

Berne, juin 2024

Réflexions du Conseil Scientifique de l'aeesuisse

Le captage, le transport, le stockage et l'utilisation du CO₂ – un élément important d'une stratégie zéro net réussie

Résumé

- La pierre angulaire de toute stratégie « zéro net » est d'éviter autant que possible les émissions fossiles grâce à des mesures d'efficacité, à l'électrification des secteurs de la chaleur et de la mobilité et à l'augmentation nécessaire de la production d'électricité sans CO₂ à partir du photovoltaïque, de l'éolien, etc.
- Toutefois, même dans ce cas, il reste encore des émissions de gaz à effet de serre – en particulier celles provenant de l'agriculture, des cimenteries et des usines d'incinération des ordures ménagères – qui doivent être évitées ou compensées d'une autre manière.
- Le plus grand potentiel réside dans la séparation du CO₂ des gaz d'échappement de différentes installations à l'aide de processus connus comme le lavage aux amines ou à travers des membranes. Le CO₂ capté doit ensuite être transporté vers des sites de stockage appropriés, de préférence via un réseau national et européen de pipelines.
- Le stockage durable du CO₂ s'effectue ensuite dans des formations géologiques présentant une porosité suffisante. L'élément décisif est le confinement sûr par une couche de couverture impénétrable située au-dessus, qui empêche toute fuite. Alternativement, le processus naturel de minéralisation du CO₂ peut être accéléré artificiellement.
- D'autres approches peuvent compléter cette voie, en particulier tant qu'une telle infrastructure de pipeline n'est pas disponible. On peut citer le stockage du CO₂ par minéralisation dans le béton de démolition et le stockage indirect via la biomasse, soit sous forme de charbon végétal dans l'agriculture, soit dans les bâtiments en bois. Ces dernières options peuvent avoir des effets positifs supplémentaires tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre agricoles ou de la consommation de ciment.
- Une partie du CO₂ capté provient des processus de transformation de la biomasse. Si celui-ci est stocké de manière permanente, il en résulte des émissions négatives, comme pour le charbon végétal et la construction en bois, c'est-à-dire que du CO₂ est retiré de l'atmosphère. Les émissions négatives sont nécessaires pour compenser les émissions difficilement évitables de l'agriculture.
- Les critères décisifs pour l'évaluation de ces options sont la capacité de stockage annuelle, le volume total possible ainsi que la permanence du stockage. Selon ces critères, le captage du CO₂ suivi de son stockage géologique est clairement la meilleure option, mais elle nécessite une approche coordonnée avec nos voisins européens.
- Comme mentionné, le stockage du CO₂ ne peut pas remplacer les mesures primaires d'une stratégie « zéro net », notamment parce que les coûts d'évitement spécifiques au CO₂ sont

plus élevés. En l'état actuel des connaissances, il constitue néanmoins un élément déterminant d'une telle stratégie.

Le cœur du « zéro net » est d'éviter les émissions fossiles par la substitution

La réduction des émissions suisses de gaz à effet de serre à un niveau net zéro nécessite en premier lieu l'abandon des sources d'énergie fossiles dans les secteurs de consommation que sont le chauffage et la mobilité. **L'électrification**, c'est-à-dire le couplage de ces secteurs avec le secteur de l'électricité, est ici décisive. Cela signifie, pour la mobilité, le passage aux **véhicules électriques à batterie** et, dans le domaine du chauffage des locaux et de l'eau chaude, l'utilisation systématique de **pompes à chaleur**. Mais cela nécessite également une augmentation de la production d'électricité de 60 TWh par an aujourd'hui à 80–90 TWh/a, principalement grâce au développement du photovoltaïque et de l'éolien, le tout associé à une extension correspondante des réseaux électriques. Pour la chaleur industrielle de process, différentes technologies seront utilisées en fonction du niveau de température : du solaire et de la géothermie pour < 100 °C aux pompes à chaleur industrielles qui peuvent atteindre 200 °C et aux chauffages industriels à résistance qui permettent des températures nettement plus élevées, en passant par la combustion de combustibles solides (biomasse, ordures ménagères), liquides (diesel, biodiesel) ou gazeux (méthane fossile, bio-méthane, hydrogène). Ces derniers peuvent également atteindre les températures les plus élevées de 1 500 °C, comme celles requises pour la production de ciment. La disponibilité des énergies renouvelables étant également limitée en raison de leur coût, de la surface nécessaire et d'autres questions d'acceptation sociétale, la **réduction de la demande d'énergie** est également un élément important de la stratégie « zéro net ».

