



**HAL**  
open science

# Le potentiel du stockage géologique du CO<sub>2</sub> par minéralisation

Sylvain Delerce, Eric H. Oelkers

► **To cite this version:**

Sylvain Delerce, Eric H. Oelkers. Le potentiel du stockage géologique du CO<sub>2</sub> par minéralisation. 2021. hal-03433151

**HAL Id: hal-03433151**

**<https://hal.science/hal-03433151>**

Preprint submitted on 17 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Le potentiel du stockage géologique du CO<sub>2</sub> par minéralisation

**Par Sylvain DELERCE**

Ingénieur diplômé d'AgroParisTech

**Et Éric H. OELKERS**

Directeur de recherche du CNRS

Depuis le milieu des années 2000, des chercheurs travaillent activement sur le stockage du carbone par minéralisation avec une étape importante franchie en 2016 grâce aux résultats du projet européen CarbFix en Islande. Depuis, cette technologie a été déployée au niveau industriel sur la centrale géothermale d'Hellisheiði et combinée avec la capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'air (DAC en anglais). Dans cet article, nous explorons les mécanismes de la minéralisation pour en évaluer le potentiel dans la lutte contre le changement climatique. L'histoire du projet CarbFix nous permet de mettre en lumière la viabilité de cette méthode et de montrer qu'elle est prête pour son déploiement à grande échelle.

## Contexte

L'objectif de neutralité carbone (Net Zéro) à l'horizon 2050 exige une décarbonation draconienne de l'économie mondiale. L'utilisation des techniques de capture et de stockage du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) avec valorisation pour piéger le CO<sub>2</sub> avant son émission dans l'air (CSCV, ou CCUS en anglais) et de celles des émissions négatives pour le recapter une fois dans l'atmosphère (ou Carbon Dioxide Removal (CDR)), est nécessaire pour atteindre cet objectif. Les émissions négatives seront notamment essentielles pour faire baisser la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> après le dépassement probable des limites considérées comme sûres par le Groupement d'experts international sur l'évolution du climat (GIEC).

L'efficacité de ces méthodes repose sur une soustraction durable du CO<sub>2</sub> au cycle du carbone grâce à un stockage sûr et permanent. Une des méthodes les plus sûres sur le long terme est la minéralisation de ce CO<sub>2</sub> sous forme de minéraux carbonatés, comme la calcite (CaCO<sub>3</sub>). Comme d'autres méthodes de séquestration du CO<sub>2</sub>, la minéralisation requiert d'importants volumes de stockage : stocker une gigatonne (Gt) de CO<sub>2</sub> sous forme de calcite représente un volume de 1 km<sup>3</sup>. Le sous-sol est un candidat de choix pour offrir de telles capacités.

Dans cet article, nous retraçons une brève histoire de la minéralisation du carbone *in situ* et nous explorons les potentiels qui se dessinent pour cette technique en plein essor.

## Le besoin d'un stockage à grande échelle

Les volumes de CO<sub>2</sub> qu'il va falloir capter et stocker pour freiner avant d'inverser le changement climatique sont considérables. L'Agence internationale de l'énergie estime le besoin à 4 GtCO<sub>2</sub>/an d'ici à 2035 et à 7,6 GtCO<sub>2</sub>/an d'ici à 2050 (CSCV et CDR confondus) (IEA, 2021b). Dans les scénarios du GIEC compatibles avec un réchauffement limité à 1,5°C avec pas ou peu de dépassement de ce seuil, ce sont 300 GtCO<sub>2</sub> qui doivent être captées et stockées d'ici à 2050 (CSCV), avec en complément 8 GtCO<sub>2</sub> d'émissions négatives (Rogelj et al., 2018). Il est donc nécessaire de développer des formes de stockage capables d'absorber de tels volumes.

Aujourd'hui, les techniques de valorisation du CO<sub>2</sub> capté ont le vent en poupe, notamment parce qu'elles permettent de fabriquer des produits commercialisables. On peut citer la fertilisation de serres, la production de carburants pour l'aviation (LanzaTech<sup>1</sup>), de composés chimiques de base (Twelve<sup>2</sup>), de boissons gazeuses voire même de vodka (Air Company<sup>3</sup>)... Le problème commun à ces différentes voies de valorisation est que le stockage du CO<sub>2</sub> n'y est que transitoire. D'autres méthodes permettent un stockage d'une durée un peu plus longue, comme la fabrication de pièces pour l'automobile (Made Of Air<sup>4</sup>) ou d'agrégats (Blue Planet<sup>5</sup>). Mais, dans tous les cas, une autre limite de ces marchés est qu'ils ne pourront jamais absorber plusieurs gigatonnes de CO<sub>2</sub>.

