

Les puits de carbone

Quels rôles de la recherche pour accélérer leur développement en France ?

En vue d'éliminer le CO₂ de l'atmosphère, les puits de carbone sont une solution aujourd'hui envisagée comme incontournable. L'augmentation mais aussi la préservation des puits de carbone et, dans certains cas, leur restauration, sont des enjeux prioritaires. A partir d'une étude d'un groupe d'experts de l'alliance ANCRE, 6 grandes catégories de solutions puits de carbone ont été identifiées pour le contexte français : trois catégories de solutions de captage naturel du CO₂ dans des milieux plus ou moins anthropisés, et trois catégories de solutions intégrant des développements technologiques. L'état des lieux, les enjeux, les verrous et les recommandations de recherche pour chacune des solutions ont été mis en évidence dans 7 fiches de synthèse.

Fiche 1.

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers

Fiche 2.

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés

Fiche 3.

Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches

Fiche 4.

Les solutions technologiques de captage de CO₂ d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique

► Fiche 5.

Stockage de CO₂ dans les matériaux via la minéralisation

Fiche 5bis.

Captage et stockage de CO₂ biogénique dans les matériaux biosourcés

Fiche 6.

Les solutions technologiques de captage de carbone recyclé, réusages et stockage long terme

Le rapport complet et l'ensemble des fiches de synthèse sont disponibles sur :

<https://www.allianceenergie.fr/etudes-et-rapports/>

Stockage de CO₂ dans les matériaux via la minéralisation



Etat des lieux

La minéralisation est une voie de stockage du CO₂ dans les matériaux. A partir de CO₂ issu de la bioénergie, de captage atmosphérique ou de fumées industrielles, elle consiste en l'accélération du processus naturel de carbonatation connu pour son rôle dans la régulation du climat. Les cations (Ca, Fe, Mg) des matériaux se combinent avec le CO₂ en présence d'eau pour former des carbonates stables. La minéralisation se conçoit principalement dans des réacteurs ex-situ qui permettent d'en optimiser le rendement. A partir de roches, de résidus miniers ou de déchets, cette voie d'utilisation du CO₂ peut produire des matériaux utiles à valeur commerciale.

Ce domaine est dominé par les USA, la Chine, le Canada, la Corée du Sud, l'Australie et le Royaume-Uni.

Il est en rapide expansion, avec des entreprises commerciales comme Carbon8, Carboncure, Solidia Technologies ou MCI. Une analyse panoramique révèle une maturité élevée de la filière de minéralisation calcique ex-situ, naturellement compatible avec la filière des matériaux de construction.

Techno	Cibles	Produits	Impact carbone	Gisements calciques		Gisements magnésiens	
				Naturels (ex. wollastonite)	déchets (ex. phosphogypse, sidérurgie, déconstruction)	naturels serpentinisés (ex. lizardite)	naturels et déchets non serpentinisés (ex. olivine, scories)
				Ca ²⁺ , Ca(OH) ₂ = intermédiaire de minéralisation		Mg ²⁺ , Mg(OH) ₂ = intermédiaire de minéralisation	
EX-SITU	Matériaux de Construction bas carbone	Granulats	Puits de carbone				
		Additions minérales	Puits de carbone				
		Pièces préfabriquées	Puits de carbone				
		Béton	Puits de carbone				
		Carbonate de Ca / Mg précipité	Puits de carbone				
		Ciment	Carbone évité				
	Autre	Co-récupération de métaux	Puits de carbone				
		Co-production de H ₂	Puits de carbone				
IN-SITU	Stockage		Puits de carbone				

Maturité élevée & développements commerciaux identifiés Recherches identifiées Pas ou peu exploré