Mais pour cela, il faut aussi capter et stocker le CO₂

Toutefois, il ne suffit pas d'éviter les sources d'énergie fossiles pour atteindre un bilan net nul. Selon les estimations de l'Office fédéral de l'énergie OFEN, il restera encore en 2050 environ 11,7 millions de tonnes d'équivalents CO₂ par an (Mt/a), provenant de différentes sources¹. La plus grande part revient à l'agriculture avec 4,6 Mt/a, suivie de 2,6 Mt/a de déchets fossiles brûlés dans les UVTD, de 2,4 Mt/a provenant de la production de ciment (en grande partie des émissions géogènes inévitables dues à la réaction chimique du calcaire en chaux vive) et d'environ 2,1 Mt/a provenant de différents processus industriels et des décharges.

Dans le scénario de base zéro des perspectives énergétiques 2050+, 7,1 Mt/a de ces émissions sont **évitées grâce au captage, au transport et au stockage du CO₂**, principalement dans les UVTD et les cimenteries. Une partie du CO₂ stocké provient de la biomasse et donc de l'atmosphère. Cela correspond à une **élimination de CO₂, également appelée émission négative**. Les 4,6 Mt/an restants doivent être traités par des émissions négatives à l'étranger, par exemple par captage direct dans l'air².

¹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJiYX/Rpb24vZG93bmxvYVQvMTAzMjM=.html>

² <https://climeworks.com/plant-mammoth>

La figure 1 montre les flux de carbone entre l'atmosphère, le sous-sol et une sélection de réservoirs possibles (sols, construction en bois). Le zéro net signifie que les **apports** de CO₂ dans l'atmosphère par la combustion et les autres émissions doivent être compensés par des **sorties** de même ampleur par la croissance des plantes ou le captage direct. Étant donné que même si l'on évite totalement les combustibles fossiles, il reste toujours les émissions de l'agriculture et de la production de ciment, il faut inévitablement extraire du carbone du système.

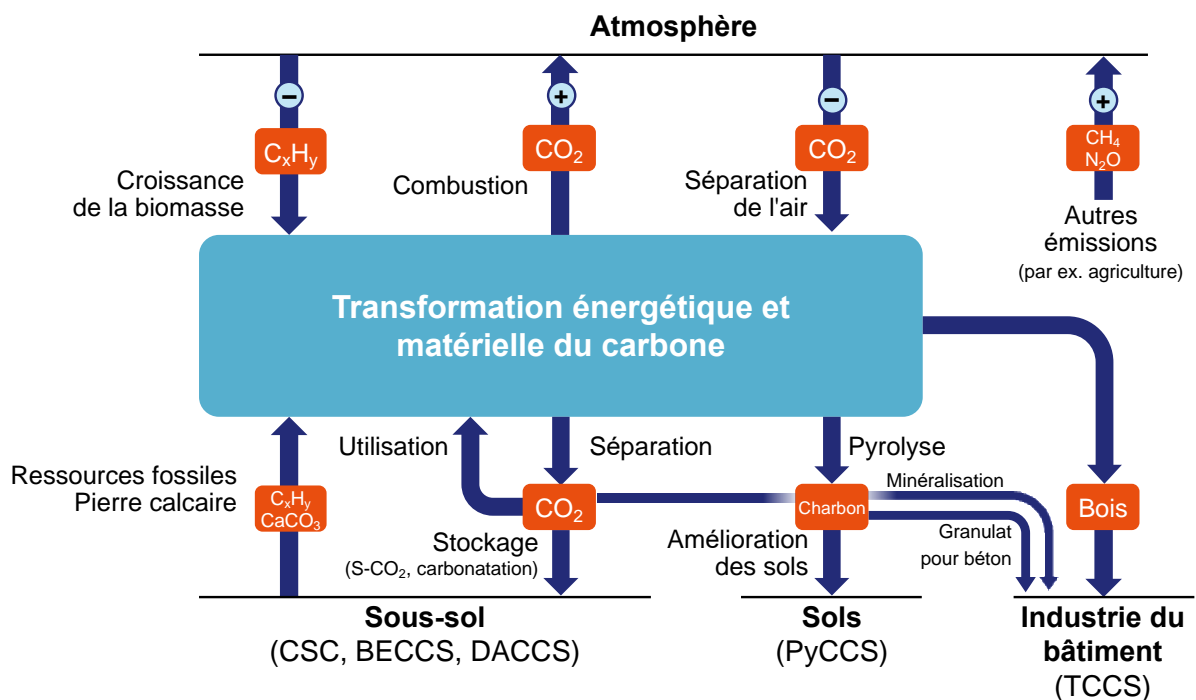


Fig. 1 : Bilan des flux de carbone

Le plus important à cet égard est le captage et le stockage du CO₂ des UVTD et des cimenteries (CSC). S'y ajoutent des options permettant d'extraire du CO₂ de l'atmosphère,

- notamment la combustion de la biomasse suivie du captage et du stockage du CO₂ biogénique (BECCS),
- le captage direct du CO₂ dans l'air suivi de son stockage (DACCS),
- le stockage du carbone biogène issu de la pyrolyse de la biomasse ou du méthane dans le sol (PyCCS) ou
- le stockage de carbone biogénique sous forme de bois dans les constructions en bois (TCCS).

