



MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA SOUVERAINETÉ
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France

Juillet 2024

RÉSUMÉ EXECUTIF

Les technologies de Capture, stockage et valorisation du carbone (CCUS) consistent à capturer les émissions de CO₂ dans le but de les stocker durablement, ou de les réutiliser comme intrants dans la fabrication de certains produits, substituant ainsi des consommations fossiles.

La France a publié ses premiers travaux¹ sur le CCUS en juin 2023, constituant des premières orientations stratégiques sur ce domaine, qui avaient été soumises à consultation. Ce document constitue la suite des travaux entrepris depuis l'année dernière.

À l'échelle mondiale et européenne, dans les rapports du GIEC et les orientations de la Commission Européenne, le CCS est largement considéré comme un levier nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone, notamment pour la décarbonation des activités pour lesquelles il n'existe pas de technologie bas-carbone accessible techniquement ou économiquement, mais aussi en soutien du puits de carbone naturel (forêts) si celui-ci devait être dégradé par les effets du changement climatique.

La France a fait le choix de recourir à cette technologie pour la capture des émissions les plus difficiles à abattre, en l'absence d'autres solutions de décarbonation technico-économiquement viables.

L'atteinte des objectifs fixés à l'industrie dans le cadre de la planification écologique, baisse des émissions industrielles d'environ 45% entre 2015 et 2030 puis neutralité carbone en 2050, nécessite de déployer les premières chaînes CCUS dès l'horizon 2030, d'abord au niveau des zones industrielles qui rassemblent les plus grandes densités d'émetteurs de CO₂, puis de capter dans un second temps, aux horizons 2040 et 2050, le carbone provenant d'autres secteurs d'activités et d'émetteurs plus diffus sur le territoire.

Pour atteindre cet objectif, l'État soutiendra, dès cette année, les premiers grands projets de capture et de stockage de carbone (CCS). Ce soutien public, versé aux émetteurs en amont de la chaîne, permettra le déploiement des infrastructures de transport et de stockage sur plusieurs « vallées CCS » à travers le territoire.

¹ Disponible ici : [Lancement d'une consultation sur la stratégie CCUS | Conseil national de l'industrie \(conseil-national-industrie.gouv.fr\)](https://conseil-national-industrie.gouv.fr/)

Une régulation des infrastructures de transport du CO₂ est envisagée. Cette régulation fournira un cadre souple et sécurisant pour assurer une bonne répartition de la valeur sur l'ensemble de la chaîne CCS, basée sur les principes d'accès non discriminatoire au réseau, de transparence et de contrôle tarifaire.

En matière de stockage du CO₂, la France travaille dans le cadre européen et bilatéral pour faciliter l'accès aux stockages en mer du Nord et en Méditerranée, qui constituent à court terme les seuls exutoires opérationnels pour les émissions françaises. Elle vise à l'horizon 2030 le développement de capacités de stockage nationales, plus compétitives et accessibles, via une évaluation du potentiel de stockage français et le financement d'actions permettant d'améliorer la connaissance du sous-sol.

La valorisation du CO₂ sera nécessaire à la décarbonation des secteurs de l'aviation, du maritime et de certains secteurs industriels, par la fabrication de molécules alternatives aux consommations fossiles. Les réglementations en vigueur et leurs évolutions à venir devraient permettre à terme d'accompagner le développement de ces usages.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ EXECUTIF	3
SOMMAIRE	5
CONTEXTE	6
Le CCUS : de quoi s'agit-il ?	7
Le CCUS dans le monde	8
Retours de la consultation sur la stratégie nationale CCUS en France	11
CAPTAGE	12
Trajectoire CCUS : un déploiement progressif commençant par les zones industrielles les plus émettrices	13
Soutien au déploiement du CCUS	15
TRANSPORT	21
Un enjeu de déploiement des infrastructures de transport	22
Un cadre de régulation nécessaire pour développer les infrastructures de transport	22
Accélérer le déploiement des premiers hubs en adoptant une régulation souple	23
STOCKAGE	25
Différentes modalités de stockage du CO ₂	26
Une stratégie française de coopération internationale pour favoriser l'accès aux sites de stockage de CO ₂ à l'étranger	26
Développer les capacités de stockage du CO ₂ en France : une opportunité pour notre économie et notre décarbonation	27
Un cadre réglementaire permettant la recherche et l'exploitation de sites de stockage géologique de CO ₂	29
VALORISATION	31
Voies de valorisation du CO ₂	32
Cadres réglementaires des produits issus du captage du CO ₂	33
Soutien à la filière CCU	33

CONTEXTE

La capture du CO₂ : un levier de décarbonation de l'économie

Les technologies de Capture, Stockage et Valorisation du Carbone (CCUS) consistent à capturer les émissions de CO₂ dans le but de les stocker durablement ou de les réutiliser comme intrant dans la fabrication de certains produits.

La CCUS constitue un levier de décarbonation mentionné dans les scénarios de neutralité carbone au niveau mondial, européen ou national, en particulier pour réduire les émissions des secteurs n'ayant pas d'autre alternative.

La France a fait le choix de recourir à cette technologie, à travers une stratégie nationale CCUS annoncée par le Président de la République le 8 novembre 2022.

Présentée dans une première version pour consultation en juin 2023 à l'issue des travaux de planification écologique, la stratégie nationale CCUS a fait l'objet au cours des 12 derniers mois d'une consultation publique et d'un avis du Haut Conseil pour le Climat, confortant tous deux les premières orientations retenues par l'État.

Ce document, construit sur le fondement des retours de la consultation de juin 2023, des travaux réalisés par la Commission de régulation de l'énergie sur les 12 derniers mois sur les perspectives de régulation du transport de CO₂ et de l'étude menée sous l'égide du CSF « Nouveaux systèmes énergétiques » sur le potentiel de stockage en France, constitue la version mise à jour de cette stratégie CCUS.

Il vise à détailler le cadre de déploiement de cette technologie en France, et à fournir à l'ensemble des acteurs la visibilité réglementaire et économique leur permettant d'entreprendre leurs projets.

Le CCUS : de quoi s'agit-il ?

Le CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage) se réfère à un ensemble de technologies visant à capturer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), généralement issues de sites industriels :

- pour injecter et stocker le CO₂ dans des formations géologiques adaptées, et donc éviter qu'il ne soit simplement relâché dans l'atmosphère où il contribuerait au réchauffement climatique ;
- pour l'utiliser comme ressource dans la fabrication de produits.

Ces technologies sont nécessaires pour la décarbonation des activités pour lesquelles il n'existe pas d'alternative bas carbone à moyen terme. C'est notamment le cas de nombreuses émissions industrielles directement liées au procédé employé (production de ciment, de chaux, chimie, métallurgie, etc.), qu'il n'est pas possible de réduire par une sortie des énergies fossiles.

Le CCUS implique une succession d'étapes :

- **La capture du CO₂** sur un site industriel vise à extraire le CO₂ issu du processus industriel et à le concentrer. Plusieurs technologies de capture existent et leur choix dépend de la nature et de la concentration en CO₂ de la source. Les principales technologies regroupent le captage aux amines, l'oxycombustion ou encore le captage cryogénique. Les technologies de captage présentent des cas d'usage et des degrés de maturité différents. La capture aux amines constitue aujourd'hui la solution la plus largement déployée. La capture du CO₂ est déjà déployée au sein de nombreuses industries, et en particulier la production d'ammoniaque, le raffinage, et le traitement des gaz issus de l'exploitation de gaz fossiles ;
- **Le transport** : une fois capté, le CO₂ est acheminé vers des lieux de stockage ou d'utilisation, situés en mer ou sur terre, par canalisations ou bateaux, ou, dans le cas de volumes plus réduits, en trains, barges, camions etc. La logistique du CO₂ des sites émetteurs vers les lieux de stockage ou d'utilisation nécessite le déploiement d'infrastructures mutualisées de transport et de conditionnement (canalisation, terminal de liquéfaction...) similaires à celles utilisées pour le transport de gaz ou du pétrole ;
- **Le stockage de CO₂** : l'injection de CO₂ sous forme dense dans des structures fermées des bassins sédimentaires, ou dans des anciens gisements d'hydrocarbures déplétés, permet de stocker le CO₂ de manière sûre et permanente (échelle de temps géologique) dans le sous-sol. Des stockages se développent dans plusieurs États européens (principalement en mer) et pourraient accueillir le CO₂ capté par les industriels français à court terme ;
- **La valorisation du CO₂** (ou « utilisation »), alternativement au stockage, consiste à utiliser le CO₂ capté pour la fabrication de produits. Elle regroupe différents usages : e-carburants (carburants alternatifs produits à partir d'hydrogène et de CO₂), production de plastiques, ou encore la carbonatation du béton. La valorisation du CO₂ nécessite cependant d'importantes quantités d'électricité décarbonée.

Le CCUS dans le monde

À l'échelle mondiale et européenne, le CCUS est considéré comme un levier nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dans son évaluation des trajectoires permettant d'atteindre des émissions mondiales net zéro de CO₂ (condition clé de la stabilisation du réchauffement planétaire) évalue le rôle de la capture et séquestration du carbone (CCUS) comme une option crédible pour réduire les émissions provenant de grands systèmes industriels ou énergétiques ayant recours aux énergies fossiles. Par ailleurs, le GIEC estime que le déploiement des technologies CCUS est à ce jour largement inférieur à celui cohérent avec une limitation du réchauffement sous 2°C².

En outre, **l'Agence Internationale de l'Énergie** estime que le CCUS permettrait de réduire d'environ 10% des émissions mondiales de GES à l'horizon 2050. L'intérêt de recourir aux technologies de CCUS pour lutter contre le changement climatique a également été acté dans la décision de la COP28 qui s'est tenue à Dubaï en décembre 2023.

Au niveau européen, le règlement « Net-Zero Industry Act » (NZIA) fera du CCUS une option stratégique clé pour l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050, au même titre que l'hydrogène, les énergies renouvelables électriques et le nucléaire. Ce cadre prévoit ainsi le développement de 50 millions de tonnes de capacité annuelle de stockage géologique de CO₂ au sein de l'Union Européenne d'ici 2030, ainsi que des obligations pour les producteurs d'hydrocarbures de contribuer à l'atteinte de ces objectifs.

