

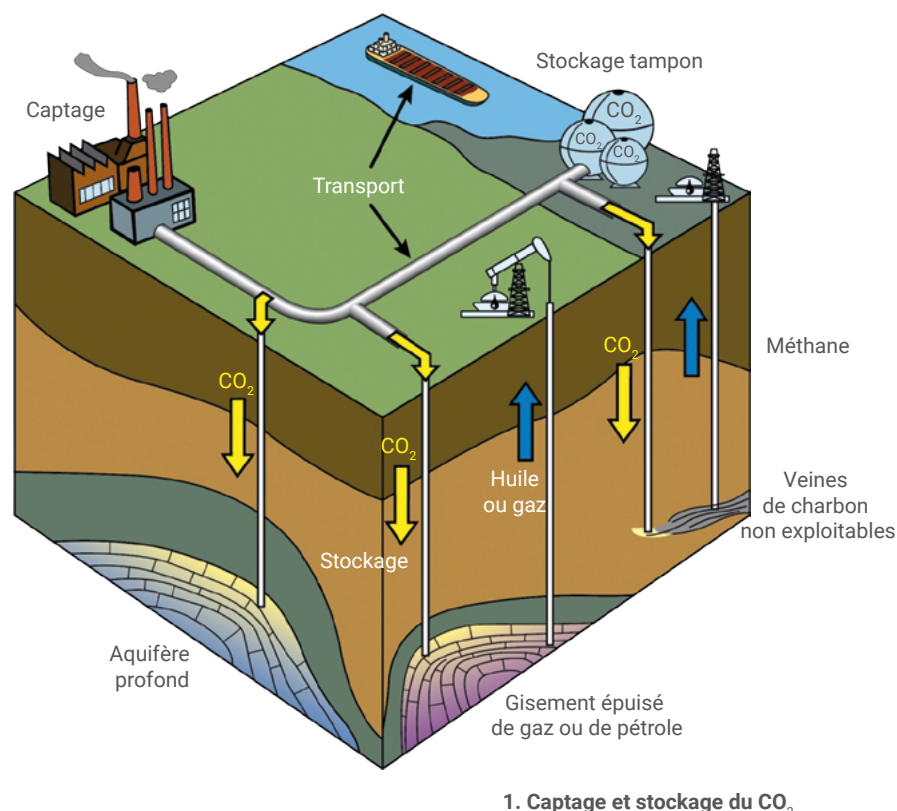
Le captage et le stockage du CO₂

Florence Delprat-Jannaud (florence.delprat-jannaud@ifpen.fr)

IFP Énergies nouvelles (IFPEN), 1-4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex

Le captage et le stockage géologique du gaz carbonique ne sont pas des technologies nouvelles : le captage et la séparation du CO₂ sont appliqués dans l'industrie depuis des décennies, et l'injection de CO₂ est pratiquée depuis les années 1970 pour la récupération assistée du pétrole. Toutefois, des verrous restent à lever pour leur déploiement à grande échelle.

Cet article propose une revue des technologies existantes, qu'elles soient matures ou en cours de développement, ainsi qu'une discussion sur les enjeux à adresser : réduction des coûts et de la pénalité énergétique pour le captage du CO₂, mutualisation des infrastructures pour le transport, démonstration de la faisabilité du stockage massif ainsi que perspectives en matière d'utilisation.



1. Captage et stockage du CO₂

Les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale mettent en avant le rôle du captage et du stockage géologique du CO₂ (CSC) dans le mix énergétique pour réduire ses émissions associées aux secteurs de l'énergie et de l'industrie. Non seulement cette technologie pourrait être mise en place rapidement, mais par ailleurs nombre d'industries (sidérurgie, cimenterie, raffinage, chimie et pétrochimie) ne disposent pas à ce jour de technologies de substitution leur permettant de réduire massivement leurs émissions. C'est pourquoi la réalisation des objectifs énergétiques et climatiques requiert une intensification rapide du déploiement du CSC : 2300 Mt (mégatonnes) de CO₂ par an sont à capter d'ici 2040, alors qu'aujourd'hui seulement 40 Mt le sont chaque année.



2. Grandes installations de captage et stockage du CO₂ dans le monde en 2021.

"Global Status of CCS 2021", <https://cutt.ly/globalccsinstitute-pdf>

Les enjeux

Maintenir le réchauffement climatique sous la barre des 2°C, voire des 1,5°C d'ici la fin du siècle, nécessite de maîtriser les émissions anthropiques des gaz à effet de serre. La Commission européenne, dans son Pacte vert pour l'Europe [1], ainsi que la France, dans la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2 [2]), se sont fixées un objectif de neutralité carbone en 2050, tout en soutenant une économie compétitive, propre et circulaire.