Différents résultats de modélisation confirment cette conclusion

Dans le cadre du projet SWEET-CROSS³, des équipes de différentes universités et instituts de recherche ont calculé à quoi pourrait ressembler un système énergétique net zéro à l'avenir.

³ <https://sweet-cross.ch/results/>

Un large consensus s'est dégagé sur l'importance de l'efficacité énergétique, du développement de la production d'électricité au moyen du photovoltaïque et de l'énergie éolienne, de l'électromobilité et des pompes à chaleur.

Pour ce faire, les quantités annuelles de captage et de stockage du CO₂ ont également été évaluées - en distinguant le captage en Suisse et à l'étranger. La figure 2 montre qu'avec **10–15 Mt/a, les résultats correspondent bien à ceux des perspectives énergétiques 2050+**. L'une des raisons de ces différences réside dans le fait que certains modèles de calcul utilisent encore des combustibles fossiles (p. ex. dans l'industrie), qui doivent alors être compensés par des émissions négatives plus élevées correspondantes.

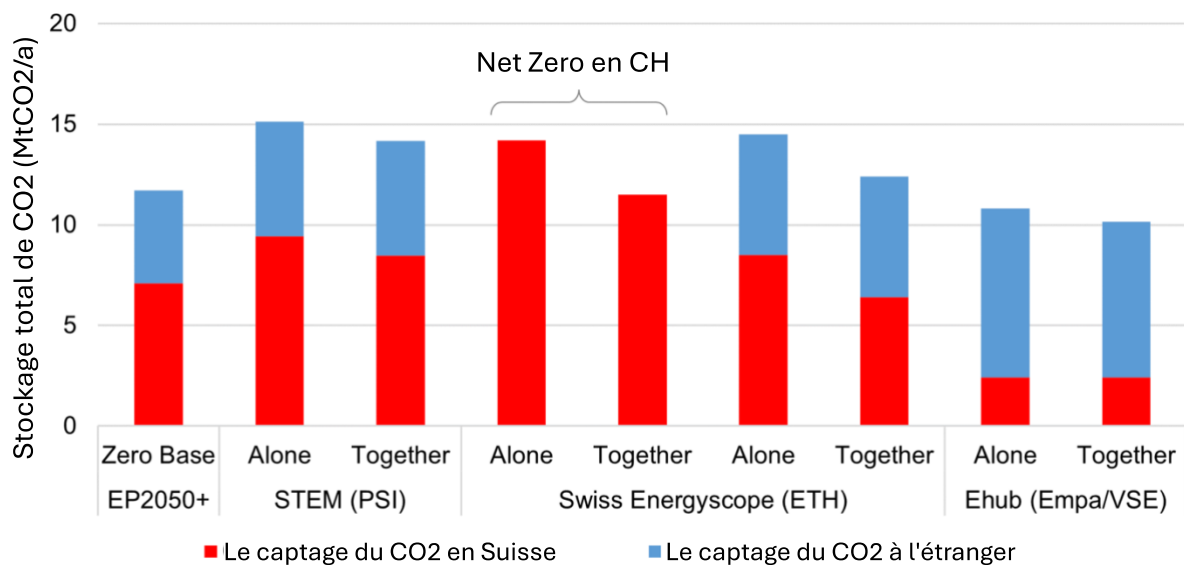


Fig. 2 : Résultats des modèles de différentes équipes dans le cadre de SWEET-CROSS^{3, 4}

Les résultats de SWEET-CROSS montrent une fois de plus que le captage du CO₂ n'est pas la seule voie royale pour atteindre le zéro net. Il s'agit plutôt d'une **composante supplémentaire importante d'une stratégie énergétique et climatique globale**, qui repose avant tout sur des gains d'efficacité et sur l'évitement des combustibles et carburants fossiles.

Différentes technologies permettent de capter le CO₂

Le CO₂ se trouve en faible **concentration dans l'atmosphère, actuellement 0,042%** (420 ppm) avec une tendance à la hausse. Lorsqu'un combustible contenant du carbone est brûlé, il produit du CO₂, qui est alors présent dans le flux de gaz d'échappement avec une **concentration nettement plus élevée de 5 à 15%**. Cela se produit également lors de la calcination en cimenterie. Enfin, le CO₂ se forme également lors de la production de biogaz par fermentation anaérobie. Le biogaz brut contient alors, outre du biométhane, **40 à 50 % de CO₂**.

