RECHERCHE

Screening géologique des formations rocheuses pour la minéralisation du CO_2 en Suisse

Résultats du projet CARBOSTORE-CH

Auteur principal : Redaktion SASEG · **DOI:** 10.1234/geonews.2025.001
https://geonews.southvision.de/fr/beitrag/screening-geologique-mineralisation-co2-suisse/



Dans le cadre du projet CARBOSTORE-CH, les possibilités d'application de la minéralisation du CO_2 dans des formations rocheuses hôtes naturelles en Suisse ont été étudiées sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), avec le soutien financier de l'Association suisse des exploitants d'installations de traitement des déchets (ASED/VBSA). L'étude comprend l'identification de minéraux réactifs et, sur cette base, la détermination des roches hôtes potentiellement réactives en Suisse.

Abstract

As part of the CARBOSTORE-CH project, the potential for CO_2 mineralization of natural rock formations in Switzerland was investigated on behalf of the Swiss Federal Office of

Energy (SFOE) and with the financial support of the Association of Operators of Swiss Waste Utilisation Plants (VBSA). The investigation includes the identification of reactive minerals and, derived from this, the definition of potentially reactive host rocks in Switzerland.

A. Florentin Ladner[1], Daniela van den Heuvel[2], Larryn W. Diamond[2], Moira Arnet[1]
[1] GEOTEST AG, Freilager-Platz 3, CH-4142 Münchenstein
[2] Institut de géologie, Université de Berne, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Berne

1 Introduction

Les résultats du projet CARBOSTORE-CH ont été présentés lors de la 91e assemblée annuelle de la SASEG à Bâle en 2025. Ce projet a été réalisé sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), avec le soutien financier de l'Association suisse des exploitants d'installations de traitement des déchets (ASED/VBSA), et a étudié les possibilités d'application de la minéralisation du CO_2 dans des formations rocheuses hôtes naturelles en Suisse. GEOTEST AG et le Rock-Water Interaction Group de l'Université de Berne ont formé un consortium à cet effet, GEOTEST AG assurant la direction générale du projet. L'ASED a agi en tant que partenaire industriel. Le projet a été accompagné par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), swisstopo et cemsuisse. Cet article résume les principaux enseignements du projet CARBOSTORE-CH. Le rapport final détaillé est publié et accessible au public dans la banque de données de recherche ARAMIS de l'administration fédérale (Ladner et al., 2023).

2 Stockage géologique du CO_2 sous forme de fluide

Le sous-sol géologique offre de nombreuses possibilités de stocker le CO_2 à long terme et en toute sécurité. Plusieurs de ces options sont liées à l'exploitation en cours ou passée de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) (Fig. 1).

Les réservoirs de pétrole et de gaz déjà épuisés peuvent être directement remplis de CO_2. Ces réservoirs ont démontré qu'ils disposent des perméabilités et des volumes nécessaires et qu'ils restent étanches sur des échelles de temps géologiques ; ils constituent donc des formations idéales pour la séquestration du CO_2. La séquestration du CO_2 intervient également comme sous-produit de la production d'hydrocarbures par récupération assistée du pétrole (*enhanced oil recovery*) : l'injection de CO_2 mobilise les restes de pétrole et de

gaz du réservoir, tandis que le CO_2 injecté reste dans le sous-sol. Une démarche similaire est appliquée pour la récupération assistée du méthane de houille (*enhanced coal bed methane recovery* ; p. ex. White et al., 2005) : le CO_2 est pompé dans des veines de charbon non exploitables, où il remplace le méthane adsorbé à la surface du charbon. On mobilise ainsi du gaz naturel qui ne peut pas être produit par des méthodes conventionnelles, tout en séquestrant du CO_2 dans le sous-sol. La sorption du CO_2 sur le charbon peut aussi avoir lieu sans production de méthane dans des veines profondes non exploitables et sert alors exclusivement à la séquestration du CO_2 (Fig. 1).