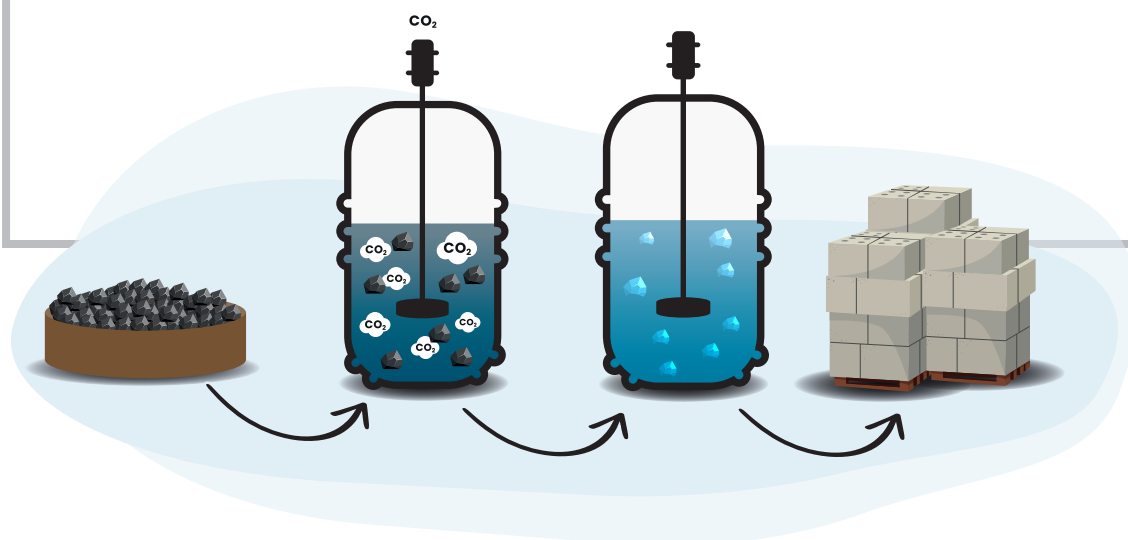
Les acteurs industriels français sont TotalEnergies, LafargeHolcim, Vicat, Air Liquide, Arcelor Mittal, Imerys, EDF, Eramet, Solvay, Suez, Veolia et du côté recherche, CNRS, CEA, BRGM, CSTB, Université Gustave Eiffel, Université de Toulouse (LGC), Université de Lyon (ICBMS), Université de Paris et Université de Lorraine. Le développement de la minéralisation en France se situe essentiellement au niveau de la R&D pour la production de matériaux valorisables à partir de déchets industriels, avec des projets comme CARBOVAL¹, FASTCARB², VITAMINE³ ou VALORCO⁴. Le couplage entre la minéralisation et l'extraction de métaux (Sté MeCaWaRe), la production d'H₂ ou l'épandage d'olivine finement broyée pour le captage de CO₂ atmosphérique figurent parmi les pistes de recherche les plus récentes.

1/ CARBOVAL (Minéralisation de déchets issus de l'industrie minière) porté par l'Université de Toulouse
2/ FASTCARB (Minéralisation de béton recyclé) porté par l'UGE et 22 partenaires
3/ VITAMINE (Minéralisation de déchets de CVE) porté par EDF
4/ VALORCO (Valorisation du CO₂ sidérurgique) porté par ArcelorMittal

Enjeux

Atteindre la neutralité carbone en 2050 implique pour la minéralisation du CO₂ de proposer et déployer des solutions technologiques adaptées au contexte français, au confluent des gisements de matériaux carbonatés, des gisements de CO₂ et des marchés. Le gisement de CO₂ est l'une des clés du développement de la minéralisation. Ce gisement pose des questions en termes de quantité, qualité, disponibilité et valeur économique, durant et après la période de transition qui conduira au mix énergétique totalement décarboné prévu par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). La minéralisation du CO₂ à partir des sous-produits ou déchets industriels concerne essentiellement les déchets de déconstruction (béton, plâtre), les cendres et produits de combustion de charbon ou de pétrole, les produits d'incinération (mâchefers, REFIOM), les résidus de l'industrie minière, les laitiers de la sidérurgie et les résidus stockés en crassiers. Il est évalué que la minéralisation des quelques 2 milliards de tonnes de résidus alcalins produits annuellement dans le monde pourrait permettre, directement et par évitement, de réduire les émissions anthropiques de CO₂ de 12,5% (Pan, SY et al. 2020). Sur la base 2019, il est estimé que le gisement français de déchets carbonatés aurait pu permettre de stocker environ 6 Mt de CO₂⁵. Ce gisement est amené à évoluer dans le temps. Malgré la disparition anticipée de certains déchets d'ici 2050, comme par exemple les cendres et résidus de crassiers, de nouveaux procédés de fabrication qui intègrent la minéralisation du CO₂ pourraient à cet horizon accroître le gisement de matériaux carbonatés au-delà de 20 Mt de CO₂. Cette estimation est fortement associée au secteur de la construction qui a la capacité de faire des ciments/bétons de vrais puits de carbone avec des volumes de CO₂ stockés très importants. La question de la disponibilité d'un CO₂ biogénique, c.à.d. non issu de ressources fossiles, est un point de vigilance.