En raison de ces différences de concentration considérables, il existe également différentes technologies pour capter le CO₂. Dans le cas de **la capture directe dans l'air (Direct Air**

⁴ <https://www.strom.ch/fr/avenir-energetique-2050/page-daccueil>

Capture, DAC), l'air passe à travers des tapis filtrants sur lesquels se trouve un matériau qui adsorbe le CO₂⁵. Lorsque ces nattes filtrantes sont saturées de CO₂, le CO₂ est expulsé en l'absence d'air par réduction de la pression et augmentation de la température, puis il est préparé pour un traitement ultérieur. La consommation d'énergie pour ce processus est élevée et s'élève à environ 2 MWh de chaleur (100 °C) et 0,4 MWh d'électricité par tonne de CO₂.

Pour la séparation du CO₂ des gaz d'échappement d'un incinérateur, on utilise par exemple **le lavage aux amines**. Le CO₂ est mis en contact avec une solution aqueuse d'amines dans une colonne d'absorption. Le CO₂ est absorbé par ce solvant, tandis que les gaz d'échappement, désormais pratiquement exempts de CO₂, quittent la colonne par le haut. Comme dans le cas de la séparation de l'air, le solvant saturé en CO₂ doit être régénéré. Cela se fait dans une deuxième colonne avec apport de chaleur. Le CO₂ est alors préparé pour la suite du traitement, tandis que le solvant, désormais pauvre en CO₂, est renvoyé vers la colonne d'absorption. La consommation d'énergie pour ce processus est plus faible que pour la séparation à partir de l'air, elle est d'environ 1 MWh de chaleur (100-140 °C) et 0,1 MWh d'électricité par tonne de CO₂.

Le lavage aux amines est un processus bien établi pour les installations à partir d'une taille d'environ 50–100 000 tonnes de CO₂ par an. Cela correspond à une centrale de chauffage au bois ou à une petite usine d'incinération des ordures ménagères. Pour les installations plus petites, telles qu'un chauffage au bois dans un réseau de chaleur local ou un brûleur industriel à huile ou à gaz, il est possible d'utiliser des **membranes pour la séparation du CO₂**, qui sont actuellement en cours de développement⁶. Cela nécessite environ 0,4 MWh d'électricité par tonne de CO₂, principalement pour surmonter la perte de pression à travers la membrane. Les membranes sont également une technologie bien établie pour la séparation du CO₂ du biogaz brut d'une installation de biogaz. Le besoin en électricité est d'environ 0,2-0,3 MWh par tonne de CO₂⁷. D'autres technologies de capture du CO₂ en sont aux premiers stades de développement.

Possibilités et défis du stockage du CO₂

Après le captage, le CO₂ doit être transporté vers les sites de stockage potentiels. Il peut alors se présenter sous forme de gaz comprimé, de liquide (< 31 °C, > 5,2 bar) ou à l'état supercritique (> 31 °C, > 73 bar). **Le CO₂ liquide convient surtout pour le transport dans des conteneurs isolés spéciaux** sur des camions, des trains ou des bateaux. Pour les petites sources ponctuelles de 10'–50'000 tonnes par an, cela peut être une solution économique. Pour les sources plus importantes telles que les UVTD ou les cimenteries, **une infrastructure nationale de pipelines** est nécessaire pour collecter le CO₂ des grandes sources ponctuelles (figure 3). Une telle infrastructure a été conçue dans le cadre du projet CO₂NET⁸. Pour ce faire, la Suisse doit toutefois être **reliée à un système européen de pipelines de CO₂** dans lequel le CO₂ peut être injecté (probablement à Bâle). Dans un tel pipeline, le CO₂ se trouve à l'état supercritique. Des aspects essentiels de cette chaîne de processus, y compris une

⁵ <https://climeworks.com/direct-air-capture>

⁶ <https://www.unisieve.com/applications>

⁷ <https://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/anlagentechnik/biogasaufbereitung>

⁸ <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47346>

démonstration de transport par conteneurs vers l'Islande, ont été étudiés dans le cadre du projet DemoUpCarma⁹, qui s'achèvera fin 2023.



Fig. 3 : Conception possible d'une infrastructure nationale de pipeline pour le CO₂.