L'atteinte de ces objectifs nécessite la mise en œuvre d'un portefeuille de solutions permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, parmi lesquelles se trouvent l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables... ainsi que le captage-stockage et la valorisation du CO₂ (CSCV, CCUS en anglais). Le captage-stockage du CO₂ (CSC) consiste à le capter à sa source de production et à le stocker de façon pérenne dans des formations géologiques souterraines afin de l'isoler de l'atmosphère (fig. 1). Dans le scénario « Développement durable » de l'Agence internationale de l'énergie (IEA), le CSCV contribuerait ainsi à éviter des émissions de CO₂ à hauteur de 850 Mt/an en 2030, 5 Gt/an en 2050, et

10 Gt/an en 2070, ce qui correspondrait dans ce dernier cas à près de 15 % de la réduction cumulée des émissions [3].

Cette technologie est envisagée pour décarboner le secteur de l'énergie et de la production d'électricité ainsi que le secteur industriel, en particulier la production de ciment, de fer et d'acier, et l'industrie chimique. Le CSCV présente en effet l'avantage, pour ces infrastructures lourdes et généralement conçues pour être exploitées pendant au moins trente à quarante ans, de pouvoir être mis en œuvre sans nécessiter de remplacer entièrement des installations industrielles, ni de faire évoluer l'ensemble du réseau de distribution d'énergie. Par ailleurs, une partie importante des émissions de ces industries est « difficile à réduire », parce que résultant de réactions chimiques inhérentes aux processus de production (dans la fabrication du ciment par exemple), ou associée à un besoin de chaleur à haute température (aujourd'hui presque exclusivement fournie par la combustion de combustibles fossiles). Le CSCV apporte ainsi la seule solution à ce jour pour la réduction de ces émissions. En outre, cette technologie permet de produire, à un coût raisonnable, une

partie de l'hydrogène nécessaire à la décarbonation de certains secteurs, comme le transport à longue distance, l'industrie chimique et la production de fer et d'acier. Enfin, le CSCV apporte des solutions pour éliminer le carbone de l'atmosphère et ainsi compenser les émissions de CO₂ de certains secteurs, comme le transport ou l'agriculture.

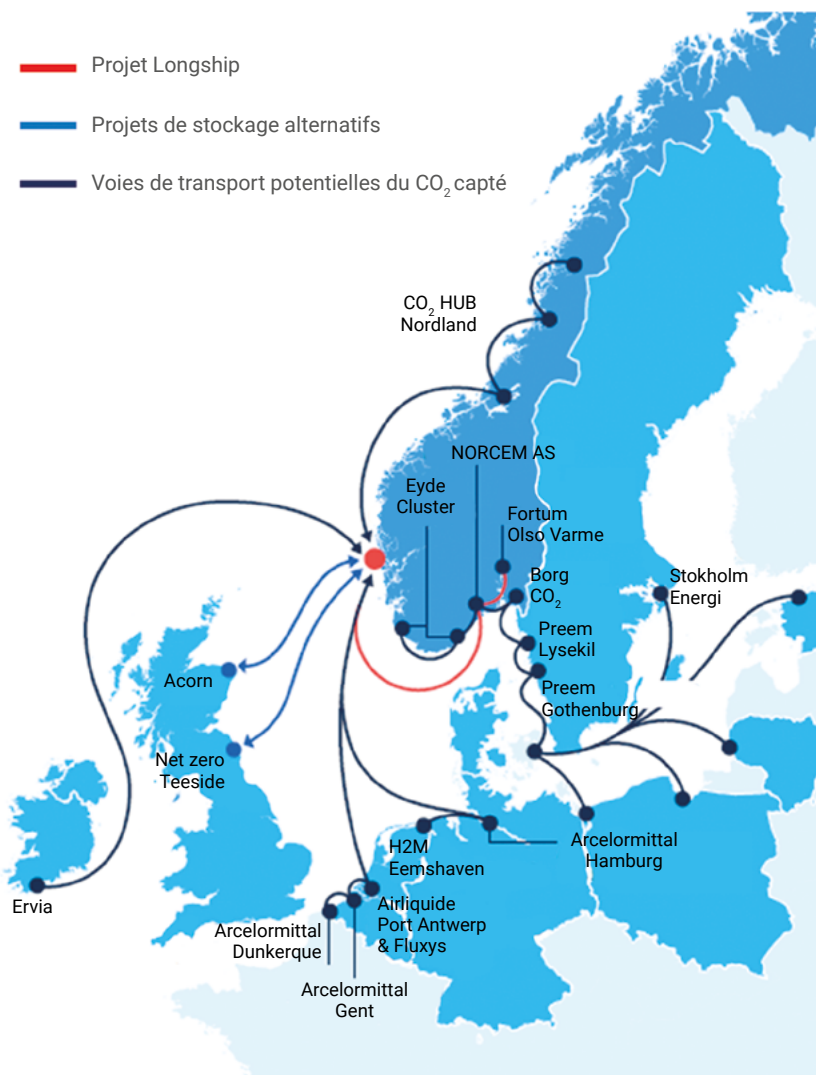
Bien sûr, pour que cette technique ait un effet sur le climat, elle doit pouvoir être déployée à très grande échelle. C'est là tout l'enjeu des développements en cours.

Le captage-stockage et l'utilisation du CO₂

Le CSCV est une technologie mature, appliquée dans l'industrie depuis des décennies. Au niveau mondial, on capte aujourd'hui environ 40 Mt de CO₂ par an et on comptait 135 projets à grande échelle en 2021 : 27 en opération, 2 interrompus, 4 en construction, 58 en étape de développement avancé, 44 en étape de développement préliminaire (fig. 2).

La chaîne de valeur repose aujourd'hui sur un captage du CO₂ réalisé par l'industrie émettrice et une infrastructure mutualisée de transport et de stockage du CO₂, permettant de

>>>



3. Le projet Northern Lights dans la mer du Nord.

● : Sites de captage. ● : Sites de stockage alternatifs. ● : Site de stockage en Norvège.
(Source : Global Status of CCS 2020, The Global CCS Institute).

