

2026



ÉTUDE D'IMPACT SOCIÉTAL

des recherches du CNRS
sur le captage, le stockage
et la valorisation du CO₂



Direction de la publication
Auteurs

Antoine Petit
Catherine Dargemont catherine.dargemont@cnrs.fr
Benoit Glorieux benoit.glorieux@icmcb.cnrs.fr
Antoine Heidmann antoine.heidmann@lkb.upmc.fr
Patricia Laurens patricia.laurens@esiee.fr
Jacques Maddaluno jacques.maddaluno@cnrs.fr
Camille Portevin

Conception graphique, mise en page

Remerciements : CNRS Innov, Direction des Relations avec les Entreprises, Cellule Energie du CNRS, VIA INNO, Club CO₂

Cette plaquette est éditée par le CNRS.

RÉSUMÉ EXÉCUTIF 5

CONTEXTE EXTERNE INITIAL 14

**INPUT ET CONTRIBUTIONS DU CNRS
ET DE SES PARTENAIRES** 18

OUTPUT DES RECHERCHES 28

**CIRCULATION DES CONNAISSANCES
ET INTERMÉDIAIRES** 40

IMPACTS 66

ANNEXES 76

RÉSUMÉ exécutif

OBJECTIFS

L'objectif de cette étude d'impact est de dresser un bilan des recherches menées par le CNRS et ses partenaires¹ sur le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ issu des activités industrielles (CCUS : *Carbon Capture, Utilisation and Storage*) et d'analyser leurs effets sur la société dans ses différentes dimensions économique, politique et réglementaire, environnementale, sociale, culturelle, et sanitaire.

Cette étude cherche à comprendre comment les connaissances scientifiques se diffusent vers les acteurs industriels, politiques, financiers et sociaux, et comment elles peuvent conduire au développement d'innovations de rupture et contribuer à la structuration d'une filière du CCUS. Elle analyse également dans quelles conditions ces connaissances sont susceptibles d'influencer les stratégies de décarbonation de l'industrie et d'apporter un éclairage objectif aux débats publics liés à la réduction des émissions de carbone. Enfin, cette étude vise à identifier les leviers permettant de renforcer les impacts sociétaux à venir du CCUS et de mieux articuler recherche, développement technologique, activités industrielles et action publique dans ce domaine.

1. Les recherches menées au CNRS sont, pour la plupart, réalisées au sein de laboratoires issus de partenariats entre le CNRS et d'autres acteurs académiques, la plupart universitaires. Toute mention dans cette étude de recherches menées au CNRS désigne le CNRS et ses partenaires.

MÉTHODOLOGIE

L'étude d'impact a été réalisée de novembre 2025 à mars 2026 et s'articule autour de trois étapes principales :

1

DÉFINIR LA CHRONOLOGIE des recherches scientifiques et des innovations technologiques dans le domaine du CCUS sur les vingt dernières années (2005-2025, **voir rendu page 10-11**) ;

2

ANALYSER LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU CHEMIN D'IMPACT, c'est-à-dire le cheminement de la connaissance jusqu'aux effets sur la société, à savoir : les « Input » ou moyens mobilisés par la recherche ; les « Output » ou productions scientifiques ; les « Intermédiaires » ou acteurs qui s'approprient les produits de la recherche pour les transformer ; et enfin les « Impacts » ou effets sur la société (**voir rendu page 12-13**) ;

3

EN DÉDUIRE UN RADAR D'IMPACT DANS LES DIFFÉRENTES DIMENSIONS SOCIÉTALES : économiques, politiques et réglementaires, environnementales, sociales, culturelles et sanitaires (**voir rendu page 8**).



Cette méthodologie repose sur l'exploitation approfondie de documents scientifiques et techniques, de sources médiatiques, économiques et politiques, sur l'analyse des bases de données bibliométriques et de brevets, ainsi que sur la réalisation de 25 entretiens semi-directifs avec des scientifiques, des responsables publics et institutionnels, des industriels, des directeurs de startups, des investisseurs et des représentants de la société civile.

Le présent document a été relu et révisé par les acteurs sollicités.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Depuis 2005, les recherches sur le CCUS se sont fortement développées sous l'effet conjoint de la montée des contraintes climatiques, de l'objectif de neutralité carbone et de la nécessité de traiter les émissions de CO₂ industrielles difficiles à éviter.

Néanmoins, il a fallu plus de quinze ans pour stabiliser une position politique relative au CCUS en France et en Europe. Ces années d'hésitation ont freiné à la fois les feuilles de route industrielles, les innovations technologiques et la structuration de la communauté scientifique.

Malgré ces incertitudes, le CNRS et ses partenaires occupent une place importante dans l'écosystème français, avec une communauté scientifique qui mobilise aujourd'hui environ 35 unités de recherche (UMR ou UPR) et 340 équivalents temps plein (etp), contre une cinquantaine d'etp seulement en 2005. Les travaux menés ont permis des avancées scientifiques significatives sur plusieurs maillons de la chaîne de valeur : amélioration des procédés de captage, développement de nouveaux adsorbants et matériaux poreux, avancées en électro- et photo-catalyse pour la valorisation du CO₂, progrès sur la minéralisation et le stockage géologique, sur le monitoring et l'analyse du cycle de vie de toute la chaîne, mais aussi l'acceptabilité sociale du CCUS. L'évolution des thématiques est également significative :

alors que les recherches sur le captage et le stockage étaient dominantes sur la période 2005-2015, la valorisation du CO₂ est devenue la thématique majoritaire au CNRS depuis le début des années 2020.

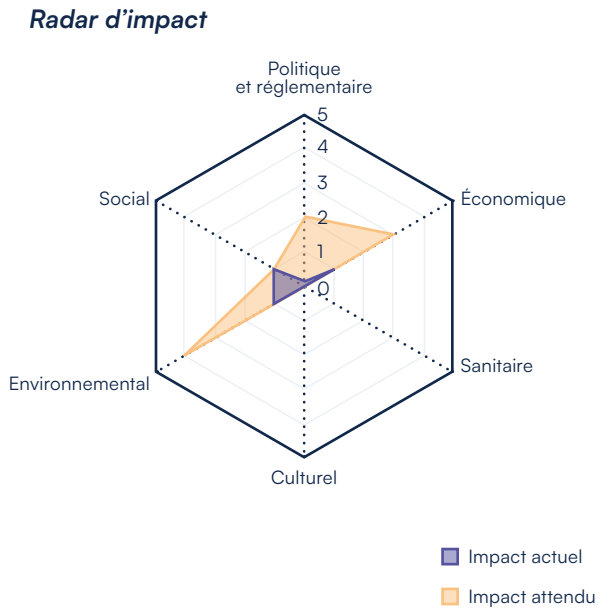
Si le CNRS apparaît particulièrement bien positionné sur les recherches amont, l'étude met toutefois en évidence une caractéristique particulière de ce domaine : le CCUS ne s'est pas historiquement constitué comme une filière intégrée, mais plutôt comme deux filières relativement indépendantes CCS et CCU (respectivement pour le stockage et la valorisation du CO₂), elles-mêmes composées d'un ensemble fragmenté de communautés scientifiques qui travaillent sur des segments et des technologies distincts, sans véritable articulation à l'échelle de la chaîne complète. Dans ce contexte, la création du PEPR SPLEEN en 2023 marque un tournant important car il contribue à structurer le domaine, en favorisant les coopérations entre laboratoires autour de la décarbonation des procédés, du stockage et de la valorisation du CO₂, tout en développant des outils transversaux de prédiction et de monitoring. ■■■

■ ■ ■ Pour autant, cette structuration reste partielle : centré principalement sur la recherche amont, ce programme ne suffit pas à lui seul à couvrir les enjeux de montée en maturité technologique (soutenue en partie par le programme CACTUS piloté par CNRS Innovation et la SATT Pulsalys), d'intégration des procédés et de passage à l'échelle industrielle, de partenariats entre spin-off et grands groupes industriels. Ces enjeux pourraient dès maintenant faire l'objet d'une réflexion dédiée par le CNRS et ses partenaires.