Pour le **stockage final, le CO₂ est injecté dans des couches de roches poreuses au fond de la mer**. Le défi réside dans le fait qu'à l'état supercritique, le CO₂ a une densité inférieure à celle de l'eau dans les pores de la roche et qu'il monte donc. Pour empêcher toute fuite, le réservoir doit être fermé vers le haut par une couche de couverture impénétrable. De telles structures se trouvent naturellement dans les gisements de pétrole et de gaz. A l'intérieur du réservoir, il existe différentes variantes pour le maintien à long terme du CO₂ :

- a. A l'état supercritique, le CO₂ monte et est piégé par la couche de couverture (structural trapping).
- b. Une partie du CO₂ est piégée dans les pores de la roche en raison des forces capillaires.
- c. Avec le temps, le CO₂ se dissout dans l'eau interstitielle et coule (dissolution trapping), après quoi il
- d. réagit chimiquement avec la roche environnante et se minéralise (mineral trapping).

Cette dernière possibilité est l'option la plus sûre à long terme. Toutefois, dans des conditions naturelles, ce processus prend des centaines, voire des milliers d'années. Avec le processus Carbfix¹⁰, le stockage par dissolution peut être réalisé en quelques minutes. Parallèlement, le temps nécessaire à une minéralisation complète est réduit à quelques années. Toutefois, ce

⁹ <https://demoupcarma.ethz.ch/de/home/>

¹⁰ <https://www.carbfix.com/how-it-works>

processus nécessite de grandes quantités d'eau (environ 25 tonnes par tonne de CO₂) et des conditions géologiques appropriées qui, en l'état actuel des connaissances, ne sont pas présentes en Suisse. **En résumé, le stockage géologique du CO₂ est l'une des méthodes de stockage les plus durables.**

Comme nous l'avons mentionné, ce sont en principe surtout **les gisements de pétrole et de gaz exploités qui conviennent comme réservoirs pour le stockage de CO₂**. De tels gisements n'existent guère en Suisse, à l'exception de l'extraction de gaz naturel dans l'Entlebuch au milieu des années 1980. Des couches de roches poreuses, appelées aquifères, se trouvent certes partout sous le Plateau suisse, mais les estimations actuelles du potentiel de stockage sont encore approximatives et donc incertaines¹¹. En raison des avantages potentiels d'une solution nationale, des études plus approfondies sont donc fortement recommandées et sont actuellement planifiées¹².

En revanche, le potentiel de stockage du CO₂ dans les couches rocheuses poreuses sous la mer du Nord est estimé à 100–150 gigatonnes¹³. Les émissions annuelles de l'UE-27 étaient d'environ 3,5 gigatonnes en 2021¹⁴. Comme dans le cas de la Suisse, on peut supposer que la plus grande partie de ces émissions peut être réduite par l'électrification et d'autres gains d'efficacité. En supposant qu'il reste finalement 0,5 à 1 gigatonne de CO₂ à stocker chaque année, le potentiel de stockage serait suffisant pour un à deux siècles.

Mais pour que la Suisse puisse utiliser ce potentiel de stockage, elle doit être reliée à une infrastructure européenne de transport du CO₂.

Possibilité alternative de stockage indirect du CO₂ : charbon végétal et construction en bois

D'après les résultats des modèles disponibles, le captage du CO₂ gazeux suivi de son stockage géologique semble être la principale voie pour traiter les émissions restantes difficilement évitables, tant en termes d'**évitement** des émissions fossiles et géogènes que de génération d'**émissions négatives** par BECCS ou DACCS. Cependant, comme mentionné précédemment, cette voie dépend de facteurs hors du contrôle de la Suisse.

Une alternative consiste notamment à générer des émissions négatives par **pyrolyse (PyCCS)** et **construction en bois (TCCS)**. Dans la pyrolyse, et de manière similaire dans la carbonisation hydrothermale, la biomasse est chauffée à l'abri de l'air. Il en résulte du charbon végétal, un produit riche en carbone qui, contrairement à la matière première, ne se dégrade que difficilement par des processus biologiques. Une voie alternative passe par la pyrolyse du bio-méthane, qui produit non seulement du carbone mais aussi de l'hydrogène.

Le charbon végétal peut alors être utilisé pour améliorer les sols dans l'agriculture ou comme additif dans la fabrication du béton. Dans les deux cas, le CO₂ atmosphérique est durablement éliminé de l'atmosphère par la croissance de la biomasse, la pyrolyse et le stockage qui s'ensuit – d'où le terme d'émissions négatives. Agroscope estime le potentiel de stockage dans

¹¹ <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000518184>

¹² <https://nagra.ch/bund-prueft-machbarkeiten-von-versuch-auf-dem-bohrplatz-truellikon/>

¹³ https://cdmare.de/wp-content/uploads/2023/06/CDRmare05_speichsandst_kompakt_230620V3.pdf

¹⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher>

les seuls sols agricoles en Suisse à un maximum de 4 millions de tonnes d'équivalents CO₂ par an, à condition toutefois qu'il y ait suffisamment de biomasse disponible pour cette voie¹⁵. Si l'on tient compte des voies d'utilisation concurrentes, notamment pour le bois, on obtient un potentiel inférieur d'environ **1 million de tonnes d'équivalents CO₂ par an**.¹⁶ La comparaison avec la figure 2 montre qu'il s'agit d'une quantité significative.