>>>

réaliser des économies d'échelle. Un des projets les plus avancés en Europe est l'infrastructure Longship/Northern Lights, développée par Equinor, Shell et Total, qui devrait être mise en service en 2024 avec une capacité de stockage de 1,5 Mt CO₂/an dans une première phase, capacité qui pourrait ultérieurement monter à 5 Mt/an (fig. 3).

Le captage du CO₂

Le captage du CO₂ consiste à le séparer des fumées émises par l'industrie et le secteur énergétique, en ajoutant une unité spécifique de séparation à une installation industrielle, et/ou en modifiant des procédés industriels existants. Le CO₂ est extrait sous forme gazeuse ou liquide, mélangé à d'autres espèces gazeuses

généralement très minoritaires. Après séparation, le flux de CO₂ doit être parfois purifié, puis comprimé pour son transport.

Il existe trois approches principales [4] pour capter le CO₂, qui peuvent être combinées pour créer des méthodes hybrides.

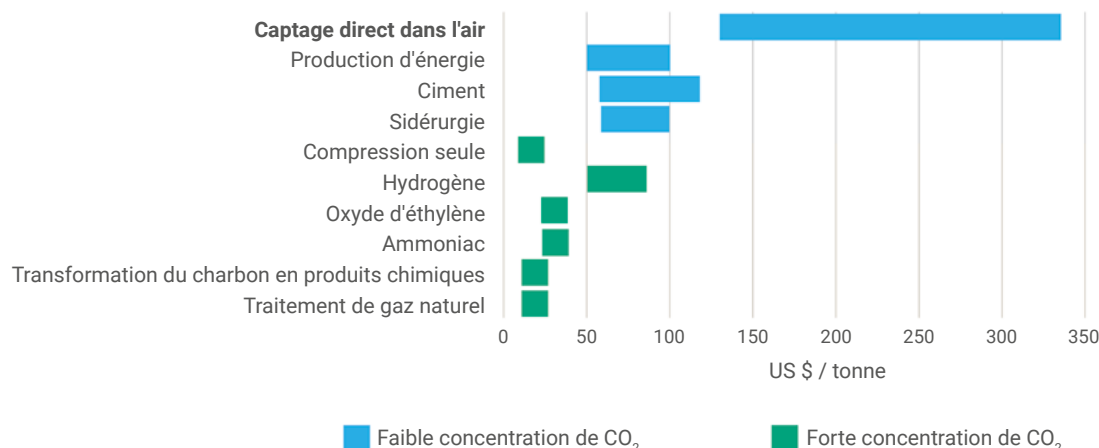
1 • **Le captage en postcombustion** consiste à l'extraire des gaz de combustion qui contiennent majoritairement de l'azote (la combustion étant réalisée à l'air), du CO₂, de l'oxygène, de l'eau, des oxydes d'azote (NO_x) et de soufre (SO_x)... Le procédé de captage le plus couramment utilisé est un procédé par absorption : le CO₂ est extrait des fumées de combustion à l'aide d'un solvant, généralement à base d'amines, qui présente une affinité pour les

molécules de CO₂. Le CO₂ capté par le solvant est ensuite séparé de ce dernier par régénération thermique. Si le captage par solvant est le procédé le plus mature, d'autres technologies sont en développement, telles que le captage par cycle calcium (captage du CO₂ par de la chaux vive pour donner du calcaire qui, une fois monté en température, libère le CO₂), par cryogénie (solidification du CO₂ par givrage), par séparation membranaire ou par contact avec un adsorbant solide. Les procédés en postcombustion génèrent un flux de CO₂ d'une concentration généralement supérieure à 99 %, les fumées rejetées dans l'atmosphère contenant essentiellement de l'azote, de l'eau et de l'oxygène.

Outre sa maturité, le captage en postcombustion présente, du fait de son positionnement en aval des processus industriels, l'avantage de pouvoir être mis en œuvre sur des installations existantes, sans nécessiter de modifications importantes, pour peu que l'espace requis pour la mise en place des équipements soit disponible. Il peut en outre être appliqué au traitement des fumées d'industries diverses (centrales thermiques, usines sidérurgiques, cimenteries...). En revanche, ce type de procédé présente une forte pénalité énergétique et donc un coût de mise en œuvre élevé.

2 • **Le captage en oxycombustion** consiste à réaliser une combustion en présence d'oxygène (presque) pur plutôt qu'à l'air, produisant ainsi un gaz constitué presque exclusivement de vapeur d'eau et de CO₂, alors facile à extraire. Une partie du gaz de combustion est recyclée en chambre de combustion, le reste étant déshydraté pour obtenir un flux de CO₂ de haute pureté.

L'oxygène est généralement produit par séparation de l'air (distillation cryogénique ou séparation membranaire), mais cette technologie requiert une forte consommation d'énergie. Une seconde option consiste à apporter de l'oxygène sous forme d'oxydes métalliques, qui vont tourner en boucle entre un réacteur d'oxydation et un réacteur de réduction. Dans le réacteur « air » s'effectue, au contact de l'air, l'oxydation du matériau qui va transporter l'oxygène ; dans le



4. Coût du captage de CO₂ par secteur, incluant la compression du CO₂

"Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage", IEA (2020).
www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions

réacteur « fuel », s'effectue, au contact du combustible, la réduction du matériau qui cède ainsi son oxygène. Cette solution, appelée « combustion en boucle chimique », ne présente pratiquement pas de pénalité énergétique pour la production d'oxygène, mais est encore en phase de développement.