5/ Estimation à dire d'expert sur la base des déchets carbonatés disponibles (compilation des masses de déchets issus des différentes filières en France, outremer compris)



Verrous

Le développement et le déploiement de filières de minéralisation du CO₂ en France (6 à 20 Mt de CO₂ équivalent) repose sur l'accès à et la mise en synergie des :

GISSEMENTS DE CO₂

(non issus du fossile) constants dans le temps, à proximité de gisements de matériaux, avec une teneur élevée sans éléments pénalisants.

GISSEMENTS DE MATÉRIAUX CARBONATÉS

en quantité suffisante, de qualité constante, à proximité des sources de CO₂.

MARCHÉS CIBLES POUR DES PRODUITS

à valeur ajoutée (ex. matériaux de construction, Carbonate de Calcium Précipité, agents ignifuges, charges minérales, impression 3D).

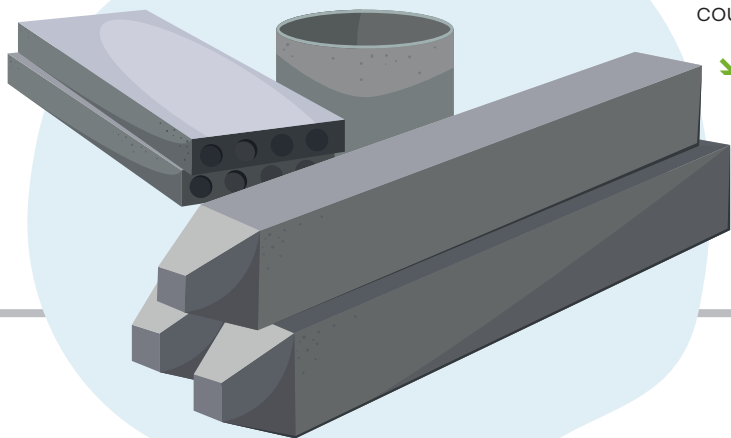
Il existe peu d'acteurs français sur le développement des technologies de minéralisation du CO₂, et pas encore d'acteurs commerciaux opérant des pilotes ou démonstrateurs de taille industrielle sur le territoire national. De par le caractère local des gisements (CO₂, déchets) et marchés associés, la minéralisation du CO₂ paraît adaptée à l'échelle des PME. Les filières de minéralisation doivent impérativement s'appuyer sur l'évaluation systémique du bénéfice économique et environnemental sur le territoire où leur déploiement est envisagé. La valorisation des coproduits de la minéralisation (ex. H₂, métaux) est un levier supplémentaire pour soutenir le développement économique de la minéralisation du CO₂.

Actions

Les actions prioritaires pour accompagner le déploiement en France de filières de minéralisation du CO₂ relèvent de toutes les échelles de TRL, depuis la recherche jusqu'au déploiement industriel.

Recommandations de recherche

- Enrichir les bases de données thermodynamiques et cinétiques pour la quantification du potentiel de minéralisation des gisements.
- Accroître les cinétiques de minéralisation dans des conditions de mise en œuvre les plus favorables possibles (ex. avec le développement de voies catalytiques ou biologiques innovantes).
- Développer des technologies innovantes visant le plein emploi des gisements carbonatés.
- Explorer toutes les voies de valorisation possibles des produits de minéralisation, pour tous types de déchets et gisements de CO₂ (ex. matériaux de construction, piégeage de métaux toxiques présents dans les déchets, fonctionnalisation de produits, etc.).
- Développer les procédés de minéralisation multi-produits (ex. couplage avec production de métaux, d'H₂, etc.).
- Intégrer la minéralisation du CO₂ à l'écoconception des produits.
- Explorer le couplage entre minéralisation du CO₂ et DAC, le DAC étant le seul procédé de captage capable de produire un flux de CO₂ contrôlé qui corresponde précisément à la capacité de consommation du CO₂ d'un procédé donné d'utilisation du CO₂.



Recommandations d'accompagnement

- Cartographier les gisements de CO₂ et de déchets carbonatés sur des critères de performance environnementaux et économiques propres au développement de filières de minéralisation (développement d'un SIG dédié à la minéralisation).
- Développer des méthodes de quantification de l'impact environnemental et économique des technologies et filières de minéralisation à l'échelle territoriale.
- Développer les technologies d'intégration de la minéralisation dans les systèmes industriels de production.
- Étudier les synergies entre minéralisation et stockage géologique du CO₂, là où les flux de CO₂ et les flux de minéralisation ne peuvent être égaux.