Comme alternative au charbon végétal, le CO₂ atmosphérique peut également être stocké directement par l'utilisation du bois comme matériau de construction. Selon une étude du BFU¹⁷, **le potentiel annuel est d'environ 2 millions de tonnes d'équivalents CO₂**. Comme pour le charbon végétal, il s'agit d'une quantité significative. En outre, il est possible d'utiliser le charbon végétal comme matière première pour les matériaux de construction (par exemple pour l'isolation des bâtiments) et de le stocker de cette manière dans la construction. L'inconvénient du stockage de CO₂ sous forme de charbon végétal ou de bois est la perte d'énergie primaire qui n'est plus disponible pour le système énergétique. Dans les deux cas, cette perte est d'environ 2,5 MWh par tonne de CO₂ stockée.

Une autre option alternative est le stockage de CO₂ gazeux dans le béton de démolition. Il s'agit d'un processus de minéralisation accéléré au cours duquel le CO₂ se transforme en calcaire et se fixe dans les pores et à la surface des granulats de béton¹⁸. Actuellement, il est possible de stocker environ 10 kg de CO₂ par tonne de béton de démolition. Cette valeur peut éventuellement être augmentée jusqu'à 25 kg/t grâce à des améliorations supplémentaires. Avec environ 5 millions de tonnes de béton de démolition par an en Suisse, cela correspond à une capacité de stockage de 50'–100'000 tonnes de CO₂.

Le stockage du CO₂ est-il une solution durable à long terme ?

Pour que le stockage du CO₂ ait réellement un effet positif, il faut s'assurer que le CO₂ retiré ne sera pas réintroduit dans l'atmosphère avant au moins mille ans. Deux questions se posent à cet égard pour les méthodes évoquées précédemment : Combien de temps le CO₂ reste-t-il dans le réservoir concerné (permanence) ? Quelle est la quantité maximale de CO₂ pouvant être stockée avant que le réservoir ne soit plein (volume de stockage) ?

Aucune de ces questions ne peut aujourd'hui être résolue avec certitude. En ce qui concerne la permanence, on part actuellement du principe que le CO₂ reste enfermé dans des couches rocheuses poreuses sous une roche de couverture impénétrable pendant des dizaines de milliers d'années¹⁹. Les risques qui y sont liés et la manière dont un tel réservoir peut être surveillé constituent actuellement un sujet de recherche important. Dans le cas du charbon végétal, la permanence dépend des paramètres exacts du processus de pyrolyse. Les estimations actuelles prévoient une demi-vie de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années¹⁴.

¹⁵ <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/46567>

¹⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17583004.2023.2244456>

¹⁷ <https://www.umweltchemie.ch/wp-content/uploads/Szenarien-CO2-Holzbau-BfU.zip>

¹⁸ <https://www.neustark.com/de/wie-unsere-1%C3%B6sung-funktioniert>

¹⁹ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter12.pdf

Dans le cas de la construction en bois, la permanence est à juste titre un aspect très discuté, car la durée de vie d'un bâtiment actuel dépasse rarement 80 ans. En fin d'utilisation dans le bâtiment, plusieurs options sont possibles : le traitement et la réutilisation des éléments en bois dans de nouveaux bâtiments, la production de charbon végétal (PyCCS) ou l'utilisation énergétique par combustion, idéalement suivie d'un captage et d'un stockage de CO₂ (BECCS). De cette manière, les émissions négatives peuvent être maintenues.

Une capacité de stockage permanente de la construction en bois en soi n'existe que si un bâtiment en bois est remplacé par un autre bâtiment en bois après sa démolition. Pendant une phase de construction, la quantité de CO₂ stockée dans la construction en bois augmenterait donc continuellement, pour finalement rester constante dans un équilibre dynamique de démolition et de construction. Selon des estimations approximatives du stock de matériaux de construction et de la part de bois dans un bâtiment en bois typique, la masse totale de CO₂ alors stockée s'élèverait à 200–300 millions de tonnes¹⁶. Un autre effet positif de la construction en bois est bien entendu une réduction de la consommation de ciment, avec une diminution correspondante des émissions de CO₂ qui y sont liées.