Une autre solution actuellement envisagée est le stockage par minéralisation ex-situ en surface. Cependant les volumes de matériaux à traiter pour sa mise en œuvre sont tels que cette technique devrait se cantonner à des stockages de petite échelle localement (Gerdemann et al., 2007), profitant d'opportunités comme la disponibilité de résidus miniers par exemple.

Le stockage géologique in-situ du CO<sub>2</sub> lui, permet le stockage sûr et à grande échelle que requiert la lutte contre le changement climatique. Il est incontournable pour équilibrer nos flux de CO<sub>2</sub>.

## Le stockage géologique in-situ

Dans son principe, ce type de stockage consiste à injecter le CO<sub>2</sub> dans des formations géologiques présentant les caractéristiques nécessaires pour garantir un stockage sûr et permanent de ce composé gazeux. Pour qu'un stockage soit sûr, il faut que les risques induits de sismicité, de fuite et de contamination des nappes phréatiques soient contrôlés. Un stockage est permanent si le CO<sub>2</sub> peut être stocké durant plusieurs siècles, voire des millénaires avec des taux de fuite proches de zéro. Par exemple, Miocic *et al.* (2019) considèrent que pour être efficace, le

---

<sup>1</sup> <https://www.lanzatech.com>

<sup>2</sup> <https://www.twelve.co>

<sup>3</sup> <https://aircompany.com/products/air-vodka-with-natural-flavors>

<sup>4</sup> <https://www.madeofair.com>

<sup>5</sup> <https://www.blueplanet-ltd.com>

stockage doit pouvoir contenir le CO<sub>2</sub> pendant 10 000 ans avec un taux de fuite inférieur à 0,01 % du volume injecté chaque année.

Les méthodes de stockage géologiques diffèrent selon (i) la technique d'injection utilisée et (ii) le type de formation rocheuse ciblée.

Pour optimiser les coûts de l'injection, le CO<sub>2</sub> est souvent injecté sous forme de gaz supercritique (scCO<sub>2</sub>). À l'état supercritique, un fluide se comporte comme un gaz avec une densité proche d'un liquide, ce qui présente l'avantage de maximiser la masse de CO<sub>2</sub> injecté par unité de volume pompée. Bien que plus dense que le CO<sub>2</sub> gazeux, le scCO<sub>2</sub> reste moins dense que l'eau et la roche qui l'entourent dans le sous-sol. Il a donc naturellement tendance à remonter vers la surface. L'autre technique d'injection consiste à dissoudre le CO<sub>2</sub> dans de l'eau, avant ou pendant l'injection, et d'injecter l'eau chargée en CO<sub>2</sub> dans le réservoir. Avec cette technique, pas de problème de remontées de gaz. En revanche, environ 25 tonnes d'eau sont nécessaires pour injecter chaque tonne de CO<sub>2</sub>.