Cette fragmentation met en exergue le rôle important des intermédiaires, c'est-à-dire des acteurs capables de transformer les résultats scientifiques en solutions techniquement, économiquement et industriellement déployables. Dans le cas du CCUS, cette transformation s'appuie sur des acteurs de nature très différente : des organismes comme IFPEN, des startups, des grandes entreprises impliquées dans les différentes étapes de la décarbonation industrielle, des investisseurs, ou encore des acteurs du débat public et politique. Cette transition de la recherche vers des projets de plus grande échelle se manifeste également à travers différentes formes de transfert, telles que les partenariats de recherche avec les entreprises, les chaires et laboratoires communs, les projets de maturation, les brevets et les créations de startups. Ces dynamiques témoignent d'un réel potentiel d'innovation dans le domaine du CCUS, mais elles restent encore limitées au regard des enjeux industriels, en raison du manque de sites pilotes et de démonstrateurs, ainsi que de la difficulté à assurer une continuité suffisante entre recherche amont, génie des procédés, financement des TRL (*Technology Readiness Level*) intermédiaires et passage à l'échelle.

Dans ce contexte, il est important de rappeler qu'aucune filière industrielle du CCUS n'est aujourd'hui pleinement opérationnelle en France. Cette situation limite fortement les impacts sociétaux déjà observables des recherches du CNRS : ceux-ci demeurent, pour une large part, au mieux initiés, souvent attendus ou espérés. Les recherches jouent néanmoins un rôle important dans la préparation des choix technologiques futurs, dans la structuration de la filière et dans l'objectivation des conditions économiques, politiques et sociales de son déploiement.

L'impact économique direct reste modeste à ce stade. Les revenus issus des brevets sont encore faibles et les effets observables passent surtout par les startups, les partenariats de recherche et la visibilité acquise par le domaine. L'apport principal de la recherche tient donc aujourd'hui moins à des retombées économiques déjà stabilisées qu'à sa capacité à préparer des innovations susceptibles d'alimenter une future filière industrielle.



L'impact politique et réglementaire apparaît lui aussi contrasté. Bien que les recherches menées par le CNRS et ses partenaires soient appelées à jouer un rôle déterminant pour rendre les procédés de captage, de valorisation et de stockage plus efficaces, moins coûteux et mieux maîtrisés, les acteurs scientifiques sont encore peu présents dans les dispositifs nationaux d'élaboration stratégique. L'étude souligne ainsi que le premier comité de pilotage national dédié au CCUS, réuni en février 2026, ne comprenait aucun représentant scientifique. Il existe donc un décalage entre l'expertise disponible dans les laboratoires et sa mobilisation par les pouvoirs publics pour éclairer les choix stratégiques et objectiver les débats publics sur la place du CCUS dans les trajectoires de décarbonation.

L'impact environnemental est potentiellement majeur, mais il demeure aujourd'hui conditionné au déploiement effectif de la filière. Les recherches contribuent déjà à développer des approches de captage et de valorisation plus sobres, ainsi que des outils de monitoring et d'analyse de cycle de vie indispensables pour évaluer les performances réelles du CCUS. Mais les bénéfices environnementaux restent encore en grande partie prospectifs tant que les chaînes complètes de captage, transport, stockage ou valorisation ne sont pas déployées à l'échelle industrielle.

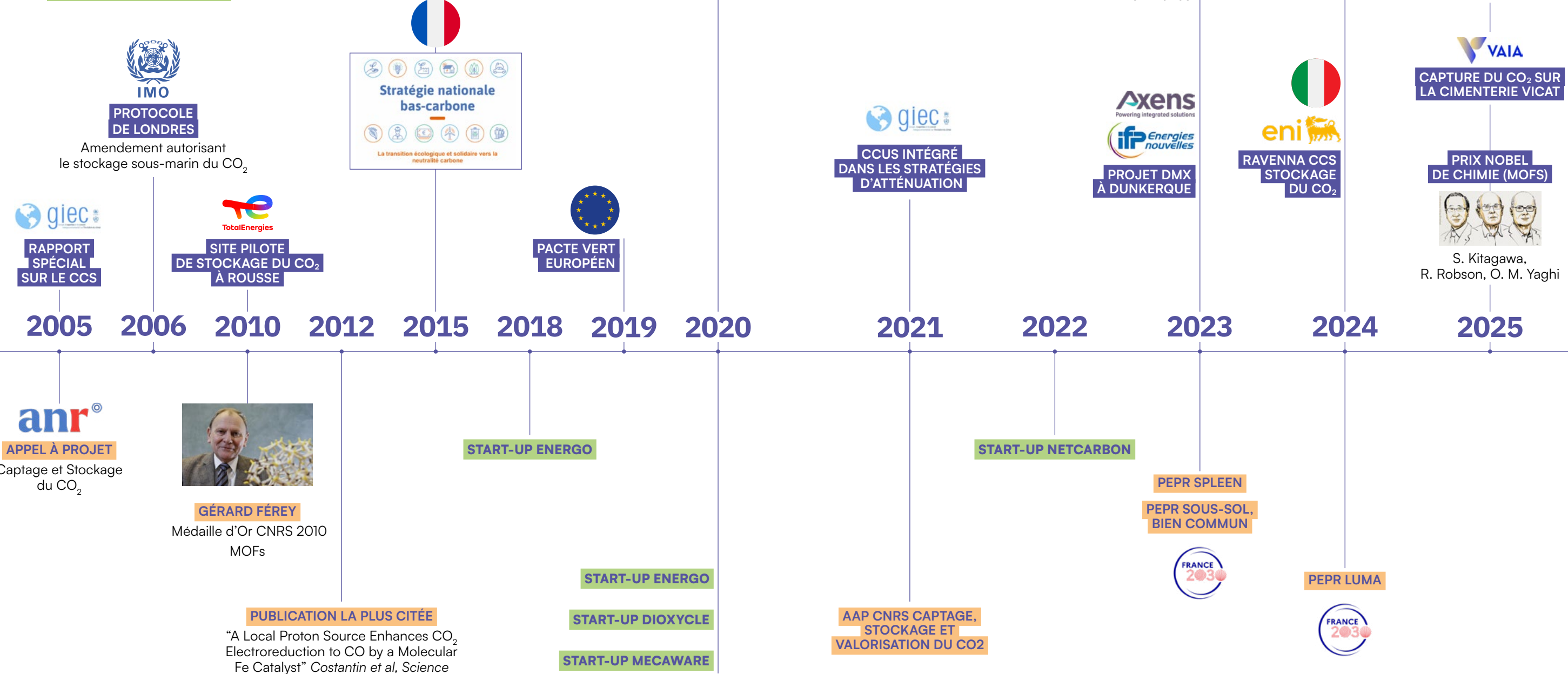
L'impact social est pour l'instant plus indirect. Si les perspectives d'emploi à l'horizon 2050 sont importantes, les conséquences plus immédiates des recherches concernent surtout la formation, la montée en compétence sur des technologies émergentes, ainsi que la contribution possible du CCUS au maintien d'activités industrielles ou à leur transformation vers des modes de production plus durables dans les secteurs fortement émetteurs de CO₂. L'impact social tient aussi à la capacité de la recherche à éclairer les conditions dans lesquelles les visions industrielles et environnementales peuvent être conciliées pour accompagner la transition écologique.

Enfin, les impacts culturel et sanitaire sont, dans le périmètre actuel de l'étude, moins immédiatement visibles.

En conclusion, cette étude met en évidence un contraste fort entre une recherche française d'excellent niveau, notamment celle portée par le CNRS et ses partenaires académiques, et une filière industrielle encore en développement, fragile économiquement et longtemps freinée par des hésitations politiques et réglementaires. Le CNRS joue un rôle déterminant sur les verrous scientifiques amont, sur certaines innovations de rupture et, dans une certaine mesure, sur l'objectivation des débats. Pour renforcer les impacts sociétaux à venir, plusieurs leviers apparaissent décisifs : développer des pilotes et des démonstrateurs pour les technologies innovantes, mieux articuler chimie, génie des procédés et sciences du sous-sol, associer davantage les sciences humaines et sociales à l'analyse des débats et des opinions publics ainsi qu'aux questions d'appropriation et d'acceptabilité, et faire une place plus explicite à l'expertise scientifique dans l'élaboration des politiques publiques.