La Commission Européenne a également publié le 6 février 2024 une première version de la stratégie pour la gestion industrielle du carbone, mettant l'accent sur le développement des capacités de stockage, du réseau de transport ainsi que la mobilisation d'instruments financiers existants pour développer ces projets en ligne avec les besoins pour atteindre la neutralité climatique en 2050. La Commission Européenne projette ainsi un développement de la capture du CO₂ pouvant atteindre 280 MTCO₂e en 2040 et 450 MTCO₂e en 2050, ces volumes incluant des émissions négatives, des réductions d'émissions et de l'utilisation du CO₂.

De nombreux projets de stockage de CO₂ sont en cours de construction ou de développement en Europe, en particulier en Norvège, au Danemark, aux Pays-Bas, en Italie et en Grèce.

L'Europe déjà engagée dans le développement de projet CCUS

Plusieurs réglementations européennes ont déjà été prises concernant le CCUS. La possibilité de recourir au stockage de carbone est par exemple déjà prévue par le Système d'Echange de Quotas d'Emissions de l'Union Européenne. Plus récemment, la Commission Européenne a proposé le *Net Zero Industry Act*, identifiant le CCUS comme l'une des technologies importantes à développer pour l'atteinte de nos ambitions climatiques européennes. La Commission a également publié une stratégie sur la gestion industrielle du carbone³ donnant les orientations qu'elle compte prendre dans les prochaines années sur ce sujet.

2 Haut Conseil pour le Climat, Avis sur la stratégie de capture du carbone, son utilisation et son stockage – Novembre 2023

3 Disponible ici : [EUR-Lex - 52024DC0062 - FR - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

Norvège

La Norvège est un des pays les plus avancés en matière de CCS, avec une stratégie établie en 2014, fruit de plus de 25 ans de recherches et d'expérience dans ce domaine, ainsi qu'un environnement législatif et financier très favorable au développement de la filière. Le pays est impliqué dans **neuf projets CCS** permettant de stocker 1,7 MtCO₂ par an actuellement et plus de **40 MtCO₂ par an à horizon 2030**.

La Norvège, petit émetteur de gaz à effet de serre (36 MtCO₂ par an) par rapport à d'autres pays développés, dispose d'un grand **potentiel de capacité de stockage** (estimé à **80 Gt, exclusivement offshore**). Par conséquent, ce potentiel constitue une opportunité pour le stockage de CO₂ en provenance d'émetteurs étrangers.

La France a engagé un partenariat stratégique sur les industries vertes avec la Norvège, qui prévoit notamment la facilitation du stockage de CO₂. Les deux pays ont organisé un forum des industries vertes le 16 janvier 2024 puis une rencontre entre industriels français et norvégiens du stockage de CO₂ le 17 juin 2024.

Projet	Date de mise en opération prévisionnelle	Capacité de stockage	Remarques
Sleipner	1996	0,9 MtCO ₂ /an	Première réalisation de CCS offshore dans le monde, pour la purification du gaz naturel extrait
Snohvit	2007	0,7 MtCO ₂ /an ; Total : 30-40 MtCO₂	Pour la purification du gaz naturel extrait
Northern Lights	2025	1,5 MtCO ₂ /an Puis 5 MtCO ₂ /an à partir de 2030 ; Total : 100 Mt	Premier projet commercial Plusieurs émetteurs français sont en discussion avancée pour un contrat de stockage
Barents Blue	2025	2 MtCO ₂ /an Total : 100 Mt	-
Smeaheia	2028	5 MtCO ₂ /an en phase 1 Puis 15-30 MtCO ₂ /an en 2035	Transport du CO ₂ par bateau puis par un réseau de pipelines relié à la côte nord-ouest européenne (<i>CO₂ Highway Europe</i>)
Havstjerne	2028	7 MtCO ₂ /an ; Total : 200 Mt	Site qui sera ouvert aux émetteurs européens (discussion en cours avec Pays Baltes, Pays-Bas, Portugal, Espagne)
Poseidon	2030	5 MtCO ₂ /an	-
Luna	2030	5 MtCO ₂ /an	-
Trudvang	2030	9 MtCO ₂ /an ; Total : 225 Mt	-

Tableau 1 – Principaux projets de stockage norvégiens

Danemark

Le **Danemark** a mis en place une stratégie dotée de 5 milliards d'euros pour développer tous les éléments de la chaîne de valeur CCS, ainsi que pour capter et stocker 3,2 Mt de CO₂ par an dès 2030.

Le potentiel de stockage danois à horizon 2035 est estimé à 45 Mt de CO₂ par an. Les capacités de stockage totales seraient de 12 à 25 Gt dans le sous-sol danois, à la fois sur terre, à proximité du littoral et en mer.

Le pays a déjà signé des accords bilatéraux avec la France, la Belgique, l'Allemagne, le Pays-Bas, la Norvège et le Royaume-Uni. Le Danemark mène actuellement **cinq projets** de stockage géologique : Greensand (1,5 MtCO₂/an en 2025 puis 8 Mt en 2030), Bifrost (16 MtCO₂/an en 2032), Stenlille (0,5 MtCO₂/an en 2025), Norne (2 MtCO₂/an en 2027 puis 20 Mt en 2030) et Rodby (1 MtCO₂/an en 2027 puis 5-10 Mt en 2030).

Pays-Bas

Les **Pays-Bas** visent un maximum de 7,2 Mt d'émissions nationales de CO₂ par an à capter, soit 50% des émissions de l'industrie du pays. Trois projets de CCS offshore sont en cours de développement, avec des degrés de maturité assez élevés : Porthos (2,5 MtCO₂/an en 2026) et Aramis (5 MtCO₂/an en 2030 et 7,5 Mt à terme), qui comprennent des réseaux de pipelines conséquents, ainsi que L10 (5 MtCO₂/an après 2030, puis 9 Mt à terme), dédié uniquement au stockage.

Italie

Le seul projet de stockage actuellement recensé en **Italie** est celui de Ravenne, qui ambitionne de devenir le pôle CCS de référence en mer Méditerranée. Il concerne un ensemble de gisements d'hydrocarbures arrivant peu à peu en fin d'exploitation et qui seront progressivement convertis en autant de sites de stockage de carbone, avec un démonstrateur en 2024 (25 ktCO₂/an), puis des capacités allant à 4 Mt d'ici 2027 et 16 Mt à partir de 2030. La capacité totale de stockage est estimée à 500 Mt.

Ravenne est intégré au projet d'intérêt européen commun « Callisto » qui prévoit le déploiement d'infrastructures dès 2029 pour transporter et stocker en Italie les émissions des sites industriels de Fos-Marseille (6,4 MtCO₂/an envisagés à terme).

Grèce

Le développement du CCS en **Grèce** est récent. Cependant, le projet Prinos, dont sont partenaires la Bulgarie, Chypre, la Croatie, l'Italie et la Slovénie, pourrait devenir un site de stockage clé pour l'Europe du Sud-Est. Des infrastructures pétrolières et gazières existent déjà et elles pourraient être assez rapidement adaptées pour stocker 3 MtCO₂ par an d'ici 2027, avec une capacité totale estimée à 60-70 MtCO₂.

Retours de la consultation sur la stratégie nationale CCUS en France

Dans le cadre des travaux de la planification écologique, le Gouvernement a publié des premières orientations stratégiques en 2023, sur les modalités d'intervention et l'action publique pour soutenir le développement du CCUS en France. Cette publication a été suivie d'une mise en consultation de cette stratégie⁴.

Comptabilisant plus de 90 contributions d'une grande diversité d'acteurs, les résultats montrent un consensus global sur la nécessité de déployer le CCUS, les contributeurs accueillant favorablement l'initiative française de se doter d'une stratégie nationale pour encadrer le développement du CCUS en France en la matière :

- **Les acteurs privés** (entreprises, fédérations) expriment notamment un besoin de clarification du cadre de régulation et des modalités de soutiens publics alloués au CCUS, pour motiver les décisions d'investissements ;
- **Les acteurs de la société civile** (associations, citoyens) attirent l'attention du gouvernement sur la nécessité d'un développement maîtrisé et ne devant pas occulter les autres leviers de décarbonation (efficacité énergétique, électrification), afin de ne pas faciliter le maintien de dépendances aux énergies fossiles.

Parallèlement, le Haut Conseil pour le Climat a émis un avis sur les premiers éléments de stratégie nationale CCUS⁵. Cet avis relève un certain nombre de points devant être éclaircis comme « la comptabilité carbone du CCUS, les responsabilités des différentes parties prenantes, et les stratégies d'investissement dans ces technologies » afin limiter les incertitudes sur le développement du CCUS en France.

Par ailleurs, le Haut Conseil estime que ces incertitudes doivent conduire à une priorisation du CCUS vers des usages visant à la réduction des émissions résiduelles qui ne peuvent être supprimées à la source, en complément des actions de sobriété et d'efficacité énergétique.

Pour autant, Le Haut Conseil pour le Climat conclut que le CCUS peut servir de levier de décarbonation en France, en appui aux réductions d'émissions du secteur de l'industrie.

⁴ <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/actualites/consultation-sur-la-strategie-nationale-ccus>

⁵ <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/avis-sur-la-strategie-de-capture-du-carbone-son-utilisation-et-son-stockage-ccus/>

CAPTAGE

Trajectoire CCUS : un potentiel de baisse de 5 à 10% des émissions industrielles en 2030, et la génération d'émissions négatives à horizon 2050.

Les objectifs de la planification écologique en matière de décarbonation et de souveraineté industrielle impliquent de déployer rapidement les premières chaînes CCUS au niveau des grandes zones industrielles, puis de capter le carbone provenant d'autres secteurs d'activités et d'émetteurs plus diffus. L'Etat envisage donc plusieurs phases de déploiement du CCUS :

- **2025-2030, des premiers déploiements pour capter 4 à 8 MtCO₂/an dans l'industrie** au niveau notamment des hubs industrialoportuaires du Havre, Dunkerque, Saint-Nazaire et de l'axe Rhône.
- **2030-2040, une deuxième phase de déploiement permettra de capter 12 à 20 MtCO₂/an**, portée par le développement de nouveaux réseaux CCS, des évolutions réglementaires du marché carbone européen et l'extension du captage de CO₂ à d'autres secteurs d'activités émissives, telles que l'incinération des déchets, et à une partie des émissions d'origine biogénique.
- 2040-2050, la décarbonation profonde de l'industrie et l'atteinte de la neutralité climatique devraient nécessiter le captage de 30 à 50 MtCO₂/an. Ces volumes impliqueront de capter l'ensemble des émissions résiduelles des sites industriels très émissifs, et de développer de nouvelles sources de CO₂, telles que le bioraffinage, ou si nécessaire la capture du CO₂ atmosphérique (DAC).