3 • Enfin, le **captage en précombustion** consiste à extraire le CO₂ en amont de la combustion, en transformant par oxydation partielle le combustible initial en un mélange H₂ + CO qui est traité pour accroître la production d'hydrogène. Après extraction du CO₂ par un procédé en postcombustion, l'hydrogène est brûlé dans une installation thermique adaptée qui ne rejette que de l'eau dans l'atmosphère. À noter que le gaz de synthèse étant produit sous pression, la séparation du CO₂ peut se faire par solvant physique (méthanol, par exemple), sans nécessiter de chaleur pour désorber les gaz acides.

Le captage du CO₂ est généralement l'étape la plus onéreuse de la chaîne de valeur du captage et stockage, en raison des coûts d'investissement et des besoins en énergie des procédés. Bien entendu, le bénéfice de la mise en œuvre d'un procédé de captage de CO₂ sur une installation est quantifié en termes, non pas de CO₂ capté, mais de « CO₂ évité », c'est-à-dire en intégrant les émissions additionnelles résultant de la mise en œuvre du captage de CO₂.

Les coûts de captage du CO₂ sont estimés, toutes filières confondues, entre 10 et 130 € par tonne de CO₂ évité. Ils dépendent fortement des caractéristiques du procédé industriel considéré (concentration en CO₂, pression, composition des fumées...), de la consommation d'énergie, des hypothèses financières retenues (fig. 4). L'étape de captage inclut, outre la séparation du CO₂ des fumées, le conditionnement du CO₂ qui doit être comprimé pour le transport. Du fait du faible déploiement de la technologie, de grandes incertitudes demeurent sur ces coûts. Ceux-ci sont très sensibles à nombre d'hypothèses sous-jacentes telles que la composition des gaz traités, la pureté du CO₂ capté, le procédé de captage utilisé, la durée de vie des installations, le prix du gaz naturel ou de l'électricité, le taux d'actualisation...

Le coût du captage du CO₂ peut en fait représenter jusqu'à 70 % du coût total de la chaîne CSC, le transport et le stockage représentant chacun environ 15 %. Dans ce contexte, les enjeux de recherche et d'innovation portent sur le développement de technologies performantes et moins onéreuses. Il s'agit donc non seulement de mener une recherche incrémentale dans le but d'optimiser les technologies existantes, gagner en maturité et permettre des économies d'échelle et d'apprentissage, mais aussi de préparer des procédés de captage de nouvelle génération, rendant possible une réduction significative des coûts.

Le transport du CO₂

Le transport du CO₂ ne présente pas de verrou technologique majeur. Il est déjà pratiqué à l'échelle industrielle par bateau et par gazoduc. Le transport par gazoduc se fait en phase supercritique (pression supérieure à 74 bars) ou liquide (10 bars, -40°C), le transport par bateau en phase liquide à pression modérée et basse température (7 bars et -50°C par exemple).

Les coûts de transport dépendent des volumes de CO₂ transportés, de la distance parcourue, du diamètre du pipeline ou de la taille des bateaux. Ceux associés au transport par gazoduc sont principalement déterminés par les CAPEX (dépenses d'investissement en capital) et sont approximativement proportionnels à la distance. Ils sont très sensibles à la quantité de CO₂ transportée. Ceux associés au transport par bateau sont moins dépendants de la distance mais, en deçà d'une certaine distance, le transport par bateau n'est plus économiquement viable.

L'enjeu pour le transport du CO₂ est plutôt d'ordre logistique, même si, notamment en cas de transport par gazoduc, des innovations pourraient être nécessaires pour la détection de fuites éventuelles et la remédiation. Il s'agit de cartographier, de développer et d'optimiser le réseau de transport en fonction de la localisation des installations de captage par rapport aux sites de stockage.

>>>

Le stockage du CO₂

Le stockage géologique du CO₂ doit être sûr et permanent, grâce à des phénomènes de piégeage naturel. Il existe en effet sous terre des réservoirs de CO₂ âgés de plusieurs millions d'années qui démontrent que certaines formations naturelles sont capables de le stocker de manière efficace et en toute sécurité sur de très longues périodes. Le CO₂ ne peut toutefois pas être injecté n'importe où dans le sous-sol. Son stockage (fig. 1) est envisagé essentiellement dans deux types de formations, sur terre (en "*onshore*") comme en mer (en "*offshore*") :

- (a) les réservoirs de pétrole ou de gaz épuisés, dont les propriétés sont bien connues du fait de l'exploration et de l'exploitation pétrolière, même si des études sont nécessaires pour confirmer les propriétés du réservoir et de sa couverture en fin d'exploitation ;
- (b) les aquifères salins profonds qui offrent un potentiel de stockage plus important, mais sont généralement moins connus.

La sélection d'un site de stockage de CO₂ répond à de nombreux critères :

- une profondeur supérieure à 800 m, afin d'atteindre des conditions de température et de pression (respectivement supérieures à 31°C et 754 bars) pour lesquelles le CO₂ se trouve dans un état supercritique, ce qui permet de maximiser la quantité stockée ;
- une porosité et une perméabilité de la roche réservoir, permettant une capacité de stockage suffisante ;
- la présence d'une couverture rocheuse imperméable (argiles, sels...) empêchant le CO₂ de remonter ;
- la présence de structures pièges, contrôlant la migration latérale du CO₂ ;
- l'absence d'eau potable ou, de façon plus générale, de tout conflit potentiel avec d'autres usages éventuels du sous-sol.