CHRONOLOGIE

- Les évènements contextuels
- Les évènements marquants de la recherche au CNRS et de sa structuration
- Les évènements marquants de la valorisation au CNRS



CHEMIN D'IMPACT

CONTEXTE

Neutralité carbone et impératif de compétitivité industrielle

1 RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CO₂ « HARD TO ABATE »

2 AUGMENTER LE CAPTAGE DU CO₂

MOBILISATION DES SCIENTIFIQUES

- Plus de 35 laboratoires (UMR et UPR) impliqués dans tous les domaines du CCUS dont un laboratoire international
- Plus de 3 550 etp cumulés de 2005 à 2024 (dont plus de 1 020 etp CNRS)
- 258 M€ de masse salariale (dont 75 M€ CNRS)

RESEAUX SCIENTIFIQUES ET PARTENARIATS

- PEPR : SPLEEN, Sous-sol, (LUMA à la marge)
- Infrastructure européenne ECCSEL (ERIC)
- 114 contrats de partenariats CNRS-entreprises

FINANCEMENT

- 140 M€ (de 2005 à 2025, hors masse salariale) dont 32 M€ CNRS
- Origines : ANR, PEPR, Europe, programme CACTUS (prématuration-maturation), partenariats CNRS-entreprises...

INPUT

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Avancées scientifiques de premier plan sur les MOFs, procédés électrochimiques, catalyse du CO₂, caractérisation des réservoirs de stockage, analyse de l'acceptation sociale
- Près de 2 300 publications françaises depuis 2005 (dont 1 250 avec des auteurs CNRS)

BREVETS ET SAVOIR-FAIRE VALORISABLE

- Valorisation des inventions sur les MOFs, la réduction du CO₂...
- 73 familles d'invention déposées par le CNRS depuis 2005, dont 11 avec contrat de licence

INNOVATION ET DYNAMIQUE ENTREPRENEURIALE

- 8 startups créées ou accompagnées par le CNRS (Mecaware, Energo, NetCarbon, Dioxycle, Carboneo...)
- 2 projets de prématuration et 20 projets de maturation accompagnés par le CNRS (soutiens de CNRS Innovation, du programme CACTUS de France 2030, des SATT...)
- 8 Laboratoires communs et chaires industrielles
- 2 Instituts Carnot

FORMATION

- Formation continue
- Plus de 110 thèses sur le CCUS en France

OUTPUT

Outputs qui ont nourri les intermédiaires

INSTITUTIONS POLITIQUES NATIONALES ET EUROPEENNES

- Politiques volontaristes malgré un STOP-AND-GO pendant plusieurs années
- Réglementation incitative
- Politiques publiques nationales peu objectivées par la science

INVESTISSEURS PUBLICS ET PRIVÉS

INDUSTRIES EMETRICES DE CO₂

ACTEURS INDUSTRIELS DES FILIERES CCS ET CCU

- Structuration des filières en cours
- Technologies anciennes
- Pas d'innovation de rupture mais Identification des besoins en apport scientifique

INNOVATEURS TECHNOLOGIQUES

STRUCTURES DE CONSEIL ET D'INFLUENCE

- Role du Club CO₂ qui regroupe acteurs économiques et scientifiques

ACTEURS DU DÉBAT PUBLIC

- Rôle de la CNDP sur plusieurs projets liés au CCUS
- Dialogue constructif avec les associations et think tanks

ÉTABLISSEMENTS DE FORMATION

MÉDIAS

- Environ 1 000 documents recensés entre 2005 et 2025, dont 500 dans la presse francophone
- Intérêt médiatique croissant en lien avec les enjeux environnementaux et industriels

INTERMÉDIAIRES

IMPACT SCIENTIFIQUE

- Peu de structuration de la communauté scientifique et de dialogue avec les autres acteurs
- Nouvelles questions scientifiques induites par le développement actuel et futur de la filière CCUS

IMPACT ECONOMIQUE

- Impact économique modeste mais qui devrait croître suite aux décisions politiques et industrielles récentes de développement de la filière
- Manque de pilotes et démonstrateurs pour accélérer la montée en TRL et l'industrialisation d'innovations de rupture
- Startups du CNRS en devenir

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Développement de technologies sobres, en réponse aux enjeux de réduction des coûts énergétiques, de durabilité, de réduction des risques et de sécurisation des ressources.

IMPACT POLITIQUE ET REGLEMENTAIRE

- La France fait peu appel à ses chercheurs pour définir sa stratégie nationale CCUS et préparer l'avenir

IMPACT SOCIAL

- Création d'emploi grâce aux startups issues du CNRS
- Formation par la recherche de personnel qualifié
- Rôle des corps intermédiaires dans l'appropriation du CCUS et le débat public

IMPACTS

CONTEXTE externe initial

La notion de CCUS, qui recouvre le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ (Carbon Capture, Utilisation and Storage) est relativement récente en tant que champ de recherche et technologique structuré, même si elle s’inscrit dans un contexte scientifique et politique plus ancien, lié à la compréhension de l’effet de serre et à la lutte contre le changement climatique.

Dès la fin du 19^{ème} siècle, le chimiste suédois Svante A. Arrhenius (prix Nobel de chimie en 1903), s’appuyant sur les travaux de Fourier, Saussure, Newton et Tyndall, met en évidence l’effet de serre et l’importance du CO₂ dans l’ensemble des équilibres thermodynamiques du globe terrestre. Les notions de gaz à effet de serre et leurs effets sur le climat global sont alors étudiés tout au long du 20^{ème} siècle. Il faut cependant attendre les années 1980 pour que ces travaux débouchent sur des actions politiques coordonnées à l’échelle internationale. Le Protocole de Montréal en 1987, élaboré dans le cadre du Programme des Nations Unies

pour l’Environnement, marque une première étape en pointant le besoin de protection de la couche d’ozone. Le Sommet de la Terre à Rio en 1992 prolonge cette dynamique en initiant les objectifs globaux de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆). La question de la réduction effective de ces émissions devient centrale dans le cadre du Protocole de Kyoto adopté lors de la COP3 en 1997 et renforcé par les rapports du GIEC. L’objectif de neutralité carbone, qui intègre la possibilité de compenser les émissions

qui ne peuvent être évitées, apparaît progressivement dès les années 2000 pour aboutir en 2015, lors de la COP21, à la volonté politique d’atteindre la neutralité carbone selon des échéances variant suivant les pays (2050 en Europe et 2060 en Chine par exemple).

Pour atteindre la neutralité carbone et limiter le réchauffement climatique à 1,5°C, différents scénarios, en particulier ceux du GIEC, fixent des ambitions en matière de substitution des énergies fossiles, de réduction de la consommation (par la sobriété et l’amélioration de l’efficacité énergétique), mais aussi de décarbonation des activités humaines, qu’il s’agisse de l’énergie, des transports ou des procédés industriels. Pour les secteurs dans lesquels des alternatives bas-carbone ne semblent pas envisageables à moyen terme, ces scénarios mettent en évidence la nécessité de recourir à des technologies de captage du carbone, suivies soit de son stockage dans les aquifères salins, les anciens gisements pétro-gaziers ou les réservoirs mafiques et ultramafiques (on parle alors de CCS), soit de sa valorisation comme matière première pour des carburants, des produits chimiques, des matériaux de construction ou encore en agro-alimentaire (carbonatation de boissons par exemple), ce qui relève alors du CCU. La chaîne de valeur complète du CCUS inclut également des problématiques de transport du CO₂ depuis les sites de captage jusqu’à son stockage ou sa valorisation, avec des enjeux économiques, technologiques, scientifiques et d’acceptabilité sociale. Selon la Commission européenne, le CCUS sera indispensable pour absorber environ 280 millions de tonnes de CO₂ par an (MtCO₂/an) en Europe d’ici 2040, puis environ 450 MtCO₂/an d’ici 2050.

En France, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), mise en place en 2015 et révisée en 2024, fournit un cadre politique, scientifique et industriel au CCUS et définit un objectif de 4 à 8 MtCO₂/an captés en 2030, avec une montée en puissance jusqu’en 2050.