Les roches qui constituent le réservoir de stockage ont idéalement une grande porosité (espace de stockage) et une bonne injectivité, qui correspond à la quantité de fluide qu'il est possible d'injecter par unité de temps à une pression donnée. On distingue ensuite les roches réactives des roches non-réactives. Si les roches ciblées sont non réactives, la présence d'une roche de couverture imperméable au-dessus du réservoir est impérative pour bloquer les remontées de CO<sub>2</sub> vers la surface. Le CO<sub>2</sub> est également piégé par les forces capillarité dans l'espace poreux, et sous forme dissoute dans les fluides du réservoir. Les formations rocheuses d'intérêt pour mettre en œuvre cette méthode sont typiquement les formations sédimentaires, comme les aquifères salins profonds, les gisements d'hydrocarbures désaffectés et les veines de charbon. Cette méthode a été décrite en détail par Benson *et al.* (2005) et par Czernichowski-Lauriol (2020). Les roches réactives permettent de minéraliser le CO<sub>2</sub> injecté c'est-à-dire de le faire réagir avec les roches du réservoir pour le piéger sous forme de minéraux carbonatés. En présence de CO<sub>2</sub> et d'eau, une solution légèrement acide (avec un pH se situant généralement autour de 3) se forme et provoque la dissolution partielle de la roche, ce qui augmente le pH de l'eau du réservoir et libère certains cations (en particulier, du calcium, du magnésium et du fer) capables de réagir avec le CO<sub>2</sub> dissout pour précipiter des carbonates, comme la calcite, la dolomite ou l'ankérite. La précipitation des carbonates est une réaction spontanée (exothermique), ce qui signifie que les carbonates formés sont thermodynamiquement stables. Ce processus naturel est le principal régulateur du cycle du carbone et du climat terrestre à l'échelle des temps géologiques (Brady, 1991). On estime qu'environ 64 000 Gt de carbone sont stockées dans l'ensemble des minéraux carbonatés de la croûte terrestre (Hunt, 1972 ; Falkowski *et al.*, 2000) et que leur temps de résidence y est supérieur à 200 millions d'années (Berner, 2004) ; ce qui montre l'impressionnante capacité du système Terre à créer et à stocker des carbonates. Dans les roches sédimentaires, qui sont peu réactives, la minéralisation du CO<sub>2</sub> est lente (plusieurs centaines et même milliers d'années), voire impossible. La réaction est nettement plus rapide dans les roches mafiques (ferromagnésiennes) ou ultra mafiques, comme les basaltes ou les péridotites. En 2016, le projet européen CarbFix a démontré que 95 % du CO<sub>2</sub> injecté par l'installation pilote d'Hellisheiði, en Islande, ont été minéralisés en moins de deux ans (Matter *et al.*, 2016).

Sur la base des possibilités que nous avons vues, deux principales approches sont développées aujourd'hui pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : l'injection de scCO<sub>2</sub> dans des formations sédimentaires et la carbonatation de roches réactives du sous-sol par injection d'eau chargée en CO<sub>2</sub>. Elles sont représentées sur la Figure 1.

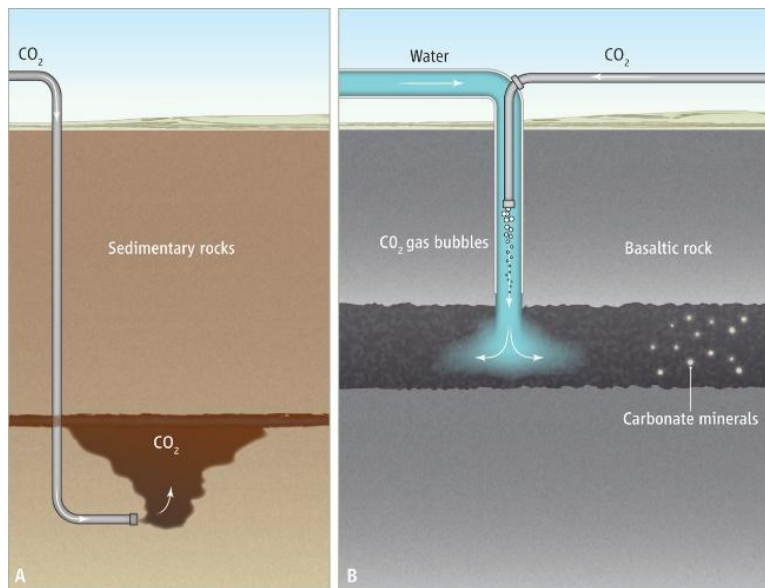


Figure 1 : Les deux approches actuelles pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : a) stockage dans des formations sédimentaires : le CO<sub>2</sub> est injecté sous forme supercritique et piégé par une roche de couverture imperméable ; b) la méthode CarbFix : le CO<sub>2</sub> est dissout dans de l'eau concomitamment à son injection dans un réservoir basaltique où il réagit avec la roche hôte pour former des carbonates – Illustration reproduite avec la permission de Matter *et al.*, 2016.

## Sureté et permanence du stockage par minéralisation

Le stockage du CO<sub>2</sub> par minéralisation in-situ repose sur la précipitation de minéraux carbonatés. Une fois formés, ces minéraux sont stables et immobiles (figure 2). Avec cette méthode, il n'y a donc aucun risque de fuite, ni de retour du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cette garantie de sécurité est un des points forts de la minéralisation, car elle permet non seulement de réduire les coûts de la surveillance du site pendant et après la phase d'injection, mais aussi de faciliter l'acceptation par le public des projets de stockage.