Si la capacité globale pour le stockage souterrain du CO₂ dans le monde reste incertaine, en particulier pour les aquifères salins profonds, la disponibilité de formations géologiques aptes à ce stockage n'est pas un verrou pour le développement de la filière. La capacité de stockage

globale totale est en effet estimée entre 8000 et 55 000 Gt (gigatonnes), alors que la quantité de CO₂ à stocker est d'environ 220 Gt sur la période 2020-2070. Toutefois, la majeure partie de cette capacité (entre 6000 et 42 000 Gt) est située "*onshore*", et le stockage du CO₂ se heurte alors dans certains pays à des problèmes d'acceptabilité sociétale. En "*offshore*", en se limitant aux formations géologiques situées à moins de 300 kilomètres des côtes, à des profondeurs d'eau inférieures à 300 mètres, et en excluant l'Arctique et l'Antarctique, la capacité de stockage est alors estimée entre 2000 et 13 000 Gt [5].

Les roches réservoirs sont le plus souvent remplies de saumure. Le CO₂ est donc injecté dans la formation géologique à une pression sensiblement plus élevée que celle du réservoir, de façon à repousser le fluide en place. Des études géomécaniques permettent d'identifier la pression maximale à ne pas dépasser pour éviter l'endommagement de la formation. L'injection du CO₂ peut aussi être affectée par des processus chimiques. En fonction de la roche réservoir, de la composition des fluides en place et des conditions de pression et de température, des réactions de dissolution ou de précipitation de minéraux peuvent se produire, notamment aux abords du puits d'injection, et affecter la porosité de la roche et la capacité du CO₂ à s'écouler. La dissolution des carbonates peut ainsi augmenter la porosité de la roche ; la précipitation de minéraux carbonatés peut au contraire cimenter la formation autour du puits. Des études d'ingénierie de réservoir, couplées à des analyses géochimiques, sont donc nécessaires pour gérer les débits d'injection, afin d'anticiper ces phénomènes d'interactions complexes et éviter tout phénomène susceptible de réduire les quantités de CO₂ que l'on peut injecter.

Les coûts de stockage du CO₂ sont estimés entre 1 et 20 €/t CO₂ [6] ; ils varient en fonction du taux d'injection de CO₂ et des caractéristiques des réservoirs de stockage, ainsi que de l'emplacement des sites de stockage. Le stockage "*onshore*" est moins cher que le stockage "*offshore*", et le

stockage dans des champs de pétrole et de gaz épuisés est *a priori* moins onéreux que dans les aquifères salins profonds. Le coût du développement de nouveaux sites reste toutefois incertain, et il risque d'être un facteur important pour le déploiement du CSC dans les décennies à venir dans certaines régions.

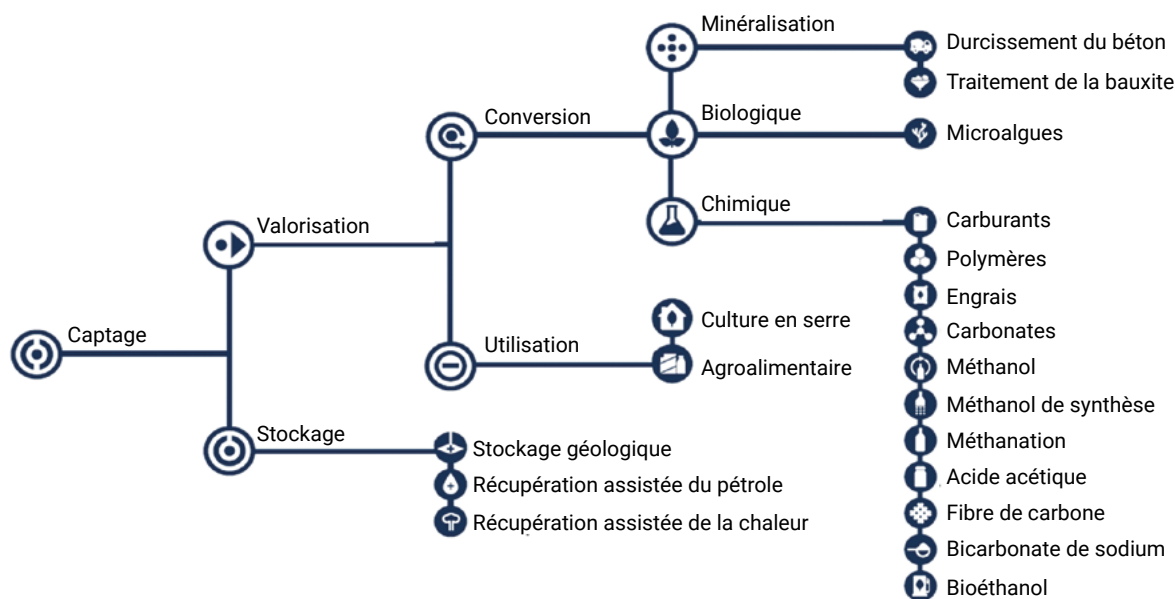
Au-delà de la démonstration de la faisabilité d'un stockage massif dans des aquifères salins profonds, le principal enjeu réside dans l'acceptabilité sociétale des projets de stockage, en particulier "*onshore*". Le déploiement de la filière nécessite aussi la mise en place rapide de réglementations incitatives permettant de faire émerger un marché du CO₂ et compenser le surcoût du CSCV, de mécanismes aux frontières permettant de maintenir la compétitivité des industries, et d'un cadre juridique autorisant le transport transfrontalier du CO₂.