Des dispositifs de soutien existants devant être renforcés :

- **Des dispositifs de soutien en amont des projets industriels de CCS sont déjà déployés en France :**
 - Des soutiens à la Recherche et au Développement, contribuant au dynamisme de l'écosystème français en matière de CCS sur l'ensemble de la chaîne de valeur ;
 - Des soutiens à la réalisation d'études stratégiques dans les Zones Industrielles Bas Carbone (ZIBaC), facilitant les décisions finales d'investissements des consortiums régionaux émetteurs.
- **L'État soutiendra le déploiement des premiers grands projets de CCS.** Ce soutien public, versé aux émetteurs, permettra de couvrir les coûts liés au CCS tout en tenant compte des économies sur le coût évité de l'EU-ETS (€/tCO₂ captée et stockée) sur des durées suffisamment longues pour favoriser les investissements privés.

Trajectoire CCUS : un déploiement progressif commençant par les zones industrielles les plus émettrices

Un tissu industriel français, fortement concentré autour de 7 grands hubs industriels, propice à une planification régionale

Les 110 plus gros émetteurs industriels français sont majoritairement répartis (90 % du volume d'émissions) au niveau de 7 grands clusters industriels, dont 4 disposent d'une façade maritime (Fos-sur-Mer, Dunkerque, Le Havre, Saint-Nazaire) rendant possible l'export de CO₂ vers des sites de stockage en mer. Les zones situées dans le Bassin parisien, dans le Sud-Ouest, voire le Grand Est, pourraient également bénéficier de stockages à terre, voire d'un raccordement à un futur réseau de transport du CO₂ en cas de quantités suffisantes.

Ces objectifs français en matière de CCUS ont été coconstruits par l'État et les industriels, en intégrant :

- **Les besoins en CCUS exprimés par les industriels dans le cadre de la planification écologique** et de l'élaboration des feuilles de route de décarbonation des 50 plus grands sites industriels. Ces besoins sont également mentionnés dans les Plans de Transition Sectoriels réalisés par l'ADEME. Ces feuilles de route montrent qu'à court et moyen termes, le recours au CCUS est massivement envisagé pour réduire les émissions des sites industriels, en particulier pour le secteur de la chimie, des engrais, du ciment, de la chaux et de la métallurgie ;
- **Les travaux interministériels visant à inclure ces besoins dans une logique intégrée de déploiement territorial**, en lien avec les appels à projets France 2030 « Zones Industrielles Bas Carbone » (ZIBaC) et des perspectives de déploiement de stockages souverains ;
- Les travaux de révision de la **Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)**.

Trajectoire détaillée du captage de CO₂ en France

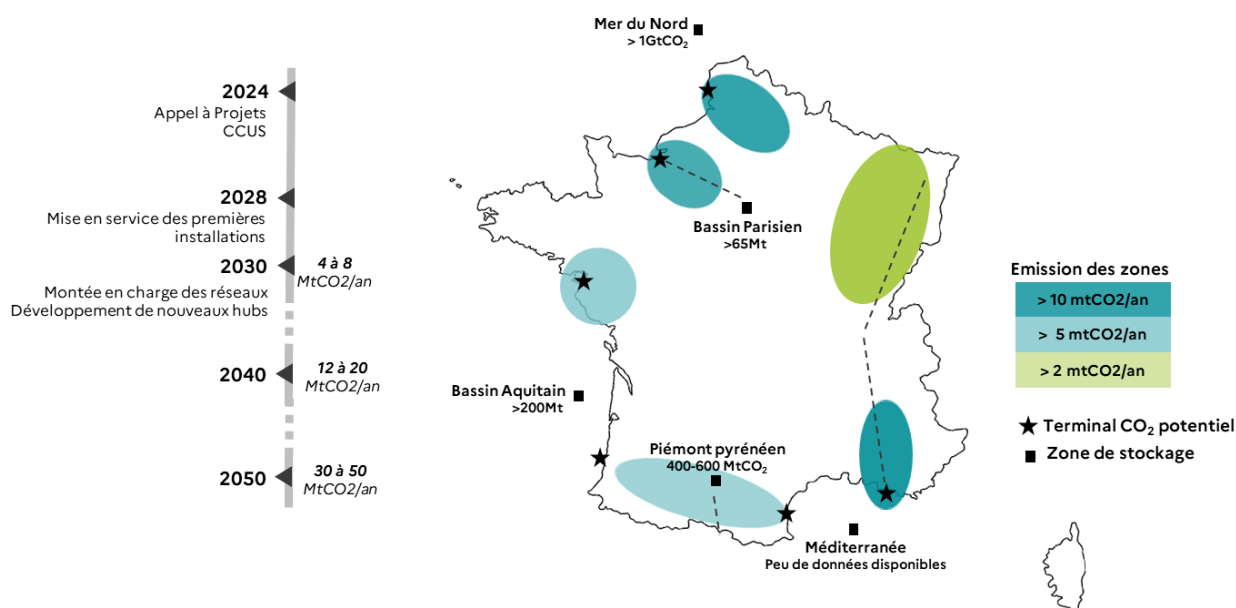


Figure 1 : Carte de la trajectoire du CCUS en France

Phase 1 : 2024-2030, le développement d'au moins deux hubs CCUS permettrait d'atteindre des volumes de captage de 4 à 8 MtCO₂/an en 2030

Le dispositif de soutien à la décarbonation profonde de l'industrie mis en consultation⁶ le 26 Juin devrait faire émerger entre deux et quatre hubs CCUS au niveau des zones industrialo-portuaires de Dunkerque, Fos-sur-Mer et l'axe Rhône, Le Havre et Saint-Nazaire. Ces zones sont particulièrement adaptées à des premiers déploiements puisqu'elles présentent une forte concentration de grands sites émetteurs industriels, d'opérateurs d'infrastructures mutualisées parfois déjà existantes (terminaux de liquéfaction, pipeline, etc.) et des possibilités de transport maritime vers des stockages de CO₂ principalement localisés en Mer du Nord et Méditerranée.

En considérant un délai de déploiement des chaînes CCUS de 3 à 5 ans suivant la décision d'investissement, au moins deux hubs CCUS pourraient voir le jour d'ici 2030, avec un premier hub potentiellement fonctionnel dès 2028. Les volumes de CO₂ capté par cluster varient de 1,5 à 4 MtCO₂/an, permettant d'envisager, avec le développement de deux à quatre hubs CO₂, de capter 4 à 8 MtCO₂/an à horizon 2030.

Phase 2 : 2030-2040, le développement de stockages souverains et les évolutions réglementaires permettraient de capter entre 12 à 20 MtCO₂/an à horizon 2040

La révision de l'EU-ETS, prévue en 2026, pourrait s'accompagner de plusieurs modifications majeures, dont le développement d'un cadre incitatif pour les émissions négatives issues du captage d'émissions biogéniques.

En outre, il est attendu que des stockages souverains, onshore notamment, se développent après 2030 en France, ce qui permettra (i) de désenclaver certaines zones industrielles éloignées des stockages étrangers, comme le bassin parisien, la Méditerranée ou le piémont pyrénéen, et (ii) de faire baisser les coûts du CCS.

Le développement de nouveaux hubs CO₂ et la montée en charge des hubs existants à travers un prolongement progressif des infrastructures de transport sous la forme de vallées CO₂ permettraient d'atteindre un volume de CO₂ capté compris entre 12 et 20 MtCO₂/an.

Phase 3 : 2040-2050, les quantités de CO₂ captées pourraient atteindre 30 à 50 Mt/an

L'objectif de captage de CO₂ à horizon 2050 est plus incertain, mais l'ambition de capter 30 à 50 MtCO₂/an semble réaliste au regard de l'objectif politique de neutralité carbone. Ces volumes pourraient être atteints en considérant :

- Un réseau d'infrastructures CO₂ à l'échelle nationale et européenne, permettant le raccordement d'émetteurs isolés en particulier, le raccordement des installations d'incinération de déchets et des chaufferies de chauffage urbain dans les grandes agglomérations proches des vallées CO₂.

⁶ Disponible ici : [Actualité entreprises | Entreprises | Agir pour la transition écologique | ADEME](#)

- Le développement d'émissions négatives via le captage du CO₂ issu des bioénergies ou directement retiré dans l'air ;
- L'implantation de nouveaux sites industriels, en particulier dans le secteur du bioraffinage ;
- L'atteinte de la décarbonation profonde des plus grands sites, conformément aux engagements mutuels des industriels émetteurs et de l'État dans le cadre des Contrats de Transition Ecologiques.

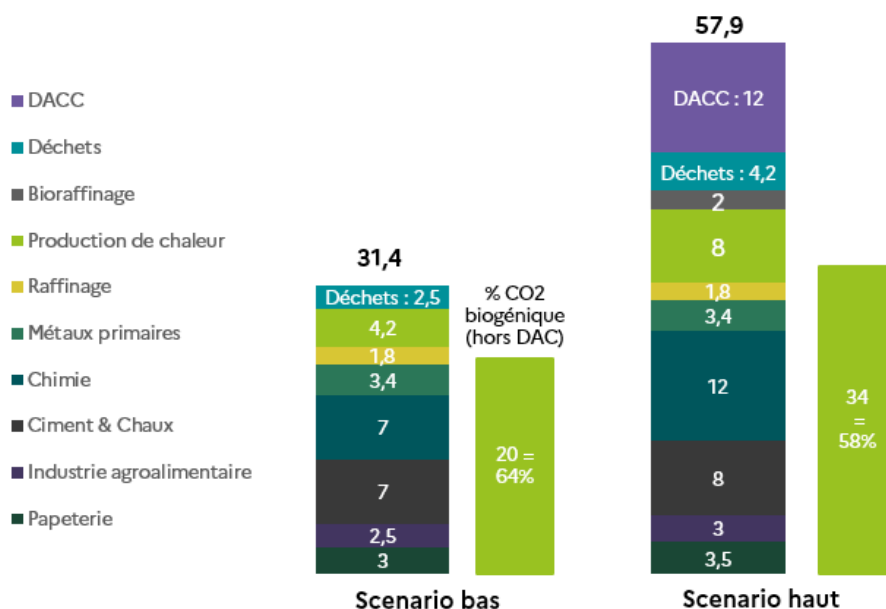


Figure 2 : Prévisions 2050 en MtCO₂/an captées, par origine et par destination

Ces chiffres sont de premières estimations, qui pourraient évoluer avec les orientations définitives de la Stratégie Nationale Bas Carbone, notamment l'hypothèse sur le DACC qui est dérivée des estimations de la Commission européenne dans sa communication sur le management industriel du carbone⁷ (de l'ordre de 100-150 MtCO₂ au niveau européen en 2050).