Le CCUS fait appel à une chaîne technologique (et à terme commerciale) qui, sans être très longue, est assez diversifiée, avec des étapes clés au niveau du captage du CO₂, sa purification, sa concentration voire sa liquéfaction, son transport puis son stockage (CCS) ou sa valorisation (CCU). Chacune de ces étapes fait appel à des technologies spécifiques et c’est de leur développement synchronisé que dépendra le succès de l’ensemble de la filière. Des entreprises sont parties prenantes et s’affairent à rendre efficace, à échelle industrielle, le maillon qui les concerne.



Selon la Commission européenne, le CCUS sera indispensable pour absorber environ 280 millions de tonnes de CO₂ par an (MtCO₂/an) en Europe d’ici 2040, puis environ 450 MtCO₂/an d’ici 2050.

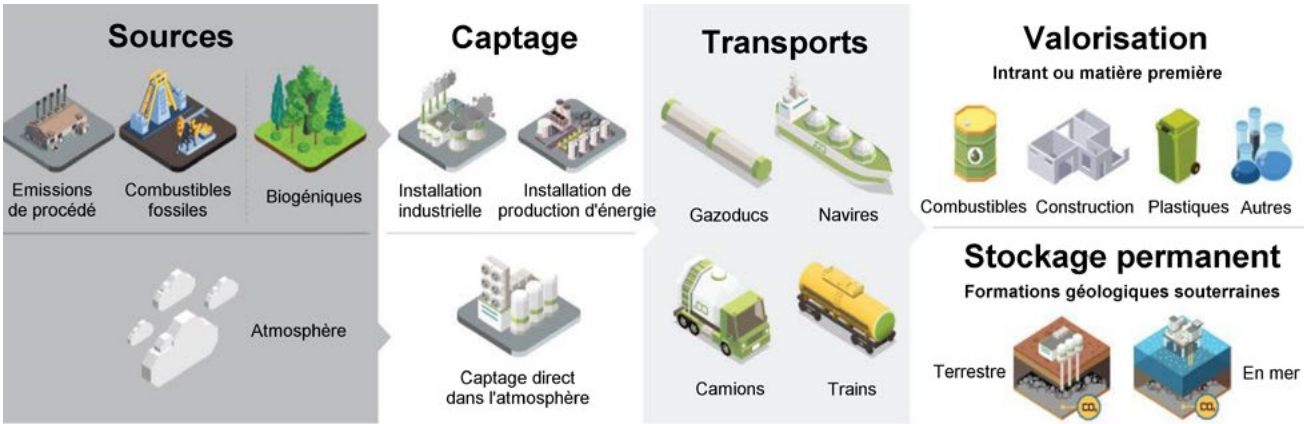
Intrinsèquement, le CCUS ne repose pas sur des technologies véritablement nouvelles. En effet, les procédés de captage et de séparation du CO₂ sont utilisés dans l'industrie depuis plusieurs décennies. De même, le transport et l'injection de CO₂ dans le sous-sol sont pratiqués depuis les années 1970, principalement dans le cadre de la récupération assistée du pétrole, en particulier aux États-Unis. Par ailleurs, certaines industries (par exemple agroalimentaires) utilisent déjà du CO₂ comme matière première, bien que dans des volumes relativement limités. Toutefois, atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre suppose, dans un avenir désormais proche, la mise en place d'une véritable filière industrielle du CCUS. Cela impliquera le déploiement d'unités de captage de très grande capacité, l'extension massive des réseaux de transport, le développement d'infrastructures de stockage à grande échelle, ainsi que la création d'une importante filière industrielle destinée à valoriser le CO₂, notamment sous forme de carburants de synthèse et d'autres produits à forte valeur ajoutée.



Atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre suppose, dans un avenir désormais proche, la mise en place d'une véritable filière industrielle du CCUS.

Figure 1 : Présentation de la chaîne de valeur du CCUS, depuis les émetteurs de CO₂ jusqu'à sa valorisation (CCU) et son stockage (CCS), en impliquant des procédés de captage et de transport

(Source : PEPR SPLEEN et Commissions européenne)



Le CCUS englobe des domaines scientifiques très vastes et divers — la catalyse, l'électrochimie, la thermodynamique, la mécanique des fluides, la géologie, les sciences sociales — et couvre tous les niveaux de TRL (Technology Readiness Level), de la science fondamentale au procédé industriel final. L'ensemble des procédés auxquels le CCUS fait appel est aussi très diversifié (voir la Figure 1) : captage dans des fumées industrielles, à partir de biomasse, ou encore directement dans l'atmosphère ; transport par pipeline, camions, trains ou voie maritime ; valorisation directe, conversion biologique, chimique ou minérale, production d'e-carburants ou de polymères ; stockage offshore ou onshore dans des réservoirs d'hydrocarbures épuisés, dans des aquifères salins ou des réservoirs mafiques ou ultramafiques. La filière CCUS mobilise ainsi des acteurs scientifiques, industriels et politiques d'horizons très variés, aux cultures très diverses et aux finalités parfois divergentes, que ce soit à l'échelle nationale ou internationale. Compte tenu de cette diversité, le périmètre de cette étude est volontairement restreint au captage du CO₂ provenant de sources industrielles et énergétiques, le captage direct du CO₂ atmosphérique n'étant traité qu'à la marge.

Au-delà de dresser un bilan des recherches menées au CNRS et chez ses partenaires sur le CCUS depuis 2005, cette étude analyse leurs impacts aux niveaux économique, politique et réglementaire, environnemental, social, culturel et sanitaire. Il s'agit de mieux comprendre comment la connaissance scientifique chemine et est appréhendée par des tiers pour produire des effets sociétaux, mais aussi comment les enjeux sociétaux et les besoins des parties prenantes peuvent en retour inspirer les orientations des recherches scientifiques.



INPUT et contributions du CNRS et de ses partenaires

HISTORIQUE DU DOMAINE DE RECHERCHE

Dans le cadre du contexte scientifique et politique décrit dans la section précédente, les technologies aujourd’hui regroupées sous l’acronyme CCUS s’inscrivent dans une histoire longue, marquée par des développements industriels et scientifiques bien antérieurs à leur mobilisation explicite pour la lutte contre le changement climatique.

Les procédés de valorisation du CO₂ constituent l’un des socles historiques de cette filière. Le procédé Sabatier d’hydrogénation du CO₂ par thermocatalyse a été développé dès la fin du 19^{ème} siècle (1897) et a conduit au prix Nobel de chimie attribué en 1912 à ce professeur toulousain. Le procédé Fischer-Tropsch est mis au point en Allemagne à partir de 1923, puis il sera utilisé par le régime nazi pour s’assurer une

certaine autonomie énergétique : il permet la synthèse d’hydrocarbures à partir du monoxyde de carbone et d’hydrogène par catalyse hétérogène (selon la formule $(2n+1) \text{ H}_2 + n \text{ CO} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n \text{ H}_2\text{O}$). Le CO est produit à partir de CO₂ via une réaction dite Reverse Water Gas Shift (RWGS : $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$). Ces deux approches constituent encore aujourd’hui des références majeures pour la filière CCU.



Les recherches sur le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ sont restées relativement marginales pendant près d’un siècle et n’ont connu un véritable regain d’intérêt, en France comme à l’international, qu’au début des années 2000, en réponse aux défis de la neutralité carbone.

À partir de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, ces travaux précurseurs se voient enrichis par des avancées fondamentales en électrochimie, en chimie moléculaire et en catalyse. En France, les travaux réalisés entre 1985 et 2000 par des chercheurs français de renom tels que Jean-Marie Lehn (médaille d’or du CNRS en 1981 et prix Nobel 1987), Jean-Pierre Sauvage (prix Nobel 2016) et Jean-Michel Savéant contribuent à poser les bases de la catalyse moléculaire utilisant des métaux de transition, qui jouera un rôle central dans le renouveau des recherches sur la conversion du CO₂.

En parallèle, les technologies de captage et de stockage du CO₂ trouvent leurs premières applications industrielles dès la première moitié du 20^{ème} siècle. Le CO₂ est alors capté par des entreprises gazières afin de purifier le méthane issu du gaz naturel. Il est aussi utilisé pour la carbonatation de boissons ou la production d’urée. Les procédés de captage reposent alors principalement sur l’absorption chimique via des amines. À partir des années 1970, les industries, surtout américaines, ont utilisé le CO₂ en l’injectant à l’état supercritique dans les puits de pétrole pour en améliorer le rendement (*Enhanced Oil Recovery*, ou récupération assistée du pétrole).