Les carbonates sont formés en profondeur et sont stables thermodynamiquement. Comme évoqué *supra*, le CO<sub>2</sub> minéralisé est alors stocké pour très longtemps, potentiellement pendant plusieurs millions d'années.



Figure 2 : Cristaux de calcite observés dans les pores d'une roche prélevée sur le site de CarbFix – Source : Wikicommons.

## Capacités de stockage disponibles

L'estimation des capacités de stockage des réservoirs souterrains est un exercice difficile. Aujourd'hui, la plupart des estimations disponibles sont théoriques, car nous manquons de données détaillées sur nombre de réservoirs.

Les capacités de stockage qu'offrent les formations sédimentaires sont estimées, au niveau mondial, entre 8 000 et 35 000 GtCO<sub>2</sub> (Kelemen et al., 2019), dont 4 000 à 23 000 GtCO<sub>2</sub> pour les aquifères salins profonds et environ 1 000 GtCO<sub>2</sub> pour les gisements d'hydrocarbures (De Coninck et Benson, 2014).

En ce qui concerne la minéralisation, les basaltes sont les roches les plus prometteuses avec un potentiel estimé entre 1 000 et 250 000 GtCO<sub>2</sub> sur les continents (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2019) et entre 100 000 et 250 000 GtCO<sub>2</sub> sous les océans (Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Malgré l'incertitude que comportent ces estimations, il est clair que les capacités mondiales de stockage de CO<sub>2</sub> dépassent largement les besoins identifiés pour parvenir à une atténuation du changement climatique.

Bien qu'il n'existe pas encore d'estimations chiffrées de leurs capacités, certaines régions de France, comme le Massif central, la Corse (Bodéan et al., 2006), la Réunion, les Antilles, la Polynésie ou les îles Kerguelen (Goldberg et al., 2013), pourraient présenter un réel potentiel en matière de stockage du CO<sub>2</sub> par minéralisation.

## Deux projets pilotes

Deux projets phares ont porté le développement du stockage par minéralisation in-situ sur les dix dernières années pour démontrer sa faisabilité.

Le projet CarbFix a débuté en 2007, en Islande, pour y développer une approche innovante de capture du CO<sub>2</sub> et du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) en les dissolvant dans de l'eau ensuite directement injectée en profondeur pour les minéraliser. Cette approche apporte plusieurs améliorations par rapport aux technologies existantes :

- une réduction significative des coûts de traitement des fumées de la centrale d'Hellisheiði grâce au procédé simplifié de capture des gaz, notamment pour le H<sub>2</sub>S dont la capture par absorbants alcalins est chère et les émissions très réglementées ;
- une injection des gaz sous forme d'une dissolution dans l'eau, laquelle permet d'éviter le problème de remontée des gaz moins denses et d'accélérer la réaction avec la roche hôte.

Lors d'une première opération réalisée en 2012, 175 t de CO<sub>2</sub> ont été injectées dans des formations ciblées de laves basaltiques entre 400 et 800 m de profondeur (Gislason et al., 2018). Le suivi de traceurs chimiques et isotopiques a permis de démontrer que le CO<sub>2</sub> injecté avait pu être minéralisé à plus de 95 % moins de deux ans après son injection (Matter et al., 2016).

Une des limites de la méthode CarbFix est sa consommation importante d'eau douce : environ 25 t d'eau douce sont nécessaires pour dissoudre et injecter une tonne de CO<sub>2</sub>. Une centrale comme celle d'Hellisheiði génère des fluides géothermaux et des condensats qui peuvent être réutilisés à cette fin. Mais dans d'autres systèmes, la disponibilité en eau douce pourrait représenter un obstacle. Une étude récente suggère cependant qu'il serait possible d'obtenir des taux de minéralisation comparables à ceux observés dans le cadre du projet CarbFix en utilisant de l'eau de mer à la place de l'eau douce (Voigt et al., 2021), ce qui laisse entrevoir tout le potentiel sous-marin de la minéralisation.