Soutien au déploiement du CCUS

Dispositifs existants pour soutenir l'amont des projets de CCUS

Des programmes nationaux pour financer la recherche et l'innovation de la chaîne de valeur CCUS

Le Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) "Soutenir l'innovation pour développer de nouveaux procédés industriels largement décarbonés" (SPLEEN) a vocation à encourager et à soutenir des activités de recherche amont, dans la gamme TRL 1-4, dans le domaine de la décarbonation de l'industrie. Sur les dix projets lancés en 2023 pour un budget de 35 M€, mobilisant des communautés structurées autour de ces enjeux majeurs, 6 projets sont en lien avec les sujets de CCUS.

⁷ COM(2024) 62 final

Les appels à projet IBaC PME et DEMIBaC du programme France 2030 permettent de soutenir les briques technologiques et démonstrateurs innovants permettant de décarboner l'industrie, y compris relatifs à la chaîne CCUS.

ZIBaC : un dispositif pour accompagner la planification territoriale des hub CCUS

A travers l'appel à projets France 2030 « **Zone Industrielle Bas Carbone (ZIBaC)** », l'État accompagne les territoires industriels dans leur transformation écologique et énergétique afin de gagner en compétitivité et en attractivité dans une logique de décarbonation et de réindustrialisation du territoire.

Aujourd'hui, ce sont 4 zones qui ont été lauréates dans un premier temps, se situant dans les zones industrielles les plus émettrices, suivies de 6 nouvelles zones, également dans les zones industrielles identifiées comme étant fortement émettrices (cf Figure 3). ZIBaC permettra de financer de nombreuses études en lien avec le CCUS, portant en particulier sur les flux de CO₂ pertinents au sein des zones industrielles, les infrastructures et les réutilisations d'infrastructures, et la pertinence économique du CCUS.

Des dispositifs européens permettant de financer des projets de capture du CO₂ à l'échelle industrielle

L'innovation Fund (IF), ou Fonds européen pour l'Innovation, est l'un des plus importants programmes de financement au monde pour la démonstration de technologies innovantes à faible teneur en carbone, dont le CCUS. Ce sont aujourd'hui 26 projets de CCUS, dont trois en France, qui ont reçu des financements de l'Innovation Fund à hauteur de 3.3 Mds€. Deux projets français de capture et stockage du carbone concernent le déploiement d'une chaîne complète de captage, transport et stockage depuis les **sites français d'Eqiom et Lhoist dans le Dunkerquois** avec du stockage en Mer du Nord, permettant d'atteindre un objectif de baisse de 1,5 MtCO₂/an dès 2030. Un projet de capture et utilisation du CO₂ porté par Elyse Energy avec du CO₂ issu d'une cimenterie de Lafarge pour la production d'e-méthanol a également été sélectionné.

Le programme Européen Horizon Europe a également permis de soutenir le développement de projets CCUS de recherche et d'innovation sur le territoire français :

- **Le pilote 3D de captage de CO₂ à Dunkerque**, lancé en 2022 et piloté par un consortium comprenant Axens, Arcelor Mittal, l'IFPEN et TotalEnergies devant permettre de vérifier à l'échelle d'un pilote industriel les performances du procédé de captage de CO₂ DMX™ développé dans les laboratoires d'IFPEN depuis plus de 10 ans.
- **Le projet Pilot Strategy (2021-2026)**, piloté en France par le BRGM, qui vise à identifier les formations géologiques adaptées au stockage de CO₂ en Europe, et à étudier les enjeux liés au déploiement d'un pilote de stockage de CO₂, d'un point de vue technique, économique, social et environnemental.

Le CCUS dans la pratique : les chantiers en cours de l'écosystème CCUS de Dunkerque

- **Capture du carbone sur le territoire : programme « K6 » et projet CalCC**

La cimenterie d'EQIOM à Lumbres (50 km de Dunkerque) fabrique chaque année 800 000 tonnes de ciment. Un tiers des émissions est lié à la combustion d'énergies fossiles pour chauffer le four rotatif à 1 400 °C ; les deux tiers restants sont liés à la réaction chimique de la production du matériau.

Le programme K6 du groupe EQIOM vise la décarbonation à 100% du site dès 2028, en installant une nouvelle ligne de production avec une meilleure efficacité énergétique et en substituant les combustibles fossiles par des énergies renouvelables. La seconde phase du programme se concentre sur la capture des émissions résiduelles qui sont incompressibles. A cet effet, la technologie Cryocap Oxy d'Air Liquide sera installée dans la cimenterie et alimentée par un nouveau raccordement électrique souterrain de 13 km assuré par RTE.

L'usine de LHOIST à Réty (70 km de Dunkerque) est le premier site de production de chaux en France (700 000 tonnes chaque année). Ce matériau est utilisé notamment dans la production d'acier, la construction, l'agriculture, et présente des enjeux de décarbonation similaires à ceux du ciment. Le projet de décarbonation CalCC du groupe LHOIST vise à installer une unité de captage Cryocap FG d'Air Liquide, dès 2028 afin de neutraliser les émissions incompressibles intrinsèques au procédé, en complément d'actions d'efficacité énergétique et du déploiement d'énergies renouvelables.

A terme, ces deux projets permettront d'éviter le rejet de 1,5 MtCO₂ par an, soit l'équivalent des émissions de plus de 800 000 véhicules particuliers.

Ces deux projets ont été lauréats de l'appel d'offres « Fonds d'Innovation » de la Commission Européenne pour 270 M€ en 2021 et 2022, ce qui a permis de lancer les travaux de construction des deux installations de capture de carbone qui entreront en service d'ici 4 ans.

- **Transport : projets D'Artagnan et GRTgaz-Equinor**

Mené par Air Liquide et Dunkerque LNG, le projet d'Artagnan prévoit le développement des infrastructures nécessaires au transport et à l'exportation de 1,5 MtCO₂ dès 2027 et 4 MtCO₂ à moyen terme. Ainsi, un réseau de 80 km de canalisations permettra d'acheminer le carbone issu des usines de Lumbres et de Réty vers un terminal CO₂ sur le port de Dunkerque. Après liquéfaction, dans un premier temps, le carbone sera chargé sur des navires, en vue de leur expédition vers les sites de stockage.

Ce projet, nommé d'Artagnan, a reçu en juin 2024 un soutien financier de 160 M€ de la Commission Européenne au titre du mécanisme pour l'interconnexion en Europe.

A plus long terme, ce CO₂ a vocation à être transporté par une canalisation (carboduc). A la suite d'un accord conclu le 17 juin dernier, suite à la visite du ministre Roland Lescure en Norvège en octobre 2023, GRTgaz et le norvégien Equinor ont lancé un projet de canalisation reliant directement Dunkerque aux stockages de CO₂ en mer du Nord au large de la Norvège. Ce projet permettra d'exporter 3 à 5 MtCO₂ à compter de 2029.

• **Stockage sous-marin en Mer du Nord**

Les partenariats conclus ou en cours de discussion avec les pays bordant la Mer du Nord (notamment la Norvège, le Danemark et les Pays-Bas) permettront de stocker durablement le carbone émis par les industriels des alentours de Dunkerque. En particulier, un accord de partenariat stratégique avec la Norvège a été concrétisé en janvier 2024, trois mois après le déplacement de Roland Lescure, ministre de l'Industrie, sur le site du projet Northern Lights. Ce stockage permettra de séquestrer 1,5 MtCO₂ par an d'ici 2025 et jusqu'à 5 MtCO₂ à horizon 2026. Les industriels français sont d'ores et déjà en discussion pour y stocker leurs émissions.