Toutes ces méthodes sont appliquées dans différentes régions du monde riches en ressources fossiles (p. ex. États-Unis, Canada, Chine, Pologne). En Suisse, en revanche, ces options de stockage ne sont guère pertinentes, aucun gisement important d'hydrocarbures ou de charbon n'étant connu (Leu, 2012). Un seul champ de gaz naturel, très restreint, a été exploité à ce jour en Suisse, par le forage profond de Finsterwald dans le canton de Lucerne, entre 1985 et 1994 ; environ 74 millions de m^3 de gaz ont été extraits au total (Lahusen et al., 1995). Le forage a ensuite été rebouché.

En Suisse, des gisements de charbon avec des veines atteignant 4 m d'épaisseur sont connus grâce au forage de Weiach, dans le fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse. Pini et al. (2010) ont étudié le potentiel de sorption de ces veines et conclu que leur aptitude à la séquestration du CO_2 est plutôt faible. De nombreux autres fossés permo-carbonifères sont présumés dans le sous-sol suisse ; on ignore toutefois s'ils contiennent du charbon et, le cas échéant, quelles sont les propriétés des veines.

Une option de séquestration plus prometteuse pour la Suisse est le stockage de CO_2 supercritique dans les aquifères salins du Plateau suisse. Cette option a été étudiée en détail dans le cadre d'un projet de l'OFEN (Diamond et al., 2010). L'étude de potentiel associée (Chevalier et al., 2010) repose sur des critères purement géologiques et sur des données issues de plus de 150 publications scientifiques ainsi que sur des données non publiées de l'exploration d'hydrocarbures en Suisse. Ces données ont été évaluées à l'aide du schéma d'évaluation modifié pour le stockage du CO_2 dans les aquifères profonds (Chadwick et al., 2008). Il est apparu que les roches sédimentaires du bassin molassique et, dans une certaine mesure, les formations équivalentes du Jura présentent un potentiel modéré à élevé pour la séquestration du CO_2. Au moins quatre réservoirs gréseux ou carbonatés sont présents dans la gamme de profondeur souhaitée (800–2500 m) dans de grandes parties du bassin molassique et sous le Jura. En considérant l'ensemble des

critères géologiques, la région Fribourg – Olten – Lucerne présente en particulier un potentiel de séquestration > 0,6 (maximum = 1). Le volume de stockage théorique dans cette zone est d'environ 2'680 Mt de CO_2. Le résultat de cette étude bibliographique est donc prometteur, mais doit être confirmé ou, le cas échéant, ajusté par des investigations plus détaillées. Pour le Muschelkalk triasique, le potentiel dans la partie centrale à orientale du bassin molassique a déjà été examiné de plus près (Diamond et al., 2019). Il s'est avéré que les propriétés pétrophysiques de la formation sont, en profondeur, moins bonnes (moins poreuses et moins perméables) que prévu. Le potentiel réel devrait donc être inférieur à celui initialement déterminé par Chevalier et al. (2010).

