard, etc...	35336	0.5	0.4	0.52	Phyllis2	0.018	0.010	0.067	
		Other organic fraction	157734	3.0	0.0	0.48	Phyllis2	0.076	0.000	0.277	
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Food processing	391238	5.8	4.5	0.53	Bowman et al., in prep.	0.009	0.000	0.034		
	Catering	264028	3.9	3.0	0.53	Bowman et al., in prep.	0.206	0.111	0.756		
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Retailers	127211	1.9	1.5	0.52	Phyllis2	0.140	0.075	0.513		
	Tobacco industry	238186	2.7	2.2	0.52	Phyllis2	0.066	0.036	0.243		
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Paper production	172039	1.9	1.5	0.52	Phyllis2	0.124	0.054	0.453		
	Printing industry	32559	0.6	0.5	0.52	Phyllis2	0.089	0.037	0.328		
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Textile production	25732	0.2	0.2	0.52	Phyllis2	0.017	0.013	0.062		
	Pharmaceutical industry	1221	0.0	0.0	0.50	Assumption: 50% C	0.001	0.000	0.002		
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Pharmaceutical industry	5486	0.0	0.0	0.48	Phyllis2	0.003	0.000	0.010		
		945	0.0	0.0	0.50	Assumption: 50% C	0.000	0.000	0.000		
Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)		204	0.0	0.0	0.50	Assumption: 50% C	0.000	0.000	0.002		
		347272	4.9	2.6	0.51	Phyllis2	0.177	0.065	0.649		
Sum		97.0	20.5				3.267	0.511	11.973		

Methane in Biogas: assuming a mole fraction of 40% CO<sub>2</sub> except for manure

Sources: Thees et al., 2017; <http://doi.org/10.16904/18>

S.H.Lamlom and R.A.Savidge, 2003; doi: 10.1016/S0961-9534(03)00033-3

G. Bowman, L. Ayed, V. Burg: The role of anaerobic digestion in the circular economy: Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland, challenges and future perspectives. In preparation.

Phyllis2; <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>

Oreggioni et al., 2017; <https://doi.org/10.3390/en10091396>