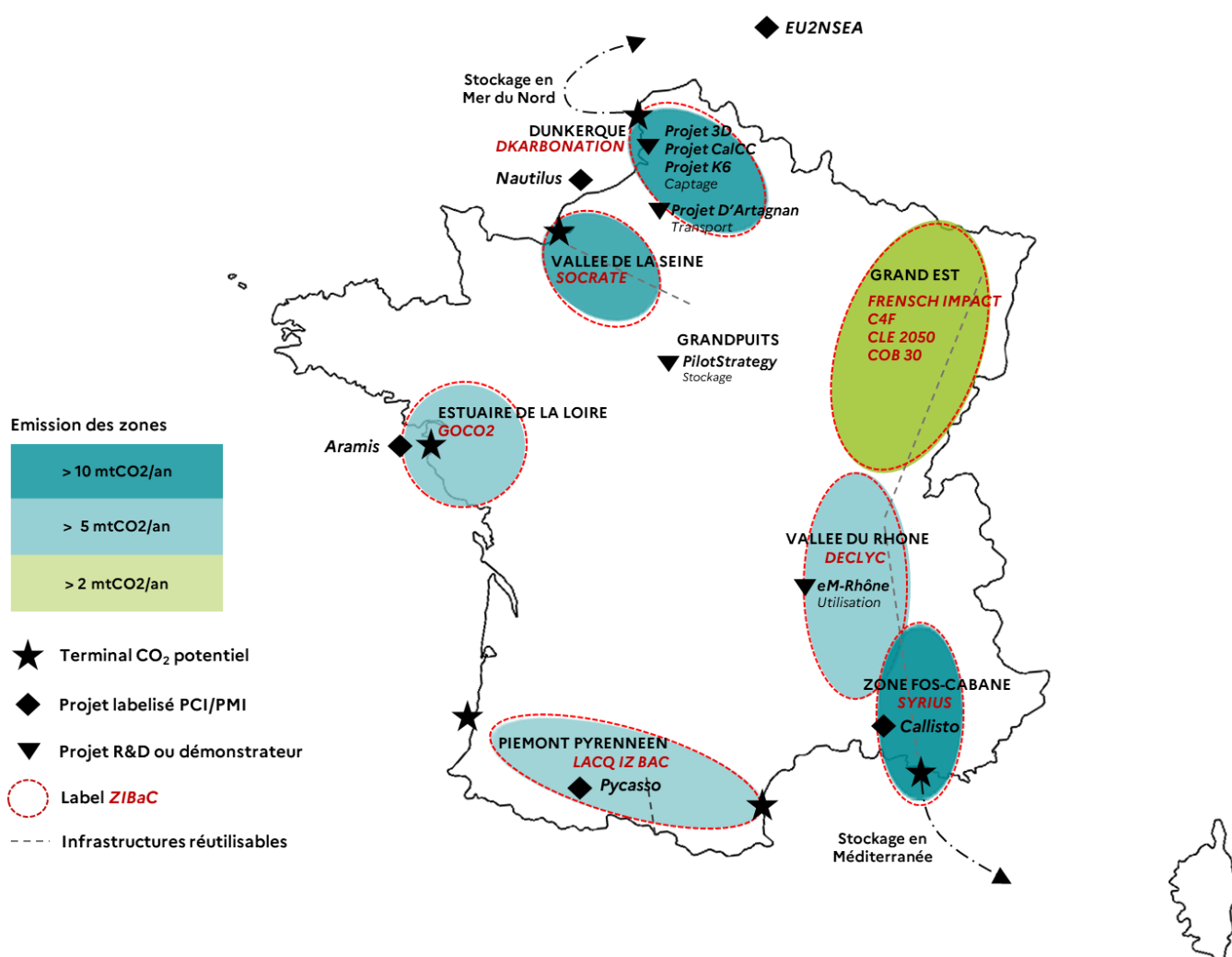


Figure 3 : Carte de déploiement des différents projets CCUS en France

Lancement d'un nouveau soutien pour accompagner le déploiement des premiers grands hubs CO₂

Un dispositif de soutien au déploiement complémentaire de l'EU-ETS

Le cadre européen des lignes Directrices sur les aides d'État en faveur du Climat, de l'Environnement et de l'Énergie permet aux États de soutenir les projets de décarbonation de l'industrie, tout en évitant les effets potentiels de distorsion de la concurrence au sein de l'Union Européenne. En janvier 2024, l'État a initié des discussions avec la Commission Européenne pour valider le mécanisme de soutien français, permettant de soutenir les grands projets de décarbonation dont les besoins en soutiens publics sont supérieurs à 20 M€, ce qui devrait être le cas de la plupart des projets CCS initiaux. Dans le cadre de ces discussions, un dispositif de soutien comprenant le CCS a été mis en consultation le 26 Juin.

Le soutien au CCS sera réalisé en octroyant des subventions aux projets industriels permettant de réduire leurs émissions. Il visera à déclencher les investissements dans un contexte où les incitations financières liées au marché carbone ne sont pas encore suffisantes pour permettre les investissements dans des projets à l'échelle industrielle. Le soutien sera octroyé aux émetteurs industriels pour leur permettre de limiter les surcoûts liés au captage et aux dépenses opérationnelles liées à l'utilisation des infrastructures de transport et de stockage.

Ce soutien visera à compenser la différence entre le coût du carbone payé au titre des mécanismes européens et les coûts de captage, transport et stockage payés par l'industriel, afin de donner une rentabilité suffisante à l'investissement. Ce type de mécanisme, de type « contrat carbone pour différences »⁸, est déjà mis en œuvre dans plusieurs pays comme les Pays-Bas, l'Allemagne, le Danemark et le Royaume-Uni pour soutenir les projets de CCS. Au-delà des frontières européennes, les Etats-Unis ont mis en place un crédit d'impôt pouvant aller jusqu'à 85 USD/tCO₂ pour les industriels captant et stockant leur CO₂.

Le financement sera octroyé aux industriels émetteurs pour une durée de 15 ans avec un versement annualisé de l'aide en fonction des émissions effectivement séquestrées. Ce type d'aides permettra indirectement de soutenir le déploiement de ces infrastructures, en particulier en fournissant de la visibilité aux investisseurs.

Une priorisation du soutien au déploiement du CCUS selon la nature des émetteurs

La capture, l'utilisation, et le stockage du CO₂ constituent des leviers importants de réduction des émissions industrielles, en particulier pour les émissions incompressibles de procédés qui ne peuvent être réduites par des actions d'efficacité énergétique, d'électrification, de recours à la biomasse, de recyclage ou d'autres changements de procédé. Ces besoins sont notamment matérialisés dans les contrats de transition écologique (CTE) signés entre l'État et les industriels les plus émetteurs, ainsi que dans les Plans de Transition Sectoriels réalisés par l'Ademe⁹.

La capture de carbone doit être priorisée sur les émissions résiduelles incompressibles, en l'absence d'autres solutions de décarbonation, afin de

⁸ Carbon Contract for Difference - CCfD

⁹ Disponibles ici : <https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/plans-transition-sectoriels>

permettre une décarbonation profonde des sites industriels couverts par les marchés du carbone, en particulier ceux concernés par la fin des allocations gratuites de quotas de carbone en 2034. A plus long terme, l'atteinte de la neutralité carbone et les besoins de CO₂ biogénique pour la production d'e-carburants, nécessiteront de capter le CO₂ issus de la combustion des bio-énergies.

Pour l'industrie cimentière, le CCUS sera mobilisé pour réduire les émissions de procédés de production de clinker qui constituent environ deux tiers des émissions de CO₂ des cimenteries. Si la modification du taux de clinker, l'efficacité énergétique et le recours à la biomasse permettent une diminution des émissions du secteur cimentier, la neutralité carbone ne peut pas être atteinte pour la production de clinker sans un recours au CCUS ou un changement majeur dans la formulation des ciments. Il en va de même pour la **production de chaux**. A terme, la capture du CO₂ biogénique (issu de la combustion de biomasse) de ces secteurs sera également nécessaire pour générer des émissions négatives et atteindre la neutralité carbone.

Pour l'industrie chimique, le recours au CCUS est nécessaire pour atteindre la cible ambitieuse de division par deux des émissions en dix ans prévue par la feuille de route de la filière. En effet, même si la chimie peut largement électrifier ses procédés ou recourir à des sources de chaleur décarbonée, de nombreux procédés produisent du CO₂ ce qui rend difficile de réduire ces émissions autrement qu'en les captant.

Pour l'acier, le recours à la réduction directe du minerai de fer par de l'hydrogène produit par électrolyse est la solution aujourd'hui envisagée pour réduire à terme les émissions du secteur. Cette technologie permet aussi de sortir de la dépendance aux énergies fossiles, comme le charbon aujourd'hui utilisé ou le gaz naturel qui pourrait être utilisé en transition. En fonction de du coût pour les entreprises et du coût pour l'Etat de la solution hydrogène, le CCUS pourra donc être employée dans la décennie à venir, dans une logique transitoire ou en complément d'une solution H₂ sur la réduction directe ou sur d'autres procédés sidérurgiques.

Pour l'aluminium primaire, bien que le CO₂ soit émis en faible concentration, la capture peut être envisagée compte tenu de la maturité limitée des procédés utilisant une anode inerte, nécessitant à ce stade de se baser sur des anodes carbonées.

À terme, d'autres secteurs, comme l'incinération des déchets, la transformation de la biomasse, le secteur papetier voire l'industrie agro-alimentaire, pourraient également déployer des projets CCUS, en fonction des évolutions de l'ETS.

TRANSPORT

Le CCUS nécessitera le déploiement d'infrastructures de transport de CO₂ en particulier pour connecter les bassins industriels régionaux aux hubs d'export du CO₂.

A l'instar d'autres secteurs économiques, les opérateurs d'infrastructures de transport pourraient faire l'objet d'une régulation, notamment s'ils sont en situation monopolistique.

La régulation garantira d'une part un accès transparent et non discriminatoire à ces infrastructures aux émetteurs dont les projets de CCS ne sont pas matures au moment du dimensionnement des infrastructures de transport.

D'autre part, une régulation permettra d'assurer une juste répartition de la valeur sur l'ensemble de la chaîne CCS, y compris des opérateurs de transport.

Il n'est pas prévu de mécanismes subventionnels complémentaires pour le déploiement des infrastructures de transport, au-delà des fonds européens qui peuvent venir aider au déploiement d'infrastructures transfrontalières.

Un enjeu de déploiement des infrastructures de transport

Plusieurs modalités de transport du CO₂ existent pour relier l'émetteur vers un lieu de stockage ou terminal de liquéfaction (en vue de son export vers un site de stockage situé à l'étranger) : transport routier, fluvial, rail ou canalisation. La logistique par canalisation constituera à terme la colonne vertébrale des réseaux de CCUS régionaux, dans les cas où des volumes de CO₂ importants doivent être transportés et sur des périodes d'amortissement suffisantes. Ces infrastructures ont vocation à constituer des actifs privés.

Le dispositif de soutien à la décarbonation versés aux émetteurs permettra de soutenir le déploiement des infrastructures de transport nécessaires et pertinentes en permettant aux industriels de s'engager sur des contrats longs-termes d'une période de 15 ans. Parallèlement, les mécanismes d'interconnexion européens pourraient soutenir certaines infrastructures et en particulier leur bon dimensionnement

Les financements du « Mécanisme d'Interconnexion Européen - Energie » (MIE-E ou TEN-E en anglais) peuvent notamment permettre de financer une partie des infrastructures transfrontalières de CO₂. Les projets labellisés « Projet d'Intérêt Commun » (PIC ou PCI en anglais) par la Commission Européenne peuvent solliciter des financements MIE-E. Actuellement, la France compte plusieurs projets avec hubs CCS labellisés PCI, dont les projets **Callisto** (hub de captage et stockage dans le bassin méditerranéen), **Nautilus** (réseau d'export de CO₂ vers la Mer du Nord incluant la zone industrielle du Havre et Dunkerque), et **Pycasso** (hub de transport et stockage on-shore dans le Sud-Ouest de la France).

L'État vise un développement rapide des infrastructures structurantes pour la décarbonation des territoires industriels et envisage une mise en service du premier réseau de transport de CO₂ sur le territoire national à l'horizon 2028.

Un cadre de régulation nécessaire pour développer les infrastructures de transport

Les infrastructures de transport mutualisé de CO₂ par pipeline présentent certaines caractéristiques communes avec les réseaux de transport de gaz ou d'électricité, en particulier le caractère de monopole naturel lié aux économies d'échelle et le risque de constitution de situations de rente préjudiciables au coût global du CCUS et du besoin de soutien public afférents.