Ce n’est qu’à la fin des années 1970 que le concept de CCS au sens moderne, comme moyen de réduire les émissions de CO₂, a été proposé pour la première fois par Cesare Marchetti. Le projet Sleipner, lancé en 1996, et le programme de recherche et développement sur les gaz à effet de serre de l’AIE (projet Weyburn), lancé en 2000, ont été les premières démonstrations internationales de captage, de valorisation et de stockage à grande échelle des émissions anthropiques de CO₂².

Ainsi, bien que reposant sur des concepts scientifiques et technologiques anciens, les recherches sur le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ sont restées relativement marginales pendant près d’un siècle et n’ont connu un véritable regain d’intérêt, en France comme à l’international, qu’au début des années 2000, en réponse aux défis de la neutralité carbone. Tirant profit des connaissances acquises dans différents domaines de la chimie, de la géologie ou encore des sciences humaines pour comprendre et alimenter le débat public, le CCUS apparaît aujourd’hui comme un levier complémentaire mais nécessaire des stratégies de décarbonation, mobilisant des champs scientifiques et technologiques jusque-là largement disjoints, afin d’apporter une solution ultime de décarbonation dans les secteurs industriels où la réduction des émissions de CO₂ est impossible (*hard to abate CO₂ emissions*).

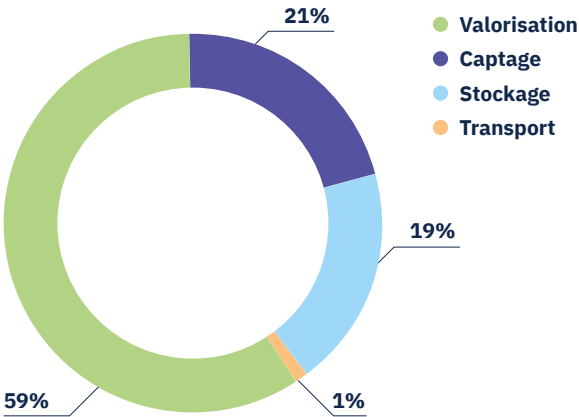
2. Voir "Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead", Engineering 14:33-43 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.024>

STRUCTURATION DE LA RECHERCHE EN FRANCE ET AU CNRS

On compte aujourd’hui **environ 35 unités mixtes de recherche (UMR et UPR)³, sous tutelle du CNRS et de ses partenaires académiques**, ayant une activité majeure sur les approches de captage, de stockage ou de valorisation du CO₂ (voir en Annexe 2 la répartition des laboratoires selon les quatre domaines du CCUS). Ces laboratoires ont mobilisé environ 340 équivalents temps plein (etp) en 2024. En données cumulées **entre 2005 et 2024, on dénombre 3 565 etp sur la thématique CCUS, tous niveaux et fonctions confondus** (dont 1 022 rémunérés par le CNRS), et une masse salariale totale de 258,5 M€ dont 75 M€ pour le CNRS (voir Annexe 1).

On note une mobilisation croissante des scientifiques sur les thématiques CCUS puisqu’elles mobilisaient environ 50 etp en 2005, pour atteindre plus de 300 etp à partir de 2023. La répartition entre les etp consacrés au captage de CO₂, à son transport puis son stockage ou sa valorisation a également beaucoup évolué au cours du temps. Si seulement 12% des etp s’intéressaient à la valorisation du CO₂ en 2016, ils étaient 38% en 2019 puis 59% en 2024. Actuellement, près de 60% des scientifiques s’intéressent aux différents modes de valorisation du CO₂, alors que les activités de captage et séparation d’une part, de stockage d’autre part, mobilisent chacune 20% des personnels. Le transport du CO₂ ne mobilise que très peu de recherche fondamentale.

Figure 2 : Répartition des etp sur les différents volets de la filière CCUS



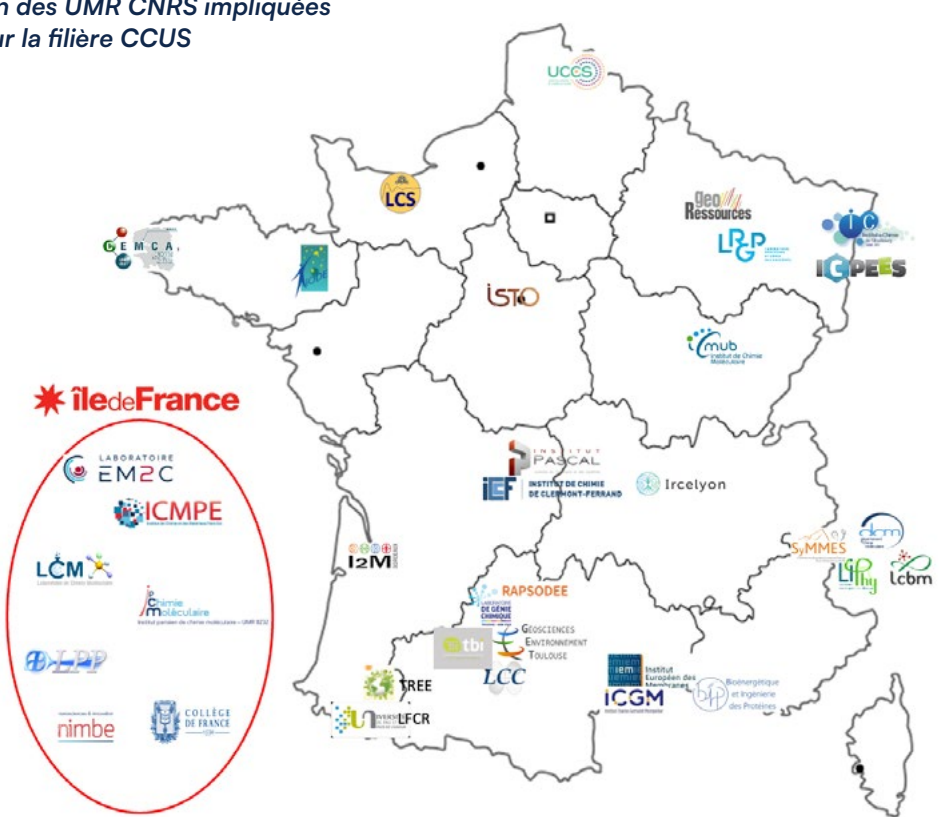
3. Ce nombre ne tient compte que des unités totalisant au moins 4 etp travaillant dans la filière CCUS.



Les laboratoires impliqués dans la recherche sur le CCUS sont répartis sur l’ensemble du territoire national, comme le montre la carte de la Figure 3, avec des pôles particulièrement actifs dans le Sud-Ouest (Toulouse, Pau, Albi), dans l’Est (Nancy, Strasbourg), en Auvergne-Rhône-Alpes (Grenoble, Lyon, Clermont-Ferrand) et en Île-de-France. A ces laboratoires implantés sur le territoire français s’ajoute le laboratoire de recherche international (IRL) Eco-Efficient Products and Process Laboratory (E2P2L), fruit d’une collaboration entre le CNRS et Syensqo (ex-Solvay), associé à l’Ecole Normale Supérieure de Lyon, aux universités françaises de Lille et Poitiers, et aux universités chinoises ECNU (Université normale de la Chine de l’Est), ECUST (Université des sciences et technologies de la Chine de l’Est) et Fudan. Ce laboratoire situé à

Shanghai est dédié à la chimie renouvelable et durable, incluant un axe sur la valorisation du CO₂. Un IRP (International Research Project) a permis pendant plusieurs années la collaboration soutenue entre IRCELYON et l’équipe de Suzumu Kitagawa (Prix Nobel 2025) à l’Université de Tokyo sur les MOFs, avec Air Liquide comme membre associé.

Figure 3 : Répartition des UMR CNRS impliquées dans la recherche sur la filière CCUS



La filière CCUS ne correspond pas à une thématique scientifique unique mais fait appel à des laboratoires possédant des expertises variées sur le captage, le stockage ou la valorisation du CO₂, parmi d'autres thèmes de recherche. Aussi, la communauté scientifique ne s'est pas structurée autour de cette filière jusqu'à la création du PEPR SPLEEN (2023-2030), intégré dans la stratégie nationale d'accélération sur la décarbonation de l'industrie. Deux de ses axes, « Décarbonation des Procédés » et « Stockage et Valorisation du CO₂ », visent à favoriser la coopération entre les laboratoires concernés, avec l'objectif de développer des activités de recherche amont (TRL 1-4), tandis que l'axe transverse « Nouveaux outils de prédiction et monitoring » propose de fournir des outils communs pouvant également bénéficier au domaine du CCUS.