Le deuxième projet pilote a été le Wallula basalt pilot demonstration project initialement financé par le Department of Energy des États-Unis. Lancé en 2009 avec le forage d'un puit, il prévoyait l'injection de scCO<sub>2</sub> dans deux couches basaltiques poreuses du Columbia River Basalt dans l'État de Washington. Près de 1 000 tonnes de scCO<sub>2</sub> ont été injectées dans le réservoir à l'été 2013 (McGrail et al., 2017). Le choix d'injecter le CO<sub>2</sub> sous forme supercritique imposait la présence d'une roche de couverture imperméable pour empêcher la remontée naturelle du gaz. Dans cette approche, le CO<sub>2</sub> est d'abord piégé dans le réservoir par la roche de couverture, puis il réagit rapidement avec la roche hôte pour former des carbonates, comme dans le cas du projet CarbFix (voir la figure 3).

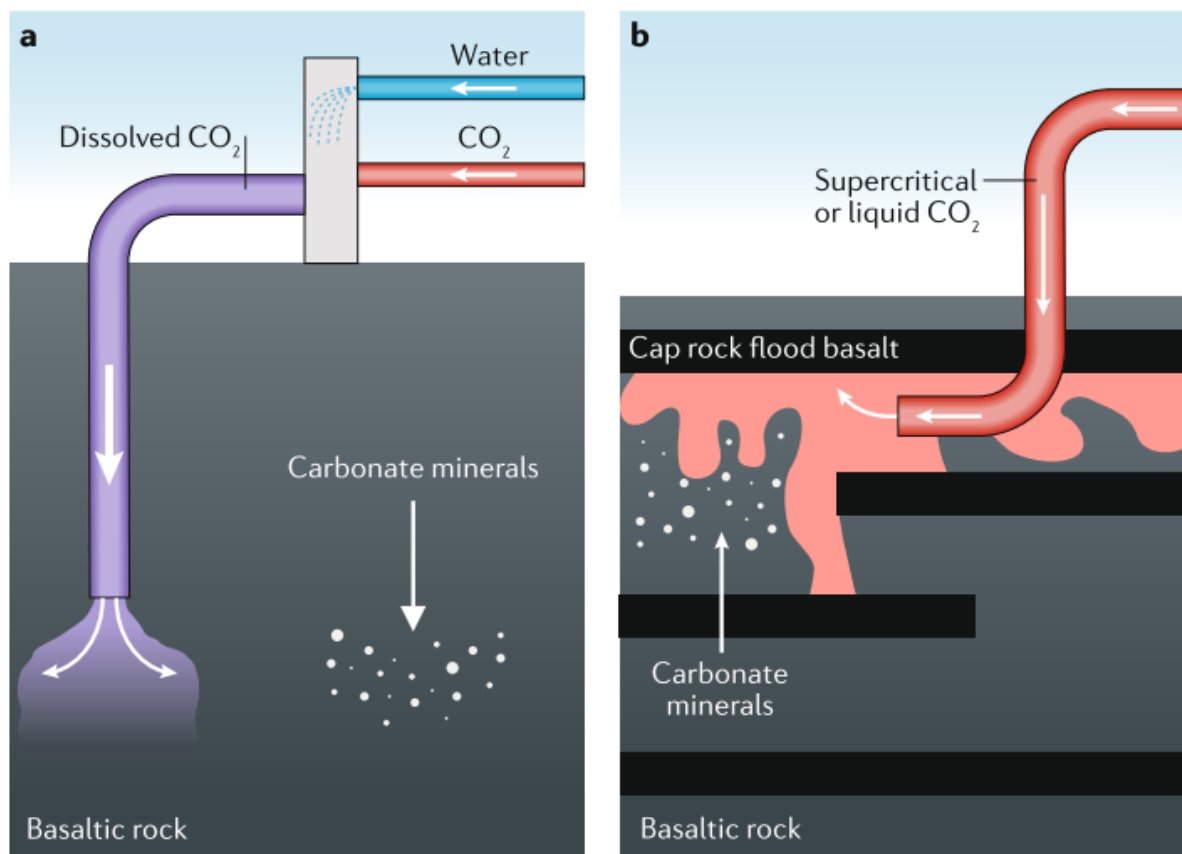


Figure 3 : Résumé des deux projets pilotes de minéralisation in-situ : a) dans le projet CarbFix, le CO<sub>2</sub> arrive dans le réservoir complètement dissout ; b) dans le projet Wallula, le CO<sub>2</sub> est injecté sous forme supercritique (illustration reproduite avec la permission de Snæbjörnsdóttir *et al.*, 2020).