Le volume de stockage maximal du charbon végétal ne peut pas être chiffré à l'heure actuelle. La capacité de stockage annuelle de 4 millions de tonnes d'équivalents CO₂ mentionnée ci-dessus a été estimée comme inoffensive pour 30 ans¹⁴. Cela correspondrait à un volume de stockage de plus de 100 millions de tonnes. Comme mentionné précédemment, le volume maximal de stockage sous la mer du Nord est estimé à 100-150 milliards de tonnes de CO₂. Les émissions de la Suisse sont de l'ordre de 1 à 2 % des émissions des pays de l'UE27. En supposant une part similaire du volume de stockage, la Suisse disposerait donc de 1'-2'000 millions de tonnes.

En résumé, aucune des options de stockage du CO₂ n'est illimitée, ni en termes de capacité annuelle de stockage, ni en termes de volume maximal de stockage, mais avec un net avantage pour le stockage géologique dans les deux cas. **Le raccordement à une infrastructure européenne de transport du CO₂ doit donc être l'objectif de la Suisse.** L'avantage des options de stockage alternatives telles que PyCCS et TCCS est à nouveau que nous pouvons les mettre en œuvre dès maintenant, alors qu'une telle infrastructure est en cours de construction. Dans tous les cas, en l'état actuel des connaissances, le stockage annuel des 10 à 15 millions de tonnes de CO₂ illustrées dans la figure 2 est possible pour les un à deux prochains siècles.

On peut donc répondre par l'affirmative à la question de savoir si les options envisagées pour le stockage du CO₂ au cours des prochaines décennies peuvent contribuer à la réalisation des objectifs climatiques de la Suisse.

L'utilisation du CO₂ – une alternative au stockage ?

Comme le montre la figure 1, deux options sont disponibles pour le traitement ultérieur du CO₂ capté :

- le stockage (en anglais Carbon Capture and Storage (CCS)) et
- l'utilisation (Carbon Capture and Utilization (CCU)).

Toutefois, ces options ne sont pas équivalentes : leur utilisation n'élimine pas le CO₂ du système. Leur valeur réside dans le fait que des ressources fossiles sont économisées. Mais comme il faut dans tous les cas éviter ou compenser les émissions géogènes liées à la production de ciment, les émissions (fossiles) dues à l'incinération des déchets et les émissions non énergétiques de l'agriculture, un système net zéro basé uniquement sur l'utilisation du CO₂ n'est pas possible.

À cela s'ajoute le fait que l'utilisation du CO₂ comme source d'énergie nécessite l'ajout d'énergie. Une tonne de CO₂ peut être transformée en 5 MWh de méthane synthétique, ce qui permet d'économiser du méthane fossile. Cependant, cela nécessite 6 MWh d'hydrogène, qui consomme à son tour 10 MWh d'électricité pour l'électrolyse. Des chiffres similaires sont obtenus pour la synthèse de carburants d'aviation durables. Une comparaison avec la consommation d'énergie susmentionnée pour la capture du CO₂ montre une différence d'un ordre de grandeur. **En résumé, l'objectif net zéro ne peut pas être atteint sans le stockage du CO₂ et celui-ci ne peut pas être remplacé par l'utilisation du CO₂.**

Les résultats des modèles montrent toutefois que l'utilisation du CO₂ peut devenir attrayante si le stockage géologique devient plus cher ou impossible en raison de l'absence de connexions par pipeline. On peut également constater que la voie de l'utilisation du CO₂ n'est pas limitée par la quantité de CO₂ disponible. Par exemple, si l'on voulait produire synthétiquement tout le kérosène consommé en Suisse, cela nécessiterait 5 à 6 mégatonnes de CO₂ par an comme matière première, une quantité en principe disponible. Le facteur limitant serait ici clairement l'énergie nécessaire à la production d'hydrogène pour la synthèse.

Quels sont les coûts ?

Atteindre l'objectif zéro net est une mission sociétale qui entraîne une modification des flux économiques - au sein du système énergétique et au-delà. Ainsi, les coûts et les incertitudes liées à l'importation de combustibles et de carburants fossiles diminueront de manière significative. Inversement, le développement de la production d'électricité renouvelable et le passage à la mobilité électrique et aux pompes à chaleur nécessiteront des investissements accrus dans le pays. Comment peut-on classer les options de stockage direct et indirect du CO₂ considérées ?