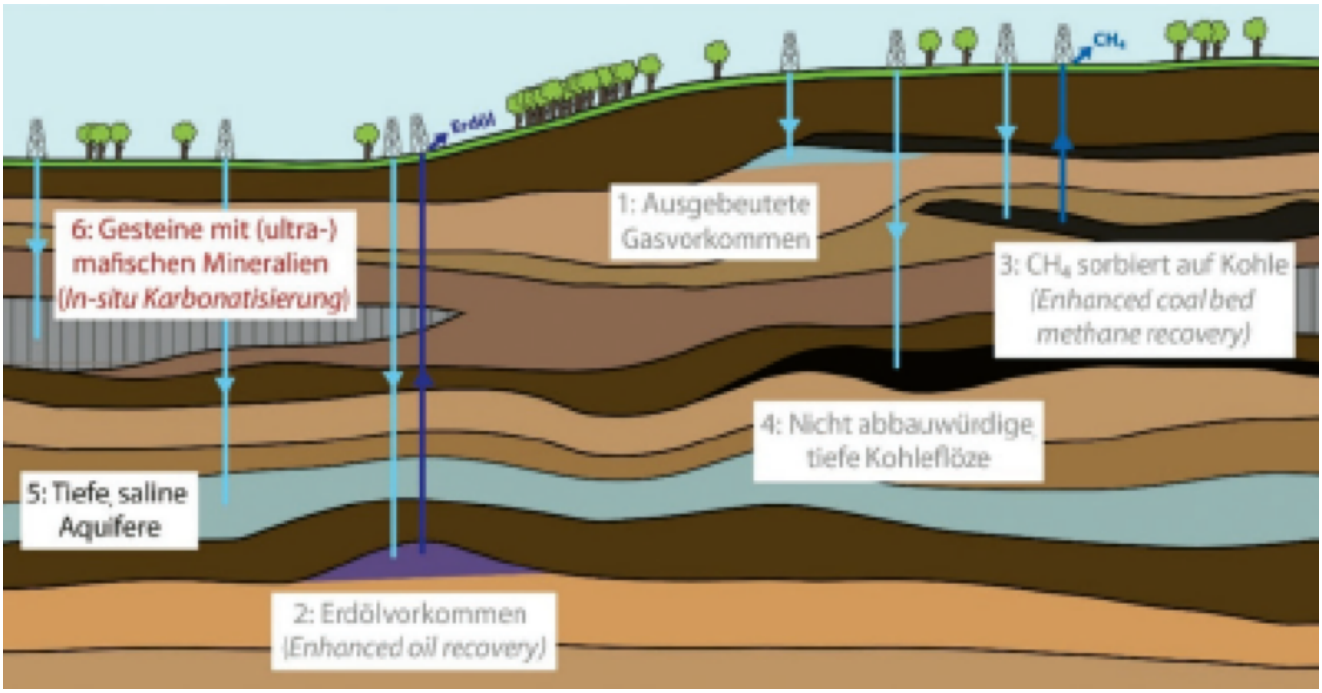


Fig. 1 : Options de séquestration géologique du CO_2. Pour les options 1 à 4, le potentiel en Suisse est faible en raison de l'absence de ressources fossiles (voir texte). Le potentiel de stockage du CO_2 dans les aquifères salins profonds a été étudié en détail par Chevalier et al. (2010). La carbonatation in situ (option 6) fait l'objet de la présente étude.







3 Stockage géologique du CO_2 sous forme de carbonate solide (minéralisation du CO_2)

Deux méthodes de minéralisation du CO_2 avec des minéraux mafiques / ultramafiques sont au centre de l'attention :

Tab. 1 : Méthodes de minéralisation du CO_2.

Méthode	Procédé
Ex situ	Extraction, broyage et transport de minéraux mafiques et ultramafiques réactifs vers un site où le CO_2 capté est disponible sous forme de fluide. La carbonatation a ensuite lieu de manière accélérée, dans des conditions contrôlées (pH, température et pression), dans un réacteur conçu à cet effet.
In situ	Le CO_2 est injecté par forage dans une formation rocheuse contenant des minéraux mafiques et ultramafiques réactifs. En présence d'une perméabilité naturelle, le CO_2 circule dans la roche et est minéralisé.

Réactions chimiques de la minéralisation du CO_2

Le principe fondamental de la minéralisation ou carbonatation du CO_2 (in situ ou ex situ) décrit la formation de minéraux carbonatés à partir de CO_2, d'eau et de cations bivalents (p. ex. Ca^{2+}) libérés d'une formation géologique ou d'une roche extraite. Ce processus comprend trois étapes et se déroule naturellement dans la nature.

Étape 1

Le CO_2 gazeux (CO_2(g)) se dissout dans l'eau (CO_2(aq)) et forme avec l'acide carbonique l'équilibre suivant :

$$CO_2(g) \leftrightarrow CO_2(aq) \quad (1)$$

$$CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3(aq)$$

Étape 2

Les minéraux silicatés présents dans le réservoir – ici l'olivine magnésienne à titre d'exemple – sont dissous par l'acide carbonique et libèrent des cations bivalents. Ce processus est favorisé par une baisse du pH provoquée par la dissolution du CO_2 dans l'eau de formation :

$$Mg_2SiO_4 + 4\ H_2CO_3(aq) \leftrightarrow 2\ Mg^{2+} + 4\ HCO_3^-(aq) + H_4SiO_4(aq) \quad (2)$$