En comparant les données avant et après injection, et notamment les carottes rocheuses prélevées dans le réservoir, ce second projet a pu démontrer la minéralisation du CO<sub>2</sub> injecté, principalement sous forme d'ankérite (McGrail *et al.*, 2017). Une publication récente de White *et al.* (2020) a estimé à 65 % la proportion de CO<sub>2</sub> minéralisé dans les deux années suivant l'injection.

Le projet Wallula a pris fin en 2015, faute de financement ; son puits d'injection a été condamné. Néanmoins, ce projet a marqué le début du développement de la minéralisation en démontrant que l'injection de CO<sub>2</sub> sous forme supercritique permet également une minéralisation efficace, ce qui offre plus de possibilités techniques de mise en œuvre de cette méthode de stockage.

De son côté, le projet CarbFix s'est poursuivi et est passé à l'échelle industrielle en 2014. Les volumes injectés ont augmenté progressivement pour atteindre environ 20 000 tCO<sub>2</sub>/an en 2021, ce qui représente près de 55 % des émissions de la centrale d'Hellisheiði. L'équipe CarbFix poursuit actuellement cette montée en puissance avec pour objectif de capter et de stocker près de 95 % des émissions de la centrale au cours des prochaines années.



En 2017, CarbFix a démarré un partenariat avec la compagnie suisse ClimeWorks pour tester le couplage du stockage géologique par minéralisation avec un module de capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'air. Le premier module installé avait une capacité de captage de 50 tCO<sub>2</sub>/an. Le succès de ce couplage a permis de voir plus grand : en septembre 2021, les deux partenaires ont ainsi inauguré Orca, la plus grande centrale à émissions négatives du monde, avec une capacité de 4 000 tCO<sub>2</sub>/an éliminées de l'atmosphère<sup>6</sup>.

Par ailleurs, CarbFix prépare l'ouverture d'un *hub* maritime à l'est de l'Islande (le terminal Coda) pour accueillir du CO<sub>2</sub> capté dans le nord de l'Europe et le minéraliser dans le sous-sol islandais. La capacité annoncée est de 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à l'horizon 2030. L'ouverture de ce *hub* est prévue pour 2025<sup>7</sup>.

Le succès de CarbFix a fait des émules et d'autres projets ont vu le jour. Des projets de recherche sur la minéralisation *in situ* sont en cours en Suède, en Arabie saoudite, en Inde et au Brésil. À Oman, une *start-up* nommée 44.01<sup>8</sup> a été créée en 2020 pour commercialiser le stockage du CO<sub>2</sub> par minéralisation dans des péridotites. Comme dans le cas d'Orca, cette société a conclu, elle aussi, un partenariat avec ClimeWorks concernant la partie capture directe du CO<sub>2</sub> afin de commercialiser des émissions négatives.

Le processus de minéralisation du CO<sub>2</sub> peut également s'appliquer dans d'autres situations, notamment en surface : actuellement, des équipes travaillent sur la carbonatation *ex-situ* de matières mafiques disponibles en surface, comme les résidus miniers (Power et al., 2020), l'olivine<sup>9</sup> ou même du béton<sup>10</sup>. Ces approches devraient pouvoir offrir des possibilités de stockage au niveau local et à des coûts attractifs mais à plus petite échelle (Snæbjörnsdóttir et al., 2020).

## Coûts du stockage

Aujourd'hui, le coût du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> est largement déterminé par les coûts de captage, qui oscillent entre 15 US\$/tCO<sub>2</sub> pour les processus industriels générant des fumées concentrées et plus de 340 US\$/tCO<sub>2</sub> pour la capture directe dans l'atmosphère (DAC) (IEA, 2021a).

Bien que les données de terrain soient encore peu abondantes, les estimations de coûts pour le stockage de CO<sub>2</sub> dans des formations sédimentaires, en incluant les coûts liés à l'achat des terres, aux demandes de permis, au forage des puits, à l'injection, à la surveillance des sites, à l'entretien des installations et autres coûts afférents, varient entre 1 et 18 US\$/tCO<sub>2</sub> (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2019). Les variations s'expliquent principalement par les caractéristiques des réservoirs (profondeur, accessibilité, sur terre ou en mer...) et leur capacité totale.