Chaque mesure contribuant au zéro net peut être évaluée par son coût d'évitement du CO₂ – c'est-à-dire le coût nécessaire pour éviter une tonne de CO₂. Tous les résultats des modèles s'accordent à dire que l'électromobilité et les pompes à chaleur sont clairement les options les moins chères. Pour des objectifs de CO₂ de plus en plus stricts, on obtient une hiérarchie de solutions dont les coûts d'évitement augmentent. Celle-ci commence par des options telles que la construction en bois et le captage du CO₂ biogène des installations de biogaz, se poursuit par le captage à de grandes sources ponctuelles (UVTD, cimenteries) ou la production de charbon végétal par pyrolyse et se termine enfin par l'option actuellement la plus chère, à savoir le captage direct du CO₂ dans l'air. Il ne s'agit toutefois que d'un classement qualitatif. Les coûts réels et la faisabilité des différentes options dépendent d'une multitude de facteurs, et dans le cas du CSC, principalement de l'intégration de la Suisse avec l'Europe.

Compétences et perspectives

Le développement et l'application de ces procédés étant exigeants en Suisse et, a fortiori, dans le cadre de la coopération internationale, ils doivent être coordonnés. Certains acteurs de la recherche et de l'économie, comme la « Swiss Carbon Removal Platform », développent des positions à ce sujet et mettent en œuvre les premiers projets. Le plus connu est sans doute l'entreprise suisse Climeworks, qui met par exemple en service une installation en Islande. Mais il existe également différentes activités en Suisse.

Afin d'orienter les pouvoirs publics ainsi que la recherche et l'économie, le Conseil fédéral esquisse dans un rapport²⁰ différentes étapes intermédiaires réparties en deux phases : une phase pionnière de 2022 à 2030 et une phase de mise à l'échelle ciblée de 2031 à 2050. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) joue un rôle central dans ce contexte, ses tâches s'inscrivant dans les domaines suivants avec des horizons temporels différents :

- Amélioration des bases juridiques, stratégiques et d'exécution au niveau national.
- Coopération nationale
- Coopération internationale
- Recherche et développement, promotion de l'innovation
- Exemplarité des pouvoirs publics

En raison de l'urgence, de la complexité et de la visibilité croissante du sujet, mais aussi de sa sensibilité écologique et économique, il faut s'attendre à ce que le débat sociétal devienne de plus en plus intense et éventuellement controversé. Des évaluations de risques fondées sont également nécessaires. Il est donc conseillé de mener ce débat de manière coordonnée. Une première étape dans ce sens consiste à comprendre les procédés et leur importance pour la réalisation des objectifs climatiques, en interaction avec les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui restent prioritaires. En effet, les procédés de captage et de stockage du CO₂ ne sont en aucun cas une carte blanche pour « continuer comme avant ».

²⁰ [Captage et stockage du CO₂ \(CSC\) et technologies d'émission négative \(NET\). Leur contribution possible, par étapes, à l'objectif climatique à long terme Rapport du Conseil fédéral](#)



Prof. Dr Luca Baldini
Porte-parole du Conseil Scientifique de l'aeesuisse
Co-dirigeant du Centre for Building Technologies and Processes ZBP à la Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW)



Prof. Dr Christophe Ballif
Directeur du PV-Lab@EPFL et du Sustainable Energy Center@CSEM



Prof. Dr Massimiliano Capezali
Président du Pôle de compétences Énergies de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)



Dr Gianfranco Guidati
Directeur adjoint de l'Energy Science Center de l'ETH Zurich



Prof. Dr Andreas Häberle
Directeur de l'Institut de technique solaire SPF, directeur de la division Énergies renouvelables et techniques environnementales (EEU) de la Haute École spécialisée de la Suisse orientale (OST)



Prof. Dr Martin Patel
Professeur à la chaire en efficacité énergétique de l'Université de Genève



Prof. Dr Greta Patzke
Professeure au département de chimie de l'Université de Zurich



Dr François Vuille
Directeur de l'énergie du Canton de Vaud et ancien directeur exécutif du Energy Center de l'EPFL

Le Conseil Scientifique de l'aeesuisse

Dans le cadre des travaux de l'aeesuisse, le conseil scientifique fait office de think tank et de groupe de réflexion sur des dossiers politiques et des questions de fond dans tous les domaines de la politique énergétique et climatique. Il comprend plusieurs universitaires de renommée mondiale, disposant d'un réseau national et international.

Le Conseil Scientifique a trois missions clés :

- **Expertise** : le conseil scientifique mène une réflexion autour des évolutions actuelles et participe à l'élaboration et à la définition de positions et de contenus.
- **Communication** : il contribue activement à forger l'opinion publique et politique par l'intermédiaire d'articles spécialisés, de présentations événementielles et de contacts avec les autorités et les milieux politiques.
- **Réseau** : il entretient et développe son réseau, afin de contribuer à un positionnement positif de l'aeesuisse dans l'économie, la science et la société.