Étape 3

Les cations se combinent aux ions bicarbonate (HCO_3^-) présents en solution et précipitent sous forme de minéraux carbonatés solides – dans cet exemple la magnésite ($MgCO_3$) :

$$HCO_3^-(aq) + Mg^{2+} \leftrightarrow MgCO_3(s) + H^+(aq) \quad (3)$$

La combinaison de ces trois étapes donne, pour la carbonatation de l'olivine magnésienne, l'équation de réaction chimique suivante :

$$Mg_2SiO_4 + 2\ CO_2 + 2\ H_2O \leftrightarrow 2\ MgCO_3(s) + H_4SiO_4 \quad (4)$$

Le sous-produit H_4SiO_4 est inoffensif et précipite normalement sous forme de gel amorphe qui se déshydrate avec le temps en quartz (SiO_2). Par analogie avec l'olivine magnésienne, tous les minéraux contenant des cations bivalents (mais pas de CO_2) peuvent théoriquement se carbonater. Les cations les plus fréquents sont Ca, Mg et Fe, qui forment les minéraux carbonatés calcite ($CaCO_3$), magnésite ($MgCO_3$), dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) et sidérite ($FeCO_3$). Dans certaines conditions (T < 65 °C), des carbonates hydratés tels que l'hydromagnésite ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$) ou la nesquehonite ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$) se forment à la place. D'autres cations bivalents (p. ex. Mn, Sr, Zn ou Pb) peuvent également former des

minéraux carbonatés, mais ne sont pas présents dans la plupart des formations rocheuses en concentrations suffisantes pour présenter un intérêt pour la carbonatation. Certains autres cations très fréquents dans les roches (en particulier Si et Al) ne forment pas de minéraux carbonatés stables. Il en résulte que les roches présentant les teneurs les plus élevées en Ca, Mg et Fe et les plus faibles en CO_2 (toutes les valeurs en base molaire, et non massique) sont les matières premières les mieux adaptées à la carbonatation. Les roches optimales sont donc caractérisées par mol(Ca+Mg+Fe) – mol(CO_2) ≈ 1.

D'un point de vue chimique, les roches les mieux adaptées à la carbonatation sont les roches magmatiques mafiques et ultramafiques (surtout le basalte et la péridotite), leurs équivalents métamorphiques (p. ex. schistes verts et serpentinites) ainsi que certaines formations sédimentaires (p. ex. grès riches en glauconite ou en hématite ; Hills et al., 2020).

Avantage de la minéralisation du CO_2 dans les roches mafiques et ultramafiques

L'avantage de la minéralisation du CO_2 réside dans la cinétique des réactions chimiques. Avec les roches mafiques et ultramafiques, celles-ci se déroulent plusieurs fois plus vite que, par exemple, lors de la séquestration du CO_2 dans les aquifères salins. Les aquifères salins exigent donc impérativement une couverture intègre et stable (« caprock ») pour que le CO_2 ne puisse pas s'échapper. Lors de la minéralisation du CO_2 dans les roches mafiques et ultramafiques, le CO_2 est minéralisé si rapidement et amené dans un état stable à l'échelle des temps géologiques que le risque d'une fuite indésirable de CO_2 est plus faible.