---

<sup>6</sup> <https://climeworks.com/orca>

<sup>7</sup> <https://www.carbfix.com/codaterminal>

<sup>8</sup> <https://4401.earth>

<sup>9</sup> <https://www.projectvesta.org>

<sup>10</sup> <https://www.carboncure.com>

Dans le cas de la minéralisation *in situ*, les estimations vont de 20 à 30 US\$/tCO<sub>2</sub> (Kelemen et al., 2019), CarbFix affichant pour sa part un coût de 25 US\$/tCO<sub>2</sub> capture et stockage compris. Mais pour cette dernière méthode de stockage, les données de terrain manquent encore pour affiner les estimations ; CarbFix bénéficie en outre d'un contexte très favorable. Il faut donc apprécier ces estimations avec prudence. Les coûts seront probablement supérieurs pour des opérations en mer.

## Messages clefs

Le stockage géologique du CO<sub>2</sub> par minéralisation est une technologie démontrée et mûre qui est entrée dans sa phase commerciale en Islande et dans le sultanat d'Oman. Elle peut être déployée à grande échelle et affiche une capacité quasi illimitée sous les océans ; l'Europe est actuellement leader sur ce secteur avec CarbFix. Elle a aussi l'avantage de ne pas entrer en compétition avec le stockage souterrain temporaire d'autres gaz, comme le méthane ou l'hydrogène.

On constate cependant une absence presque totale de mentions de cette méthode dans des documents officiels comme les rapports du GIEC ou du BRGM. De la même façon, seules les méthodes d'émissions négatives basées sur les écosystèmes naturels sont considérées dans le récent corpus de propositions législatives « FitFor55 » de l'Union européenne, ce qui montre une mauvaise perception du législateur du niveau réel de maturité de la technologie et même de la croissance des marchés d'échange volontaire de crédits carbone liés aux émissions négatives.

On observe également un retard inquiétant dans le développement des réservoirs géologiques (toutes techniques confondues) par rapport au reste de l'écosystème de capture et de stockage du CO<sub>2</sub>. Le stockage géologique peut être perçu comme une technologie mûre, largement disponible et économiquement abordable, mais difficile à faire accepter par l'opinion publique, ce qui a pu pousser les opérateurs et les responsables politiques à remettre son développement à plus tard. Le problème est que développer un réservoir géologique prend du temps. En moyenne sept à dix ans sont nécessaires entre la conception d'un projet et sa mise en service<sup>11</sup>. Aujourd'hui, les secteurs de la capture et de la valorisation du CO<sub>2</sub> sont très dynamiques avec des investissements importants<sup>12</sup>, de nombreuses *start-ups* et des programmes de R&D publics en croissance<sup>13</sup>. Le risque est grand que d'ici deux à six ans, l'industrie de la capture, portée par des investissements conséquents et un prix du carbone élevé<sup>14</sup>, soit en capacité de capturer des centaines de milliers, voire des millions de tonnes de CO<sub>2</sub> sans avoir accès aux réservoirs géologiques nécessaires au stockage de tout ce carbone.

Enfin, il y a le piège de la perception négative de ces projets de stockage par le public. Un manque de transparence ou une mauvaise communication peuvent ralentir le développement d'un projet, voire le faire avorter comme cela a déjà été le

---

<sup>11</sup> [https://etn.global/wp-content/uploads/2017/11/setplan\\_doi\\_ccus-final.pdf](https://etn.global/wp-content/uploads/2017/11/setplan_doi_ccus-final.pdf)

<sup>12</sup> <https://stripe.com/newsroom/news/spring-21-carbon-removal-purchases>

<sup>13</sup> <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-24-million-capture-carbon-emissions-directly-air>

<sup>14</sup> <https://www.ft.com/content/c1a78427-f3d5-4b4f-9878-c3e1dffee2ba>

cas aux Pays-Bas avec le projet de Barendrecht, ou en Allemagne, pour le projet européen de démonstration Jämschwalde (De Coninck et Benson, 2014).

## Bibliographie

BENSON S. M. *et al.* (2005), "Underground geological storage", in IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, pp. 195-276.