D'autres programmes contribuent à la structuration de ce domaine en France, notamment le projet Synflux-Lumicals du PEPR LUMA (Interactions lumière-matière) qui vise à développer des stratégies innovantes pour collecter et utiliser plus efficacement la lumière dans les dispositifs de production de carburants solaires, en améliorant l'efficacité et la sélectivité des procédés de photo-, electro- et photoélectro-catalyse de réduction du CO₂. Enfin, le projet AQUIBEAT du PEPR « Sous-Sol, Bien commun » se focalise sur les connaissances géologiques du bassin aquitain requises pour la transition énergétique et traite partiellement du stockage du CO₂.

Si la recherche académique française sur le CCUS est apparue longtemps comme faiblement structurée, les infrastructures européennes consacrées au captage, au transport, au stockage et à la valorisation du CO₂

sont regroupées depuis 2017 au sein d'un réseau européen ERIC, intitulé ECCSEL (European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure), qui aborde également le captage du CO₂ atmosphérique, l'exploitation de l'énergie géothermale et le stockage d'énergie dans le sous-sol. Ce réseau est principalement dédié à des activités de recherche et de démonstration, à l'interface entre recherche académique et applications préindustrielles. Ainsi son nœud français, coordonné par le BRGM, rassemble des infrastructures pilotées par les institutions BRGM, IFPEN, INERIS, Andra, CNRS et ARMINES pour la sphère publique, et les industriels EDF, TotalEnergies et Lafarge Holcim France. Citons également SUNERGY, une initiative paneuropéenne qui vise à favoriser l'économie circulaire grâce à la production durable de carburants sans énergie fossile, de produits chimiques de base à partir d'énergies renouvelables (soleil, vent) et de molécules abondantes (CO₂, eau, azote). Cette initiative regroupe 30 organisations réparties dans 12 pays, issues des secteurs industriel, académique (y compris le CNRS) et civil, afin d'élaborer une feuille de route technologique, de constituer un portefeuille de projets européens et de préparer une initiative de R&I à grande échelle.

FINANCEMENTS

La recherche sur la filière CCUS en France, et en particulier au CNRS, a bénéficié de financements publics du CNRS mais aussi régionaux, nationaux et européens. En raison de leur diversité et de leur multiplicité, nous ne détaillerons pas ici les financements régionaux.

Depuis 2012, le CNRS a financé les laboratoires travaillant sur le CCUS à hauteur de **17 M€** en crédits « FEI » (Fonctionnement, Equipements et Investissement). Une extrapolation fondée sur le nombre d'etp entre 2005 et 2011 conduit à estimer le financement FEI du CNRS pendant cette première période à environ **4,4 M€**, soit au total **21,4 M€** sur 20 ans. Au niveau national, les financements des projets CCUS des laboratoires CNRS ont essentiellement été opérés par l'ANR, soit via les appels à projets génériques thématiques ou non, soit via les projets PIA puis France 2030 (source : ANR). Ainsi, 65 projets dont au moins une UMR CNRS est partenaire ont été financés via les appels à projets génériques (AAPG) entre 2005 (année de création de l'ANR) et 2024, pour un montant total de **20,24 M€** destinés aux laboratoires dont le CNRS est tutelle. Ces projets sont issus de collaborations public-public ou public-privé. Les axes « Décarbonation des Procédés » et « Stockage et Valorisation du CO₂ » du PEPR SPLEEN ont été dotés d'un budget de **34,3 M€** et le projet Synflux-Lumicals du PEPR LUMA est doté de **3,48 M€**.

Les projets de prématuration-maturation technologiques correspondant à des TRL de 1 à 6 sont actuellement financés par le dispositif de soutien France 2030 CACTUS, un consortium de 18 partenaires mené par CNRS Innovation et la SATT Pulsalys, aligné sur les thématiques du PEPR SPLEEN. Depuis 2005, 20 projets de maturation ont été financés par les SATT à hauteur de **4,64 M€** et deux projets de prématuration l'ont été par le CNRS (**0,275 M€**).

Au niveau européen, huit projets sur le CCUS menés par des membres d'UMR CNRS ont été financés par l'ERC pour un montant total de **13,25 M€** : un projet Starting en 2018, deux projets Consolidator en 2016 et 2018, trois projets Advanced en 2015, 2019 et 2020, et deux projets Proof of Concept en 2022 et 2024. Cependant, la majorité des fonds européens ont été attribués via des programmes collaboratifs des différents programmes-cadres depuis le FP5 jusqu'à Horizon Europe, soit 42 projets de 2005 à 2024. Au total, ces projets européens ont été financés à hauteur de **27,32 M€** gérés par le CNRS (source : Cordis).

Le tableau en page 27 présente un récapitulatif des financements obtenus.



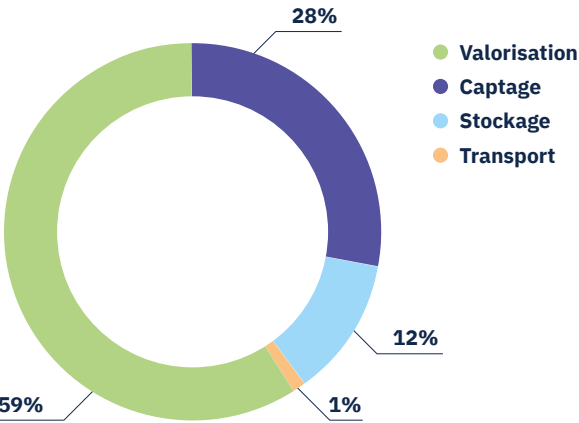
La communauté scientifique ne s'est pas structurée autour de cette filière jusqu'à la création du PEPR SPLEEN (2023-2030), intégré dans la stratégie nationale d'accélération sur la décarbonation de l'industrie.

PARTENARIATS CNRS-ENTREPRISES

Les partenariats entre le CNRS et les entreprises sur la filière CCUS restent quantitativement limités au regard des enjeux industriels associés à la décarbonation. Sur la base des données connues entre 2013 et septembre 2025, on dénombre 114 contrats de partenariats CNRS-entreprises sur cette période, soit moins de 10 contrats par an en moyenne. Le montant total pour le CNRS et les établissements partenaires est de **14,8 M€** dont **5,9 M€** financés par les industriels. Compte tenu du fait que des contrats ont pu être signés par la cotutelle d’une UMR, le nombre réel de partenariats est estimé au double (source : DRE CNRS), soit une vingtaine de contrats signés par an et un total d’environ 250 partenariats sur la période considérée.

La répartition de ces contrats par domaine de la filière CCUS met en évidence une prédominance nette des activités de valorisation du CO₂ qui concentrent près de 60% des contrats, loin devant les activités de captage (près de 30%), le stockage (un peu plus de 10%), et le transport qui reste marginal (voir la Figure 4). Cette répartition reproduit assez fidèlement celle des etp sur les différents volets de la filière CCUS (Figure 2), avec un déséquilibre légèrement plus prononcé entre captage et stockage.

Figure 4 : Répartition des partenariats CNRS-entreprises sur les différents volets de la filière CCUS.



Les contrats sont de nature variée (accords de collaboration, de prestation, de consortium, contrat CIFRE...), avec une majorité de contrats de collaboration de recherche et d’accords de secret (plus de 40 chacun sur les 114 partenariats recensés). Comme illustré sur le diagramme ci-dessous, près de la moitié de ces partenariats sont établis avec des grandes entreprises (GE). On trouve également des PME, tandis que les entreprises de taille intermédiaire (ETI) restent marginalement représentées. Parmi les grandes entreprises partenaires du CNRS sur la filière CCUS, TotalEnergies apparaît très nettement comme l’acteur le plus fréquemment impliqué, devant d’autres groupes industriels relevant des secteurs de l’énergie (EDF, Orano), de la chimie (Air Liquide, Rhodia & Solvay, Arkema), des matériaux et de la construction (Holcim, Vicat, Saint-Gobain), ou encore de secteurs industriels spécifiques (Naval Group).