Au-delà du captage et stockage du CO₂

Utilisation et conversion du CO₂

Plutôt que d'être stocké dans le sous-sol de façon pérenne, le CO₂ peut aussi être considéré comme une ressource que l'on peut utiliser directement ou convertir en un produit (CCU, Carbon capture and utilization). D'après l'IEA [7], environ 230 Mt de CO₂ sont utilisées chaque année dans le monde, le plus gros consommateur étant l'industrie des engrais (130 Mt de CO₂ utilisées dans la fabrication d'urée), suivie par l'exploration pétrolière (70 à 80 Mt de CO₂ utilisées pour la récupération assistée du pétrole). Si la plupart des applications commerciales sont aujourd'hui associées à une utilisation directe du CO₂, des voies de valorisation faisant appel à des procédés de conversion chimique et biologique du CO₂ en produits chimiques et matériaux de construction notamment, sont en développement (fig. 5).

Le potentiel de marché à venir pour ces produits est difficile à évaluer du fait du faible développement, voire du manque de maturité des technologies, du besoin élevé en hydrogène ou en électricité à faible teneur en carbone dont l'utilisation directe pour



5. Principales voies de valorisation du CO₂

"Global Status of CCS", GCCSI 2019. <https://cutt.ly/globalccsinstitute-status-of-ccs-report-2019>

d'autres applications pourrait être plus rentable, et des incertitudes sur les aspects réglementaires. Le volume de transformation du CO₂ en un produit donné doit être aussi analysé, au regard du risque d'inonder le marché et de détruire toute valeur du produit issu de cette transformation.

Toutefois, l'utilisation du CO₂ ne peut être un instrument de lutte contre le changement climatique que si elle permet de le stocker dans le produit issu de la transformation. C'est le cas de la production de matériaux de construction à partir de CO₂ et de minéraux ou de déchets : l'utilisation du CO₂ dans la fabrication du béton permet également une amélioration de la performance et de la durabilité du matériau. En revanche, une transformation en carburant réémettrait immédiatement le CO₂ utilisé. Ces approches sont donc considérées comme des compléments éventuels, et non des alternatives au stockage de CO₂, dans une perspective de réduction des émissions de CO₂ à grande échelle. Dans le scénario de l'IEA, sur les 10 Gt de CO₂ captés en 2070, plus de 90 % sont stockés ; 8 % sont utilisés, essentiellement pour produire des carburants.

Émissions négatives

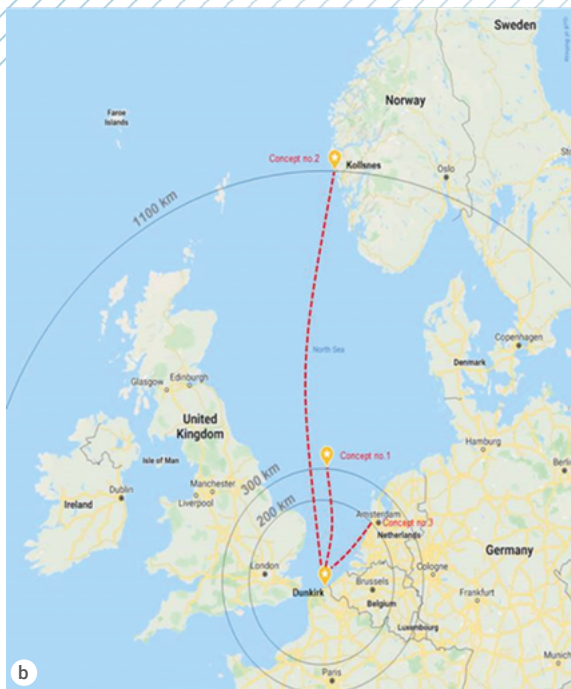
Enfin, les technologies CSCV peuvent permettre, non seulement de réduire les émissions de CO₂, mais aussi de retirer du CO₂ de l'atmosphère. C'est le cas de la bioénergie avec CSC (BECCS) : la substitution dans un procédé industriel de la biomasse à une matière première ou à une énergie d'origine fossile, associée à un captage du CO₂ issu de la combustion et stockage dans des réservoirs géologiques, est un moyen de réduire la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère. Par ailleurs, des travaux sont en cours pour développer des procédés de captage direct dans l'atmosphère (DAC pour "Direct Air Capture") avec déjà des premiers pilotes.

Ces technologies apparaissent aujourd'hui dans tous les scénarios de développement durable pour compenser les émissions de CO₂ dans des secteurs où celles-ci sont difficiles à réduire. Dans le scénario « Développement durable » de l'IEA, le BECCS intervient ainsi à hauteur de 45 Mt de CO₂ entre 2030 et 2070, et le DAC à hauteur 2,8 Mt de CO₂. On parle d'« émissions négatives », pour illustrer le fait que ces technologies retirent du CO₂ de l'atmosphère.