Une intervention publique afin d'assurer la bonne répartition de la valeur sur l'ensemble de la chaîne de capture, de transport et de stockage du dioxyde de carbone pourrait favoriser les investissements privés.

Lors de la consultation menée auprès des acteurs industriels et des financeurs, la mise en place d'une régulation économique a été soutenue, notamment par les sites industriels émetteurs, dans les conditions suivantes :

- que le cadre de régulation soit connu ou mis en place avant les décisions d'investissement ou la passation des contrats d'accès entre les industriels et les opérateurs de transport ou ne remette pas en cause les contrats déjà conclus ;
- que ce cadre soit adapté aux caractéristiques des réseaux de transport de CO₂ : nombre de clients limité et infrastructures en cours de

déploiement.

La fragmentation de la chaîne de valeur du CCS, impliquant une grande diversité d'acteurs et de modèles économiques, demande une approche régulatoire plus flexible que pour l'électricité et le gaz, qui sont des marchés beaucoup plus matures, avec des acteurs issus de monopoles historiques et avec des enjeux d'accès territoriaux plus forts.

L'Union Européenne devrait se saisir des questions de régulation du transport de CO₂ au-delà des règles déjà prévues par la directive CCS, mais les réflexions restent préliminaires à ce stade. D'éventuelles évolutions européennes ne sont pas attendues dans les prochaines années, et devraient contenir des éléments sur la non-remise en cause des contrats déjà conclus.

Dès lors, la France se propose de mettre en œuvre au niveau national, sans attendre la possible réglementation européenne, un cadre de régulation national fondée sur les principes définis par le droit européen existant (directive 2009/31/CE), à savoir la transparence et le libre accès aux infrastructures de transport et stockage.

Accélérer le déploiement des premiers hubs en adoptant une régulation souple

Une régulation concernant l'accès au réseau principal (collecte et transport), ouvert aux tiers et reliant différents *clusters* et sites de stockages est envisagée. Sous la forme d'un « **ATR négocié** » (Accès des Tiers au Réseau), cette régulation permettrait d'assurer un cadre stable et prévisible aux émetteurs (tarifs et conditions de raccordement entres autres).

Le Gouvernement a demandé à la Commission de Régulation de l'Énergie son analyse sur les modalités les d'analyse des modalités les plus opportunes de régulation des infrastructures de CO₂.

Ce rapport, rendu en juin 2024, propose d'organiser à terme cette régulation selon les principes suivants, en fonction des caractéristiques des maillons de la chaîne de valeur :

- *Les activités de capture relèvent du domaine concurrentiel, il n'apparaît donc pas nécessaire de les réguler.*
- *Les activités de collecte par canalisation pourront être en compétition avec des activités non régulées (transport routier, fluvial ou ferroviaire). Afin de laisser les industriels s'organiser au sein des hubs, la CRE considère qu'il est préférable de prévoir un accès négocié, avec des obligations de transparence et de non-discrimination, contrôlées par la CRE.*
- *Le transport par canalisation, les terminaux de liquéfaction et le stockage de CO₂ constitueront très probablement des monopoles naturels. Ils seront donc en position de dégager une rentabilité excessive au détriment de la compétitivité des industriels émetteurs. La CRE recommande ainsi de prévoir dès à présent dans la loi la possibilité d'appliquer une régulation pour ces activités (accès des tiers régulé avec un tarif et des règles d'accès fixés par le régulateur). La régulation de tout ou partie de ces infrastructures pourra être décidée sur la base d'une analyse globale, incluant l'étude de la rentabilité des infrastructures, associé à une consultation publique des utilisateurs et donnant lieu à la publication de rapports réguliers (au moins tous les 3 ans).*
- *La CRE considère qu'une séparation comptable des activités de transport de CO₂ par canalisation, de stockage et de liquéfaction avec les autres activités de la chaîne de valeur est nécessaire pour permettre, dans un*

premier temps, un contrôle de la rentabilité de ces infrastructures, et, le cas échéant, d'établir les tarifs d'utilisation régulés reflétant les coûts¹⁰.

L'État envisage de mettre en œuvre ces recommandations de la CRE.

La CRE rendra un rapport détaillé au gouvernement avant la fin de l'année 2024, ce qui pourra constituer le support d'un cadre législatif pour le déploiement de ces infrastructures, dans le respect des principes énoncés ci-dessus.

Cet « **ATR négocié** » pourrait à terme évoluer en un « **ATR régulé** » dans la perspective de la création d'un réseau maillé. Cette évolution du cadre de régulation applicable aux opérateurs d'infrastructures de transport mutualisé¹¹ s'accompagnerait, d'après les travaux de la CRE, de plusieurs principes.

- Établissement de tarifs d'utilisations reflétant les coûts de l'opérateur sur un réseau donné qui serait considéré comme une base d'actifs régulés (BAR).
- Approbation par le régulateur des plans de développement de réseau et des investissements réalisés par les opérateurs de transport de CO₂.
- Maintien *a minima* d'une séparation comptable entre les activités de transport de CO₂ par canalisations et le reste des activités de l'opérateur.
- Encadrement et approbation des conditions de raccordement de nouveaux émetteurs utilisant les réseaux pour garantir notamment un accès non discriminatoire aux capacités de réseau non utilisées.

¹⁰ Rapport de la Commission de Régulation de l'Énergie sur le cadre de régulation des infrastructures d'hydrogène et de dioxyde de carbone - 06/06/2024

¹¹ Transport par pipeline, stockage intermédiaire, terminal maritime et installations de compression.

STOCKAGE

L'État facilitera l'accès aux stockages en mer du Nord et en Méditerranée, qui constituent à court terme les seuls exutoires opérationnels pour les émissions françaises, notamment via :

- La ratification de l'amendement de 2009 au Protocole de Londres, permettant l'export de CO₂ pour stockage dans les formations géologiques du sous-sol marin, qui sera présentée devant le Parlement français courant 2024 ;
- La conclusion d'accords bilatéraux avec les pays hors de l'Espace Economique Européen disposant de capacités de stockage.

Plusieurs actions stratégiques pour développer des capacités de stockage souveraines, plus compétitives et accessibles que le stockage à l'étranger, ont été lancées ou sont envisagées. Ces capacités garantiront une sécurité des opérations conformément à la réglementation française et européenne en vigueur. Ces actions concernent :

- Un état des lieux des potentiels théoriques de stockage géologique de CO₂ (en cours) ;
- Un appel à manifestation d'intérêt lancé fin avril 2024, afin d'identifier les acteurs intéressés pour accélérer le développement des capacités de stockage ;
- Un appel à projet pour subventionner des actions permettant d'améliorer la connaissance du sous-sol et de favoriser la recherche de capacités de stockage géologique de CO₂ en France ;
- Au titre de l'évaluation environnementale, l'examen au cas par cas des essais d'injections et de soutirage de CO₂ pendant la phase de recherche depuis la publication du décret n° 2024-529 du 10 juin 2024 ;
- La mise en chantier de l'arrêté ministériel prévu en application du L. 229-33 précisant les concentrations maximales admissibles pour les substances ajoutées au CO₂ injecté en couches géologiques profondes ;
- Des campagnes d'information et d'échanges avec les parties prenantes.

Différentes modalités de stockage du CO₂

Le stockage géologique de CO₂ se fait principalement dans des champs d'hydrocarbures déplétés (c'est-à-dire d'où des hydrocarbures ont été extraits) ou des aquifères salins (couches géologiques profondes, poreuses, perméables et saturées en eaux salées appelées saumures) à une profondeur minimale de 800 m afin de stocker le CO₂ sous une forme dense (la forme dense nécessitant moins de volume de stockage). Dans ces deux cas, le « stockage » consiste à avoir une structure géologique réservoir fermée d'un certain volume, recouverte par une couche imperméable au passage du CO₂ et qui permet de piéger de façon sûre et permanente le CO₂. Plusieurs projets étudient aussi la possibilité de stocker de façon sûre et permanente le CO₂ sous forme dissoute dans des eaux de gisement.

Stocker géologiquement du CO₂ est une technologie relativement ancienne : certains pays, comme les États-Unis ou la Norvège, stockent du CO₂ dans des réservoirs d'hydrocarbures depuis des décennies. En France, environ 50 kt de CO₂ ont été stockées entre 2010 et 2012 dans le pilote de Rousse (Piémont pyrénéen). Et la France dispose de compétences historiques dans le stockage souterrain de gaz puisque plusieurs sites de stockages de gaz (principalement du méthane) sont déjà exploités sur le sol national depuis des décennies.

Une stratégie française de coopération internationale pour favoriser l'accès aux sites de stockage de CO₂ à l'étranger

La plupart des projets de captage français en cours de développement sont situés dans des régions industrielles ayant un accès à des capacités de stockage déjà identifiées :

- En Mer du Nord, avec les projets Northern Lights en Norvège, et Aramis aux Pays-Bas ;
- En Méditerranée, avec les projets Callisto en Italie, et Prinos en Grèce.

Le développement des capacités européennes de stockage de CO₂ sera renforcé par la mise en œuvre du règlement européen NZIA (*Net Zero Industry Act*), qui impose aux producteurs d'hydrocarbures de l'Union Européenne de contribuer aux objectifs de stockage de 50 Mt de CO₂ par an en 2030 (hors capacités de la Norvège), et ce au prorata de la part de chaque entité dans la production de pétrole brut et de gaz naturel de l'UE entre 2020 et 2023. De nouveaux objectifs pour 2040 et 2050 pourraient être fixés dans les prochaines années. Une partie de ces objectifs seront remplis par le Danemark qui, notamment grâce à ses projets Bifrost, Greensand et Norme, prévoit de disposer de près de 52 Mt par an en 2030-2032.

La France facilitera l'accès à ces capacités européennes afin de permettre aux industriels français émetteurs de pouvoir développer des projets de capture et de stockage de CO₂.