Les partenariats entre le CNRS et les entreprises sur la filière CCUS restent quantitativement limités au regard des enjeux industriels associés à la décarbonation.

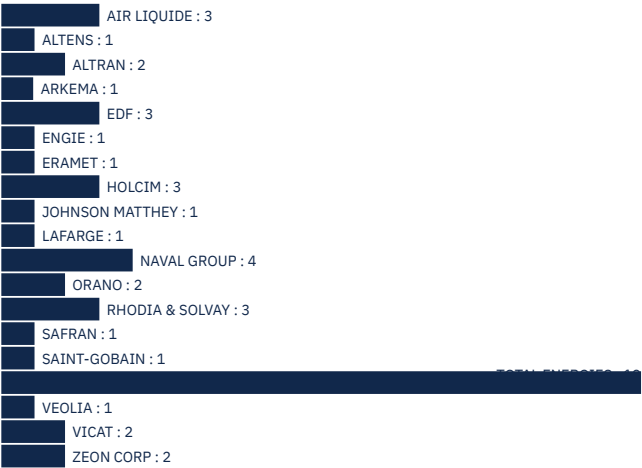
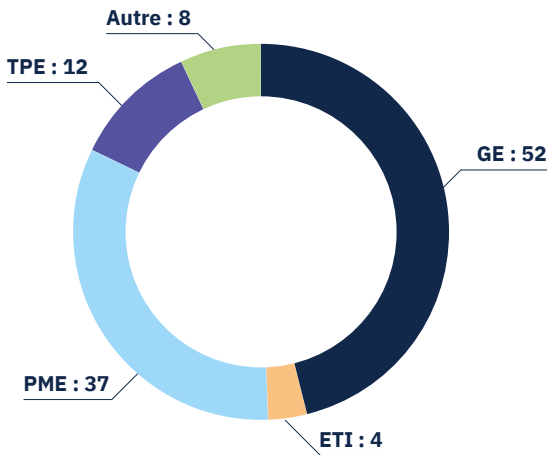


Figure 5 : Répartition des partenariats CNRS-entreprises et liste des grandes entreprises partenaires

GE = grandes entreprises ; ETI = entreprises de taille intermédiaire ; PME = petites et moyennes entreprises ; TPE = très petites entreprises

Enfin, 8 laboratoires communs (LabCom) et chaires industrielles entre le CNRS et les entreprises ont été créés depuis 2011 autour de concepts en lien avec la filière CCUS, sur des aspects très variés tels que les procédés, les analyses de cycles de vie, de chaines de valeur... Il s'agit de la forme la plus aboutie de partenariat public-privé qui s'appuie sur un programme scientifique co-dirigé et co-construit.

LabCom :

ACRONYME	ANNÉE CRÉATION	ACTIF	FILIÈRE CCUS	LABORATOIRES	ENTREPRISES
Melusine 2	2022	Oui	C	LRGP	EDF
PIGAZ	2017	Oui	C, U	LRGP	Air Liquide
Solutec	2021	Oui	C	Rapsodee	Eco-Tec Ceram

Chaires :

ACRONYME	ANNÉE CRÉATION	ACTIF	FILIÈRE CCUS	LABORATOIRES	ENTREPRISES
Smart DigiCat	2022	Oui	U	UCCS, CRIStAL, E2P2L, Institut Chevreul, INRIA	Solvay, HORIBA, TeamCat Solutions
CO2ES	2018	Oui	S	LFCE	TotalEnergies
CARB3E	2018	Non	S	CERECE	TotalEnergies
TRACE	2018	Non		LSCE, LMD	Suez, Thales Alenia Space, TotalEnergies
CarMa	2019	Oui	C, S	TREE	IFPEN et TotalEnergies

Notons que deux instituts Carnot, ISIFOR (UPPA, CNRS) et ICEEL (Université de Lorraine et CNRS) accompagnent des projets de R&D nationaux et internationaux dédiés aux enjeux énergétiques et environnementaux du sous-sol et d'innovation durable respectivement.

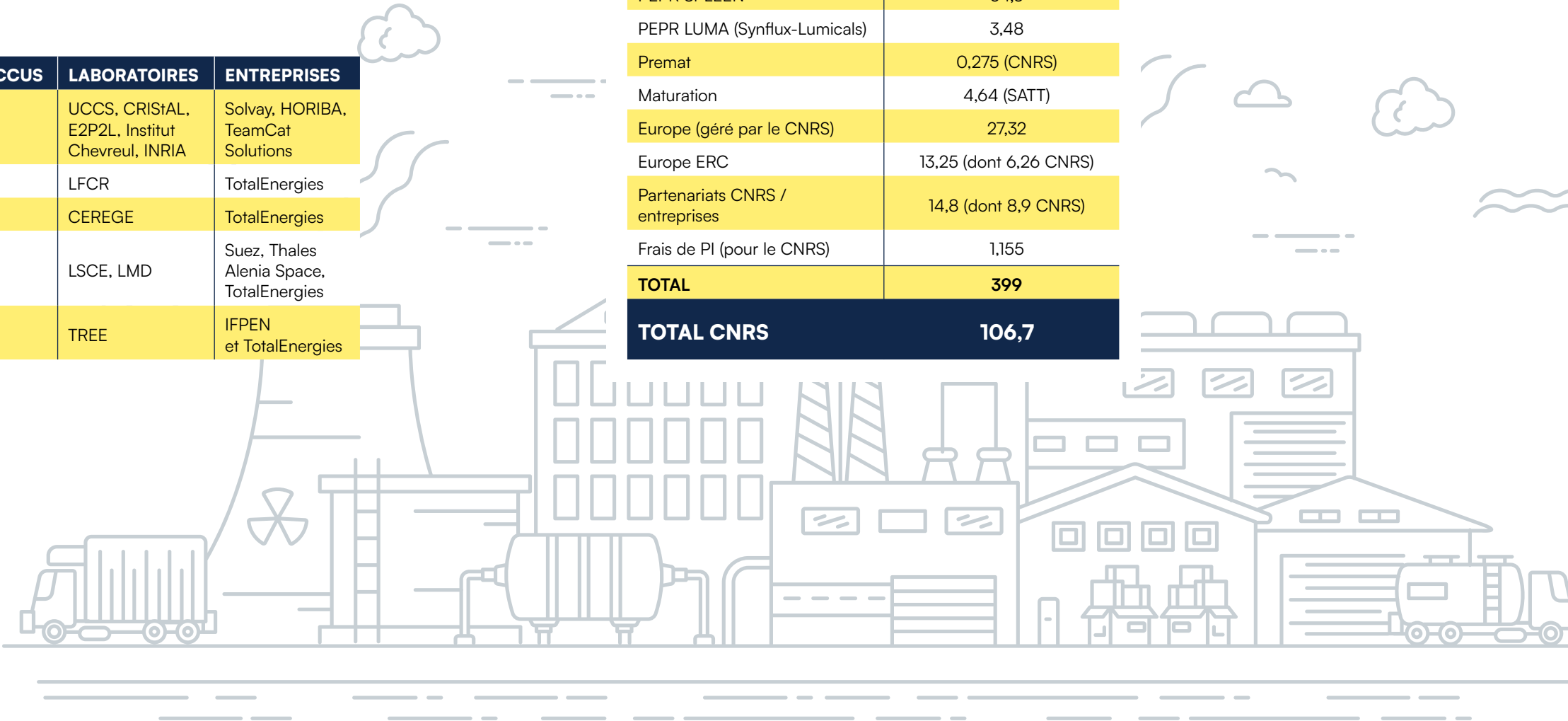
BILAN DE L'INVESTISSEMENT FINANCIER TOTAL

En termes de financements, la thématique CCUS au CNRS a donc bénéficié d'environ **400 M€ entre 2005 et 2024, dont près de 107 M€ du CNRS.**

INPUT (2005-2024)	M€
Masse salariale	258,5 (dont 75 CNRS)
Financements CNRS	21,4
ANR	20,24
PEPR SPLEEN	34,3
PEPR LUMA (Synflux-Lumicals)	3,48
Premat	0,275 (CNRS)
Maturation	4,64 (SATT)
Europe (géré par le CNRS)	27,32
Europe ERC	13,25 (dont 6,26 CNRS)
Partenariats CNRS / entreprises	14,8 (dont 8,9 CNRS)
Frais de PI (pour le CNRS)	1,155
TOTAL	399
TOTAL CNRS	106,7



La thématique CCUS au CNRS a bénéficié d'environ 400 M€ entre 2005 et 2024, dont près de 107 M€ du CNRS.