Le captage-stockage et l'utilisation du CO₂ en France

Le captage-stockage est une brique du portefeuille des technologies identifiées dans la Stratégie nationale bas-carbone pour la réduction des émissions de CO₂, avec un objectif de réduction lié au CSC de 15 Mt CO₂/an, dont 5 Mt CO₂/an dans le secteur industriel à partir de 2030 et 10 Mt CO₂/an associés à du BECCS. L'ADEME [8] a de son côté estimé un potentiel de captage et stockage de CO₂ de 24 Mt CO₂/an sur la base des émissions de 2017, en prenant en compte la faisabilité technico-économique de la chaîne, la disponibilité des infrastructures de transport et l'opposition sociétale au stockage "onshore". Ce potentiel est porté par trois régions : les Hauts-de-France (15 Mt CO₂/an, avec stockage en mer du Nord au large de Dunkerque), la Normandie (6 Mt CO₂/an avec stockage en mer du Nord au large de Dunkerque) et la Nouvelle Aquitaine (3 Mt CO₂/an avec stockage dans des anciens réservoirs de gaz). Des installations de collecte du CO₂ capté et de transport sont à l'étude dans ces trois régions. Un des verrous pour le déploiement de la filière sera la

>>>



E1. Projet 3D.

(a) Démonstrateur du procédé DMX à Dunkerque.

(b) Le futur pôle européen Dunkerque-Mer du Nord de captage et stockage du CO₂ à l'échelle industrielle (<https://3d-ccus.com/>). Le CO₂ capté à Dunkerque sera transporté par pipe-line ou par bateau jusqu'à trois sites de stockage en aquifère salin profond en mer du Nord (fig. E1) : au large (300 km) de la côte sud-est de l'Angleterre, à Kollsnes près de Bergen en Norvège (transport par bateau seulement), ou près de la côte ouest des Pays-Bas.

Lancé en mai 2019, le projet « 3D » ("DMX Demonstration in Dunkirk") fait partie du programme pour la recherche et l'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne. Coordonné par IFPEN, il regroupe dix autres partenaires de la recherche et de l'industrie, issus de six pays européens : ArcelorMittal, Axens, Total Energies, ACP, Brevik Engineering, CMI, DTU, Gassco, RWTH, Uetikon.

Ce projet vise un triple objectif. Le premier est de démontrer, à l'échelle du pilote industriel, les performances d'un procédé de captage du CO₂ développé par l'IFPEN. Ce procédé, par solvant DMX™, est plus performant que ceux de référence aux amines qui présentent une forte consommation d'énergie pour la régénération du solvant. La solution IFPEN repose sur un solvant à très grande capacité cyclique qui décante en deux phases, et dont seule la phase la plus riche en CO₂ est régénérée. La stabilité chimique du solvant DMX™ permet également d'opérer cette régénération en température et donc de produire le CO₂ en pression, ce qui se traduit par une économie de deux étages de compression par rapport aux procédés classiques. Enfin, grâce à la valorisation de la chaleur produite sur le site d'ArcelorMittal, ce procédé devrait permettre une réduction significative du coût total du captage.

Le pilote pour la démonstration du procédé, conçu par Axens (fig. E1a), a été construit en 2021.

Il est maintenant installé sur le site sidérurgique ArcelorMittal de Dunkerque et a été inauguré la 21 mars 2022. Sa capacité est de 0,5 t CO₂ capté par heure. À la fin du projet « 3D », en 2023, ce procédé sera commercialisé par Axens.

Le second objectif du projet 3D est de préparer la mise en place d'une première unité industrielle sur le site ArcelorMittal de Dunkerque, qui pourrait être opérationnelle à partir de 2026. Cette unité devrait capter plus de 125 tonnes de CO₂ par heure, soit plus de 1 Mt (million de tonnes) de CO₂ par an.

Enfin, le projet « 3D » s'inscrit dans une ambition plus globale, celle du développement d'un futur pôle européen de captage-stockage de CO₂ à Dunkerque-Mer du Nord (fig. E1b). Le troisième objectif est donc de concevoir ce futur pôle, qui pourrait capter, conditionner, transporter et stocker 10 Mt de CO₂ par an, et verrait le jour à l'horizon 2035. Ce pôle s'appuierait sur les infrastructures de conditionnement et de transport pour le stockage du CO₂ en mer du Nord, mises en place via d'autres projets. Des solutions de transport par pipeline et par bateau sont à l'étude, intégrant la compression du CO₂ requise pour le transport par pipeline, les dimensions du pipeline, la logistique (taille et nombre de navires), ainsi que les besoins de stockage intermédiaire.

LE CAPTAGE DIRECT DANS L'AIR

Le captage direct dans l'air (DAC) fait référence aux technologies qui permettent de séparer le CO_2 de l'atmosphère. Couplé à un stockage de CO_2 dans des formations géologiques (captage et stockage directs du carbone dans l'air – DACCS), il permet en effet de générer des émissions négatives. Cette solution apparaît dans les scénarios de transition vers la neutralité carbone pour compenser les émissions de CO_2 de certains secteurs, comme l'agriculture, parfois à des niveaux très élevés. Le DACCS présente en l'effet l'avantage, par rapport aux solutions à émissions négatives, telles que le reboisement ou le stockage du carbone dans le sol, de ne pas nécessiter une importante quantité d'eau et de terres arables, et d'assurer une réduction pérenne de la quantité de CO_2 de l'atmosphère. Par ailleurs la modularité du DAC laisse entrevoir un potentiel de déploiement facile et relativement rapide.