Les échanges de CO₂ transfrontaliers sont notamment encadrés par l'amendement de 2009 à l'article 6 du Protocole de Londres, permettant l'export de CO₂ par voie maritime à des fins de stockage dans les formations géologiques du sous-sol marin, qui sera soumis pour ratification au parlement français en 2024. Pour les États-membres de l'UE et les pays participants à

l'Espace Économique Européen, la Commission Européenne¹² a précisé que le cadre juridique de l'UE en vigueur est l'«arrangement» juridique pertinent entre les parties et que, si des protocoles d'entente sont signés, ils doivent être limités aux questions résiduelles qui ne sont pas régies par le droit de l'Union, comme la coopération entre les autorités responsables de l'octroi des permis.

La France a donc, depuis deux ans, noué des partenariats sur le CCUS avec ses partenaires européens :

- Une lettre d'intention actant la coopération franco-danoise sur le CCUS et un accord bilatéral sur l'export de CO₂ par voie maritime ont été signés en mars 2024 entre le Ministre en charge de l'énergie et son homologue danois.
- Une lettre d'intention similaire a été signée en décembre 2022 entre le ministère de la Transition énergétique et son homologue norvégien. La France a accueilli mi-juin 2024 une délégation norvégienne d'industriels impliqués dans les projets CCS Norvégiens. Des discussions avec les industriels français ont ainsi pu avoir lieu, dans le but de continuer à nouer des partenariats stratégiques avec nos voisins pour accélérer le déploiement de la chaîne CCS.
- La France a rejoint début 2023 la *North Sea Basin Task Force*, groupe de travail de pays bordant la Mer du Nord relatif au déploiement du CCS dans cette région.
- Du côté de la Méditerranée, l'Italie, la Grèce et la France ont également signé début 2023 un plan régional stratégique, non engageant, visant à établir un cadre permettant le développement d'infrastructures transfrontalières de transport du CO₂. D'autres pays du bassin méditerranéen pourraient rejoindre à court-terme ce plan.

La France poursuivra une collaboration renforcée avec les principaux pays fournissant des capacités de stockage de CO₂.

Développer les capacités de stockage du CO₂ en France : une opportunité pour notre économie et notre décarbonation

La France dispose d'un sous-sol varié, avec plusieurs régions propices au stockage géologique de CO₂.

Cependant, il est nécessaire **d'identifier plus précisément les volumes de stockage**, pour des enjeux de souveraineté et de compétitivité, afin de disposer de nos propres capacités de stockage du CO₂, des enjeux d'optimisation des coûts liés au transport du CO₂, ou encore des enjeux de difficultés d'accès de certains émetteurs aux futurs hubs d'export.

La connaissance du sous-sol français dans les bassins sédimentaires repose historiquement sur les concessions de production ou de stockage d'hydrocarbures et, plus récemment, de géothermie.

Les études conduites depuis 20 ans conduisent à de premières estimations de ressources de stockage sous forme dense qui devront être affinées :

¹² Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au Comité des régions du 6 février 2024 : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52024DC0062>

- A minima 10 Mt dans les champs déplétés du Bassin parisien ;
- Environ 100 Mt dans les pièges en aquifère salin pour le Bassin aquitain ;
- Jusqu'à 650 Mt dans les champs déplétés du bassin d'Aquitaine (en incluant le Piémont pyrénéen) ;
- Pour l'offshore Méditerranée et l'offshore Atlantique, une étude en cours conduit à une première approximation de respectivement 360 Mt et 24 Mt sur les capacités de stockage de CO₂ dans les pièges structuraux/stratigraphiques des aquifères salins ;
- Pour les autres bassins sédimentaires, comme le graben du Rhin (Alsace) et celui du Nord – Pas-de-Calais, il n'existe pas encore d'études suffisamment détaillées sur les capacités de stockage de CO₂.

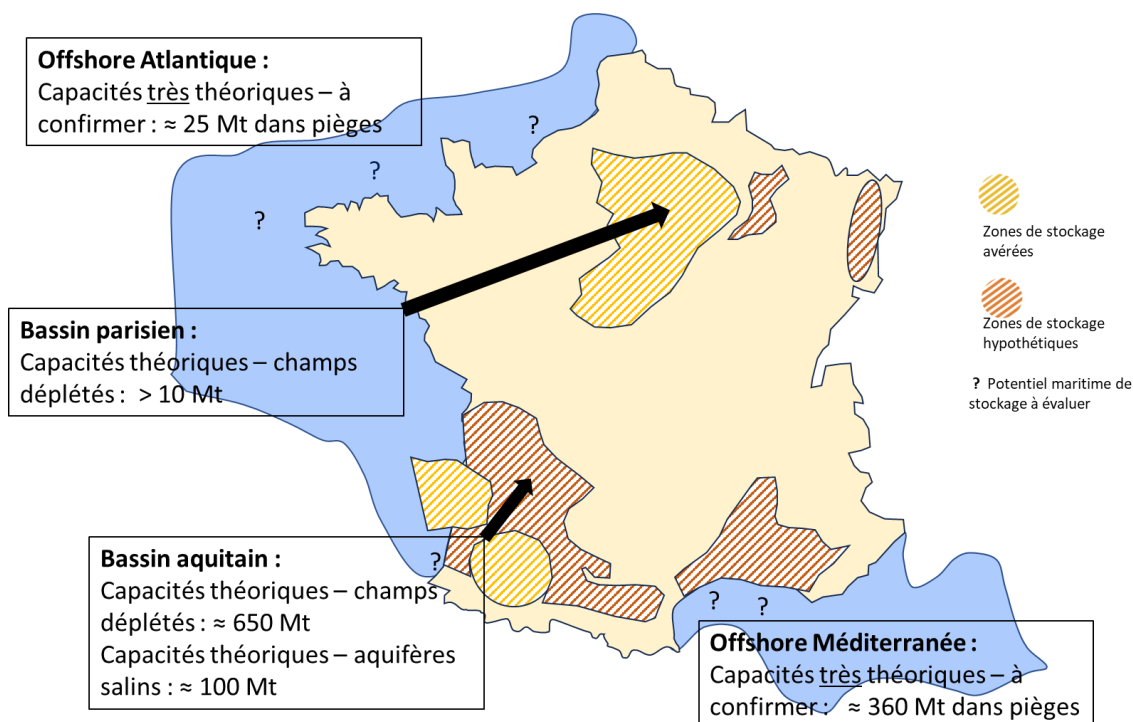


Figure 4 : Carte du potentiel de stockage géologique de CO₂ en France selon des études théoriques et les données issues de la production pétrolière et gazière

Ces chiffres sont des valeurs géologiques théoriques et ne prennent pas en compte tous les facteurs nécessaires pour déterminer des capacités effectives, notamment les aspects économiques ou de conflit d'usage

Des stockages de CO₂ sous forme dissoute dans des aquifères salins permettraient d'augmenter les quantités stockables tout en permettant une meilleure répartition des capacités de stockage sur le territoire national. Ce potentiel reste à déterminer.

Afin de faire émerger rapidement des projets de stockage de CO₂ en France, ont été lancées ou sont prévues les actions suivantes, visant l'amélioration et la diffusion des connaissances du sous-sol français :

- La réalisation d'un **état des lieux des potentiels de stockage de CO₂** à partir des études précédemment menées sur les principaux bassins sédimentaires. Les conclusions de cet état des lieux seront disponibles dans un rapport synthétique mis à disposition du public ;
- Le lancement d'un **appel à manifestation d'intérêt (AMI)**. Lancé fin avril 2024, cet AMI non-engageant est ouvert jusqu'au 26 juillet 2024 pour identifier les acteurs intéressés par le captage, le transport et le stockage géologique de CO₂, notamment les sociétés disposant de moyens pour accélérer le développement des connaissances géologiques sur des formations aptes au stockage de CO₂ ;
- Le lancement d'un **appel à projet d'ici fin 2024 – début 2025**, sur la base des données de l'état des lieux et de l'AMI, pour subventionner des actions permettant d'améliorer la connaissance du sous-sol et de favoriser la recherche de capacités de stockage géologique de CO₂ en France : des campagnes sismiques, des tests de faisabilité d'injection de CO₂ et de qualification de la couverture du réservoir (en laboratoire ou dans des sites pilotes), avec des premiers essais qui pourraient débuter en 2025-2026 ;
- Au titre de l'évaluation environnementale, l'examen au cas par cas des essais d'injections et de soutirage de CO₂ pendant la phase de recherche depuis la publication du décret n° 2024-529 du 10 juin 2024 ;
- La mise en chantier de l'arrêté ministériel prévu en application du L. 229-33 précisant les concentrations maximales admissibles pour les substances ajoutées au CO₂ injecté en couches géologiques profondes ;
- La facilitation de l'appropriation de la filière CCUS par le lancement de **campagnes d'information et d'échanges** avec les parties prenantes sur le sujet de la faisabilité et les conditions de réalisation des projets. Le CCUS est en effet un des leviers de décarbonation, et les objectifs du stockage géologique de CO₂ doivent être intégrés dans ceux plus généraux de lutte contre le changement climatique. Au niveau des projets, l'État incitera les demandeurs de titres de stockage à initier le dialogue avec les parties prenantes, notamment des populations locales, le plus tôt possible.

Un cadre réglementaire permettant la recherche et l'exploitation de sites de stockage géologique de CO₂

La **directive 2009/31/CE** du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone (dite « Directive CCS ») établit un cadre législatif et réglementaire pour le stockage géologique sûr et pérenne du CO₂ sur le territoire des États membres, leurs zones économiques exclusives et leurs plateaux continentaux, afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique. La transposition en droit français de cette directive a été finalisée en 2011 dans le code de l'environnement : articles L.229-27 à L.229-54 et R.229-57 à R.229-102.

La directive CCS prévoit que la recherche de formation de stockage ne peut se faire que dans le cadre d'un "*permis d'exploration*" (correspondant à un *permis exclusif de recherches*, ou PER, en droit minier français) et que l'exploitation d'une formation géologique ne peut se faire qu'après délivrance d'un "*permis de stockage*" (correspondant à une *concession* en

droit minier). Cette concession n'est accordée que si le demandeur démontre que - dans les conditions d'utilisation envisagées, il n'existe ni risques de fuite, ni dangers, ni inconvénients pour l'environnement ou la santé humaine.

Pendant l'exploitation, l'exploitant procède à la surveillance des installations et de la formation géologique, afin notamment de détecter d'éventuelles fuites et les effets sur le milieu environnant.