BERNER R. A. (2004), *The Phanerozoic Carbon Cycle: CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>*, Oxford University Press, USA (OUP E-Books). Available at: <https://books.google.fr/books?id=YHw8DwAAQBAJ>

BODÉLAN F. *et al.* (2006), *Carbonatation minérale – Potentiels in et ex situ*, analyse et expérimentation en laboratoire.

BRADY P. V. (1991), "The effect of silicate weathering on global temperature and atmospheric CO<sub>2</sub>", *Journal of Geophysical Research* 96(B11), pp. 18,101-18 et 106, doi: 10.1029/91jb01898.

De CONINCK H. & BENSON S. M. (2014), "Carbon dioxide capture and storage: Issues and prospects", *Annual Review of Environment and Resources* 39, pp. 243-270, doi: 10.1146/annurev-environ-032112-095222.

CZERNICHOWSKI-LAURIOL I. (2020), « Captage et stockage du CO<sub>2</sub> : le puits de carbone géologique », *Les Comptes-rendus – Géoscience* 352(4-5), pp. 383-399, doi: <https://doi.org/10.5802/crgeos.20>

FALKOWSKI P. *et al.* (2000), "The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system", *Science* 290(5490), pp. 291-296, doi: 10.1126/science.290.5490.291.

GISLASON S. R. *et al.* (2018), "A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase", *Energy Procedia* 146, Elsevier B. V., pp. 103-114, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.014.

GOLDBERG D. S. *et al.* (2013), "Co-location of air capture, subseafloor CO<sub>2</sub> sequestration, and energy production on the Kerguelen plateau", *Environmental Science and Technology* 47(13), pp. 7521-7529, doi: 10.1021/es401531y.

HUNT J. M. (1972), "Distribution of Carbon in Crust of Earth", *AAPG Bulletin* 56(2837), pp.2273-2277, doi: 10.1306/819a4206-16c5-11d7-8645000102c1865d.

IEA (2021a), "Is carbon capture too expensive?", Paris. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>.

IEA (2021b), "Net Zero by 2050", Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

KELEMEN P. *et al.* (2019), "An Overview of the Status and Challenges of CO<sub>2</sub> Storage in Minerals and Geological Formations", *Frontiers in Climate* 1, pp. 1-20, doi: 10.3389/fclim.2019.00009.

MATTER J. M. *et al.* (2016), "Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions", *Science* 352(6291), pp. 1312LP-1314, doi: 10.1126/science.aad8132.

McGRAIL B. P. *et al.* (2017), "Wallula Basalt Pilot Demonstration Project: Post-injection Results and Conclusions", *Energy Procedia* 114, Elsevier B. V., November 2016, pp. 5783-5790, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1716.

MIOCIC J. M. *et al.* (2019), "420,000 Year Assessment of Fault Leakage Rates Shows Geological Carbon Storage Is Secure", *Scientific Reports* 9(1), pp. 1-9, doi: 10.1038/s41598-018-36974-0.

National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2019), *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: a research agenda*, Washington DC, The National Academies Press, doi: 10.17226/25259.

POWER I. M. *et al.* (2020), "Prospects for CO<sub>2</sub> mineralization and enhanced weathering of ultramafic mine tailings from the Baptiste nickel deposit in British Columbia, Canada", *International Journal of Greenhouse Gas Control* 94, Elsevier, May 2019, p. 102895, doi: 10.1016/j.ijggc.2019.102895.

ROGELJ J. *et al.* (2018), "Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development", in "Global Warming of 1.5°C", an IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathw, IPCC special report Global Warming of 1.5°C, p. 82. Available at: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_Chapter2\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf).

SNÆBJÖRNSDÓTTIR S. Ó. *et al.* (2020), "Carbon dioxide storage through mineral carbonation", *Nature Reviews Earth & Environment*, doi: 10.1038/s43017-019-0011-8.

VOIGT M. *et al.* (2021), "An experimental study of basalt–seawater–CO<sub>2</sub> interaction at 130°C", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 308, pp. 21-41, doi: 10.1016/j.gca.2021.05.056.

WHITE S. K. *et al.* (2020), "Quantification of CO<sub>2</sub> Mineralization at the Wallula Basalt Pilot Project", *Environmental Science & Technology*, doi: 10.1021/acs.est.0c05142.