Les procédés actuels requièrent de grands ventilateurs qui amènent l'air ambiant à travers un filtre où un produit chimique capte le CO_2 , lequel est ensuite libéré et collecté pour le traitement. Les technologies mises en œuvre aujourd'hui font appel soit à un absorbant liquide (Carbon Engineering) soit à un adsorbant solide (Climeworks et Global Thermostat) pour séparer le CO_2 de l'atmosphère. Le verrou majeur réside dans la très faible concentration du CO_2 dans l'air, 0,04 %, soit environ 300 fois plus faible que dans les gaz de combustions industrielles, ce qui augmente significativement le besoin en énergie et les coûts associés. Les coûts des premiers projets sont estimés entre ~ 400 et 700 € / t CO_2 et pourraient chuter à 200 € / t CO_2 *. Toutefois, du fait de l'absence à ce jour d'unités à grande échelle, les incertitudes sont très grandes.

L'intérêt de cette technologie, par rapport au captage du CO_2 sur fumées industrielles, réside dans la possibilité d'installer l'unité de captage à côté d'une zone de stockage limitant ainsi le transport et

le coût associé. C'est le cas du projet Orca en Islande, qui tire parti de la disponibilité d'un site de stockage à proximité d'une énergie renouvelable abondante d'origine géothermique. Inauguré en septembre 2021 par la société suisse Climeworks, Orca est aujourd'hui la plus grande usine de captage direct au monde (voir la photo, p. 76). Elle devrait capter 4000 tonnes de CO_2 par an. L'installation est équipée de douze ventilateurs qui brassent l'air ambiant et l'aspirent pour le mettre en contact avec des solvants chimiques qui vont capter le CO_2 . Celui-ci est ensuite filtré, chauffé à environ 100 °C pour être séparé de l'air, et récupéré sous forme concentrée. Le CO_2 est ensuite dissous dans de l'eau et injecté à environ 1 km de profondeur dans des roches basaltiques grâce à un procédé développé par la société Carbfix. Le CO_2 réagit avec les minéraux contenus dans le basalte et se transforme en pierre en quelques années. Pour financer les opérations, Climeworks propose à des entreprises et à des particuliers de compenser certaines de leurs émissions de CO_2 en achetant du CO_2 capté pour environ 500 € / t CO_2 . Plus de 8000 clients, parmi lesquels Microsoft (investisseur et client), Shopify, The Economist group, ou encore Swiss Re, auraient déjà adhéré à ce mécanisme.

On compte aujourd'hui quinze usines DAC opérationnelles dans le monde, avec une capacité totale de 11,3 kt CO_2 /an. Le CO_2 capté par ces installations est, soit stocké dans des formations géologiques, soit utilisé dans l'industrie agroalimentaire. Toutefois, des applications variées sont aujourd'hui considérées dans des démonstrateurs, telles que l'usage du CO_2 pour la fertilisation des serres et la production de produits chimiques et de carburant.

* "Global Assessment of Direct Air Capture Costs", IEAGHG Technical Report 2021-05 (2021) <https://cutt.ly/ieaghg-report-global-assessment>

>>>

disponibilité de sites de stockage opérationnels à très court terme. En effet, si les capacités existent pour stocker le CO_2 émis en France comme en Europe, en pratique, les projets de stockage en développement avancé y sont aujourd'hui insuffisants pour permettre de stocker les volumes de CO_2 que les industriels émetteurs annoncent vouloir capter d'ici 2030.

Conclusion

Le captage et stockage du CO_2 est l'une des technologies requises dans la lutte contre le réchauffement climatique. Sans elle, l'objectif de neutralité carbone ne pourra pas être atteint en 2050. L'enjeu est aujourd'hui de créer les conditions pour en permettre le déploiement à grande échelle dès 2030 : des technologies de captage performantes et économiquement viables, des infrastructures

pour le transport du CO_2 des sites de stockage accessibles aux différents émetteurs. Des mécanismes de soutien financier et réglementaire sont aussi nécessaires pour accélérer la mise en place de la filière. Au-delà de ces enjeux techniques et financiers, le principal frein pour le déploiement du CSC réside dans la réticence de la société civile. Les questions sont multiples et peuvent porter sur le risque d'accident ou de dégradation de l'environnement, sur les nuisances associées, réelles ou supposées, qui pourraient éventuellement porter atteinte à la qualité de vie des riverains. La mise en œuvre de pilotes et de démonstrateurs est un point crucial pour une réflexion collective (impliquant industriels, universitaires, instituts de recherche, représentants de la société civile...) et des débats informés. ■

1
2
3

- 1• https://cutt.ly/priorities2019_2024_european-green-deal
- 2• www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf
- 3• "Energy Technology Perspectives 2020", IEA, www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020
- 4• F. Lecomte, P. Broutin et É. Lebas, *Le captage du CO_2* , Éditions TECHNIP (2010).
- 5• Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS in clean energy transitions", IEA (2020). https://cutt.ly/iea_reports_energy_transitions
- 6• "The Costs of CO_2 Capture, Transport and Storage", ZEP (2011). <https://zeroemissionsplatform.eu/document/the-costs-of-co2-capture-transport-and-storage/>
- 7• "Putting CO_2 to Use. Creating value from emissions", IEA (2019). <https://cutt.ly/iea-pdf>
- 8• « Le captage et stockage géologique du CO_2 (CSC), un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles », ADEME (2020). https://cutt.ly/ademe_stockage_geologique_co2