Par ailleurs, la procédure de stockage de CO₂ à des fins de lutte contre le réchauffement climatique, y compris les installations de surface nécessaires à son fonctionnement, à l'exclusion de celles déjà visées par d'autres rubriques de la nomenclature, est soumise à autorisation au titre de la rubrique 2970 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Il convient de préciser que les essais d'injection et de soutirage de CO₂ durant la phase de recherche sont soumis au régime de l'autorisation environnementale en tant que première phase d'un projet de stockage géologique de CO₂ qui est soumis à autorisation au titre de la rubrique 2970 des installations classées. Depuis le décret n° 2024-529 du 10 juin 2024, ces essais sont soumis à une procédure au cas par cas au lieu d'une évaluation environnementale systématique.

En période d'exploitation, les risques sont essentiellement centrés sur le puits d'injection et sur son environnement proche au sein de la roche-réservoir. Les risques à prévenir concernent principalement :

- Les fuites massives de CO₂,
- Les fuites plus diffuses ainsi que les contaminations de compartiments de l'environnement, par le CO₂ et/ou par des impuretés qu'il contient.
- Les phénomènes de sismicité induite et les mouvements de terrain.

Au terme de l'exploitation et après une période de post-fermeture qui ne peut être inférieure à 10 ans, le site est transféré à l'État qui devient responsable de la surveillance et de la mise en œuvre éventuelle de mesures correctives ainsi que de la restitution des quotas de CO₂ en cas de fuite du site. Préalablement à ce transfert, outre le versement d'une contribution financière à l'État, l'exploitant doit notamment démontrer que le CO₂ restera parfaitement confiné de façon permanente et sûre.

En France, il n'y a pas de restriction géographique au dépôt d'une demande de PER ou de concession et tout industriel peut d'ores et déjà adresser une demande de titre au ministre chargé des mines sur l'ensemble du territoire national.

En outre, pour intéresser au mieux les territoires aux projets de stockages souterrains de CO₂, une réflexion est envisagée pour réformer la fiscalité minière.

VALORISATION

La valorisation du CO₂ constitue une piste intéressante pour produire des molécules alternatives à certains intrants fossiles, et contribuer à la décarbonation des secteurs comme la chimie ou le transport maritime et aérien.

Si certains usages « séquestrants », comme la production de matériaux à partir de CO₂, permettent effectivement de réduire les émissions, la majorité des produits ne constituent pas une « séquestration » pérenne du carbone et n'est donc pas comptabilisé au même niveau qu'une séquestration géologique. L'évolution des règles de comptabilisation, notamment au niveau du marché carbone européen et dans le cadre du développement de la certification des absorptions de carbone, tout en étant cohérente avec la réalité physique des procédés, permettrait de mieux mobiliser le CCU « matériaux » comme levier technologique.

Par ailleurs, l'équilibre économique de la valorisation du CO₂ demeure complexe eu égard aux besoins en électricité bas carbone pouvant être utilisés de manière plus vertueuse par ailleurs.

Dans une logique d'efficacité de la dépense publique, l'Etat soutiendra la baisse d'émission liée aux usages « séquestrant » du CO₂ dans les dispositifs de soutien au CCS. Le développement de la valorisation du CO₂ dans les e-carburants sera notamment tiré par les différentes obligations sectorielles d'incorporation. L'Etat définira quels e-carburants pourront bénéficier de ces obligations sectorielles, en veillant à ce que le CO₂ utilisé soit d'origine biogénique, en complément du cadre européen existant.

Parallèlement, l'Etat proposera un cadre national de certification des émissions biogéniques permettant de faciliter le déploiement des projets CCU sur le territoire, et soutiendra la généralisation d'un tel cadre dans le droit européen lors des évolutions prévues du système ETS.

Voies de valorisation du CO₂

La valorisation énergétique du CO₂ peut contribuer à décarboner le transport aérien et maritime.

Le CO₂ peut être utilisé dans les processus de fabrication de molécules servant de base aux carburants utilisés dans les secteurs du maritime et de l'aviation. Au niveau européen, les règlements FuelEU Maritime et ReFuelEU Aviation fixent des objectifs d'incorporation de carburants alternatifs durables dans ces secteurs et la directive sur les énergies renouvelables (RED) fixe des objectifs d'énergies renouvelables dans l'ensemble des secteurs des transports. Le volume de CO₂ valorisé dépendra de l'évolution de l'équilibre économique, mais les besoins pour la décarbonation du secteur aérien et maritime devraient faire émerger une filière de production en France.

Néanmoins, cette valorisation nécessite une certaine prudence afin de répondre aux enjeux climatiques. La production de e-carburants est associée à une consommation importante d'électricité : en 2050, elle pourrait nécessiter plus de 100 TWh d'électricité (en large partie due à la production d'hydrogène nécessaire et en plus faible partie liée à la capture du CO₂). Par ailleurs, le CO₂ utilisé pour la synthèse des e-carburants est réémis lors de leur utilisation. L'État souhaite donc prioriser pour la production d'e-carburants le recours au CO₂ biogénique et au CO₂ retiré de l'air (avec un déploiement de ce dernier à une échéance plus lointaine), et à terme, exclure tout autre CO₂ pour ces usages.

Le CO₂ peut également servir de molécule pour la chimie de base

Le CO₂ peut être utilisé comme matière première pour produire un certain nombre de produits chimiques intermédiaires (éthylène, propylène ou encore méthanol), qui peuvent ensuite être transformés en produits plus complexes et nécessaires pour l'industrie de la pétrochimie. Ces produits pourraient à terme remplacer les produits de base issus de la pétrochimie actuelle, mais devront être soutenus en termes de R&D et d'industrialisation, étant donné le coût actuellement encore élevé de ces procédés, et leur consommation d'énergie et d'eau.

Le CO₂ peut être valorisé et séquestré durablement dans des matériaux

Le CO₂ valorisé est alors considéré comme séquestré dans ces matériaux sur une longue période. On parle parfois d'« usage séquestrant » du CO₂. C'est notamment le cas de la carbonatation du béton.

Le CO₂ peut être réinjecté directement dans des produits qui en consomment

L'usage direct du CO₂ est déjà en place et installé : il sert d'intrant dans des procédés industriels (solvant, décapage...), dans les serres, ou dans l'industrie agro-alimentaire. Mais le marché français, de l'ordre de 800 kt_{CO₂}/an, reste marginal et ne constitue pas un usage permettant de décarboner car il est généralement réémis dans l'atmosphère.

Cadres réglementaires des produits issus du captage du CO₂

Dans le cadre de l'EU-ETS, le CO₂ capté en vue de sa valorisation est considéré comme émis sur le site industriel. L'industriel ne reçoit donc aucune exemption à l'obligation de restituer des quotas carbone dans le cas où il choisirait de valoriser le CO₂ capté. Le bénéfice de la réduction d'émissions est alors attribué au secteur utilisant le produit fabriqué à partir du CO₂ capté.

Concernant le CCU dit « séquestrant », la directive « EU-ETS » considère que la réduction d'émission permise par la valorisation du CO₂ n'est effective pour l'industriel que dans le cas où le CO₂ est transféré hors de l'installation industrielle émettrice vers une autre installation, pour y être « lié chimiquement de manière permanente à un produit, de sorte qu'il ne pénètre pas dans l'atmosphère dans des conditions normales d'utilisation »). Un acte délégué est en cours d'élaboration au niveau européen pour préciser ce point et devrait être publié au troisième trimestre 2024¹³.

La revue cadre de l'EU-ETS attendue en 2026 pourrait conduire à une mise à jour du cadre de comptabilité du CCU, notamment pour les produits à moyenne durée de vie (quelques dizaines d'années), tout en évitant tout double comptage. Une modification de ces incitations a déjà été évoquée par la Commission Européenne dans le cadre de sa communication sur la stratégie sur la gestion industrielle du carbone et sera encouragée par la France.

Soutien à la filière CCU

Le CCU est une industrie encore peu mature dont l'économie est fragile, et reste dépendante du prix du carbone et des incitations et aides financières.

L'Etat soutiendra, via le dispositif de soutien au CCS, la baisse d'émission liée aux usages dits séquestrants du CO₂ – notamment pour la production de matériaux.

La production de e-carburants permet par ailleurs de réutiliser le CO₂ et réduire les émissions de gaz à effet de serre, contribuant à l'atteinte des objectifs de la planification écologique.

Plusieurs mécanismes économiques sont déjà mis en œuvre et constitue des leviers puissants pour le déploiement de projets visant à réutiliser du CO₂ pour produire des carburants de synthèse pour l'aviation et le maritime tels que :

- Au niveau européen :
 - l'EU-ETS pour les secteurs aviation et maritime dans lequel les carburants de synthèse sont considérés zéro-émissions et avec l'allocation spécifique de quotas gratuits pour les compagnies aériennes utilisant des carburant d'aviation durable,

¹³ https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14135-Permanent-storage-of-EU-ETS-emissions-through-carbon-capture-and-utilisation_en

- les obligations d'incorporation de carburants alternatifs durables dans les secteurs maritime et aviation fixées par la directive sur les énergies renouvelables (RED), ainsi que les règlements FuelEU Maritime qui oblige les compagnies maritimes à décarboner leur sources d'énergie et ReFuelEu qui oblige les fournisseurs de carburants à incorporer des carburants durables d'aviation.
- **Au niveau national** : les obligations d'incorporation de carburants alternatifs au travers, aujourd'hui, de la taxe incitative relative à l'utilisation de l'énergie renouvelable dans les transports (TIRUERT).

La production de e-carburants peut être éligible à l'appel à projets national CARB AERO¹⁴ financé par France 2030 pour le développement d'une filière de production française de carburants aéronautiques durables, et notamment le soutien aux études d'ingénierie d'avant-projet (FEED), mis en place en décembre 2023, et doté d'un montant global de 200 millions d'euros. Le niveau d'aide prend en compte la part biogénique de l'usage de CO₂.

Pour anticiper la fin de la reconnaissance du CO₂ fossile pour la production de e-carburants à l'horizon 2041, il est essentiel de prioriser la valorisation du CO₂ biogénique. Le cadre incitatif national pourrait être adapté pour favoriser davantage le CO₂ biogénique, tout en répondant aux enjeux méthodologiques liés à la traçabilité.

¹⁴ [Appel à projet « CARB AERO » opéré par l'ADEME](#)



Conception : Direction générale des Entreprises

**Rédaction : Direction générale des Entreprises, Direction générale de
l'Énergie et du Climat**

Réalisation graphique : Sircom

Juillet 2024