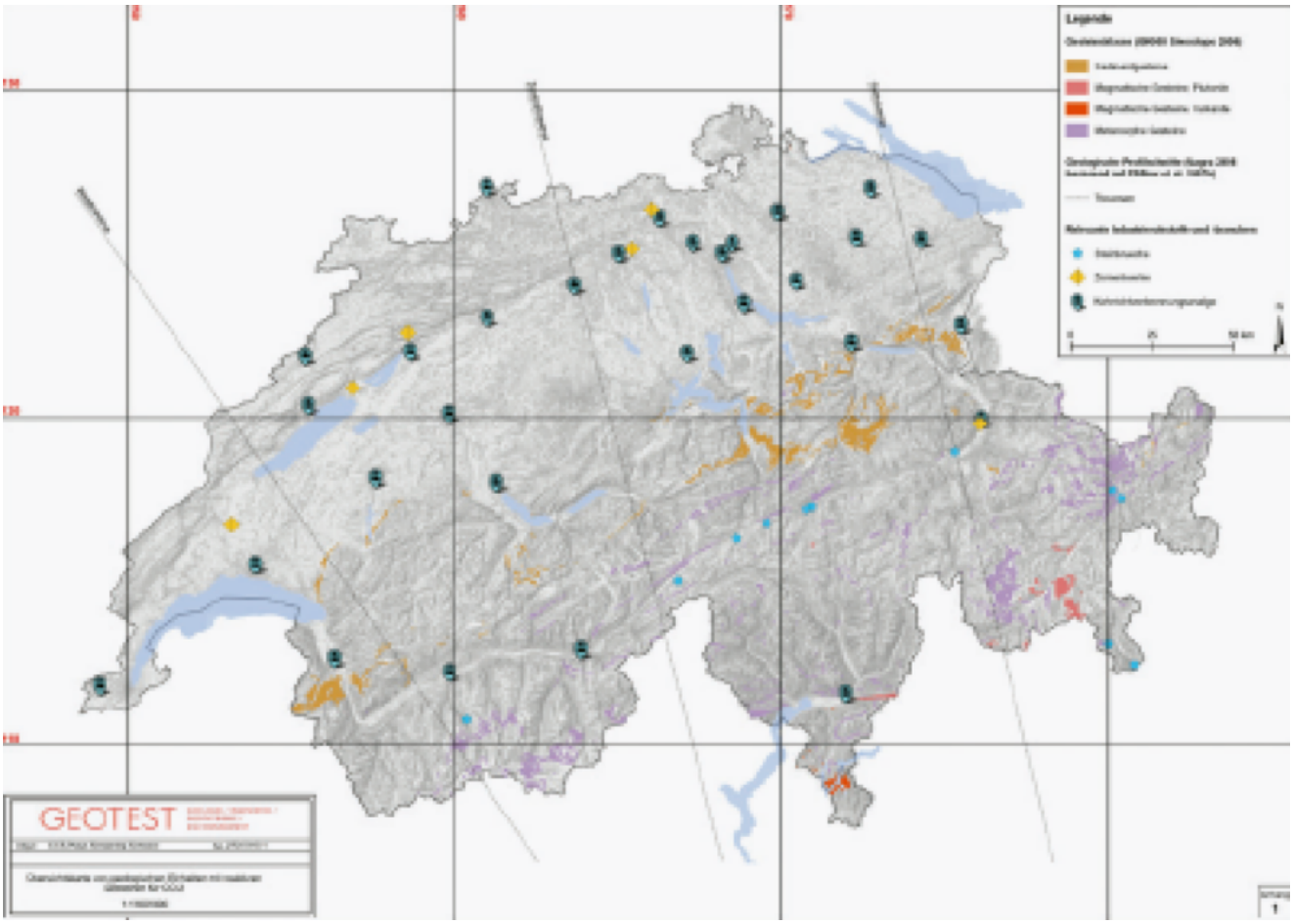


Fig. 2 : Résultat du screening des formations rocheuses pour la minéralisation du CO_2 en Suisse.

Bibliographie

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. 2008: Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects (Vol. 14). British Geological Survey.

Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. 2010: Potential for deep geological sequestration of CO_2 in Switzerland: a first appraisal. Swiss Journal of Geosciences 103, 427–455.

Diamond, L.W. 2019: Revised potential of the Upper Muschelkalk Formation (Central Swiss Plateau) for CO_2 storage and geothermal electricity. Slides of an oral presentation at the SCCER-SoE Annual Conference at EPFL-Lausanne, 4.9.2019.

Diamond, L.W., Leu, W. & Chevalier, G. 2010: Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO_2-Sequestrierung. Rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie OFEN (SI/500325-01 et SI/500386-02), Berne, 23 pp.

Hills, C.D., Tripathi, N. & Carey, P.J. 2020: Mineralization technology for carbon capture, utilization, and storage. Frontiers in Energy Research 8, 142.

Ladner, F., van den Heuvel, D., Arnet, M. & Diamond, L.W. 2023: CARBOSTORE-CH. Geologisches Screening von Gesteinsvorkommen für CO_2-Mineralisation in der Schweiz. Rapport final.

White, S.K., Spane, F.A., Schaef, H.T., Miller, Q.R., White, M.D., Horner, J.A. & McGrail, B.P. 2020: Quantification of CO_2 mineralization at the Wallula Basalt Pilot project. Environmental Science & Technology 54(22), 14609–14616.

Mots-clés: Alpes, Géologie, Recherche, Stockage du CO2