OUTPUT des recherches

LES PRINCIPALES AVANCÉES SCIENTIFIQUES DU CNRS SUR LE CAPTAGE, LE STOCKAGE ET LA VALORISATION DU CO₂ DEPUIS 2005

Depuis le début du 21^{ème} siècle, les recherches menées par le CNRS et ses partenaires sur le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ se sont fortement développées, en réponse à la montée des contraintes climatiques et aux besoins croissants de décarbonation de l'industrie. Elles ont contribué à faire progresser de façon significative plusieurs briques de la chaîne de valeur du CCUS, depuis l'amélioration des procédés de captage jusqu'à la compréhension du stockage géologique, en passant par le développement de nouvelles voies de valorisation du CO₂. Cette section présente les principales avancées scientifiques produites dans ces différents domaines depuis 2005.

Recherches sur les procédés de captage du CO₂

Trois approches (précombustion, post-combustion, oxy-combustion) peuvent être mises en œuvre pour préparer les gaz de sortie d'industries. La plus efficace aujourd'hui est celle dite de post-combustion qui fait passer le gaz de sortie d'usine à travers des solvants contenant des amines. Des travaux ont été effectués par le CNRS et IFPEN pour améliorer l'efficacité de ces composés. Les techniques les plus matures associent plusieurs amines démixantes, permettant de répartir le gaz en deux phases, l'une riche en CO₂, l'autre plus pauvre, afin de minimiser l'énergie de régénération qui reste le principal handicap de cette approche. La technique du Recirculating Flue Gas (RFG), qui réinjecte une partie des gaz de combustion à l'entrée des brûleurs, permet aussi d'améliorer le captage en sortie d'usine.

Si les amines offrent toujours la solution la plus générale, les recherches se sont orientées ces vingt dernières années vers l'adsorption sur solides poreux, en particulier les résines fonctionnalisées par des amines, les charbons actifs, les zéolithes, les silices mésoporeuses, ou les MOFs (Metal—Organic Framework). Une fois saturés, ces solides peuvent être régénérés par apport énergétique (le plus souvent sous forme de chaleur) ou par baisse de pression. Ces procédés modulaires et flexibles ont l'avantage d'être plus sobres, de ne pas utiliser de solvants liquides corrosifs et à durée de vie limitée puisqu'ils reposent sur des adsorbants solides réutilisables de nombreuses fois. Certains présentent cependant les inconvénients d'être sensibles à l'humidité et aux impuretés des fumées, d'avoir parfois une capacité limitée et de buter sur la gestion complexe des cycles adsorption/désorption à grande échelle.

Les MOFs constituent probablement la percée scientifique « récente » la plus significative. Ces solides ultra-poreux ont, grâce à la taille spécifique de leurs pores, la capacité d'augmenter de façon drastique et sans pénalité énergétique majeure le captage sélectif du CO₂, y compris très dilué. Si les travaux historiques sont dus à Gérard Férey (Université de Versailles, Médaille d'Or CNRS 2010), il faut citer les contributions récentes remarquables de Christian Serre (CNRS, ESPCI, ENS), David Farrusseng (CNRS, Université de Lyon I) et Karim Adil (IMMM, CNRS, Université du Mans) qui ont conçu des MOFs ultra-microporeux particulièrement efficaces. Ces molécules ont été initialement développées pour le captage du CO₂ atmosphérique (DAC pour Direct Air Capture), mais elles ont maintenant leur importance pour la purification en sortie d'usine de gaz pauvres en CO₂. Leur utilisation à l'échelle industrielle soulève toutefois encore des défis car ils doivent être à la fois bon marché et résistants aux nombreux contaminants présents dans les effluents.

Nouvelles voies de valorisation du CO₂

L'utilisation et la valorisation du CO₂ ont fortement gagné en intérêt en raison des réglementations européennes, en particulier la réglementation ReFuelEU Aviation qui impose d'utiliser des proportions croissantes de carburants synthétiques durables, appelés SAF (Sustainable Aviation Fuel), pour alimenter les avions. La valorisation du CO₂ fait appel à des techniques de catalyse hétérogène très bien connues comme le procédé Sabatier ou le procédé Fischer-Tropsch.

En parallèle, les chercheurs se sont ré-emparés du sujet de la valorisation du CO₂ à partir de leurs acquis historiques en électrochimie, en chimie moléculaire et en catalyse, avec des chercheurs de renom tels que Jean-Marie Lehn (Prix Nobel de chimie 1987), Jean-Pierre Sauvage (Prix Nobel de chimie 2016), Alain Deronzier et Jean-Michel Savéant. Les chercheurs français sont reconnus internationalement grâce à leurs travaux pionniers sur de nouveaux modes de catalyse (par apport d'énergie thermique, électrique ou lumineuse) en utilisant des métaux non-nobles (fer, cobalt, cuivre...), et grâce à une parfaite maîtrise des phénomènes fondamentaux sous-jacents. Notons ainsi les travaux de Marc Robert (CNRS, Sorbonne Université) et Marc Fontecave (CNRS, Collège de France) qui reposent sur de nouveaux procédés électrochimiques et photo-électrochimiques utilisant la photocatalyse, le solaire concentré ou des LEDs adaptées. La maturité technologique et industrielle de ces technologies de rupture reste cependant encore à démontrer.

Depuis 2023, le CEA, en collaboration avec le CNRS et l'Université Paris-Saclay, se spécialise dans la production d'e-carburant, via son programme sur l'économie circulaire du carbone dirigé par Thibaut Cantat et repris par Claire Gauthier (CEA, CNRS, Université Paris Saclay), basé sur des processus de thermocatalyse du CO₂ avec du dihydrogène H₂. Enfin, les travaux de Damien Voiry (CNRS, IEM, Montpellier), Vincent Artero (CEA, CNRS, UGA) et Ally Aukauloo (CNRS, Université Paris Saclay) sur les nouveaux catalyseurs bio-inspirés sont particulièrement pertinents mais restent pour l'instant au stade académique.

Une autre voie de valorisation du CO₂ vise à produire du béton et du ciment bas-carbone à partir de déchets miniers et de roches ultramafiques, avec des catalyseurs bactériens. Des travaux de laboratoire donnent des résultats prometteurs et cette voie pourrait permettre de valoriser des volumes importants de CO₂ capté. Ces nouvelles voies innovantes de (bio)minéralisation du CO₂ à partir de sous-produits industriels sont actuellement étudiées dans le cadre du projet CARBIOCEM (PEPR SPLEEN).

Les défis actuels du développement de ces différentes approches concernent l'intégration des catalyseurs dans des dispositifs complets, en tenant compte de la maîtrise des coûts de chaque élément du dispositif. De plus, aussi bien pour le captage que pour la valorisation, une meilleure connaissance du comportement sur un an des différents éléments (catalyseurs, électrodes...) est absolument nécessaire. Des premières études et des tentatives d'extrapolation du comportement à court terme sont actuellement menées.

Le stockage géologique du CO₂ et ses enjeux sociétaux

Le stockage du CO₂, que ce soit dans des aquifères salins profonds, dans des gisements épuisés d'hydrocarbure onshore ou offshore, ou dans les réservoirs mafiques et ultramafiques, fait l'objet de travaux depuis une dizaine d'années. L'injection de CO₂ est bien maîtrisée, grâce aux connaissances acquises à la suite des pratiques de *Enhanced Oil Recovery* (EOR) menées par les industriels à partir des années 1970. D'un point de vue scientifique, les avancées concernent la connaissance des écoulements multiphasiques du CO₂, la dissolution du CO₂ à long terme dans des eaux salées et la minéralisation du CO₂ pour former des carbonates solides (phénomènes de serpentinitisation). D'un point de vue technologique, les travaux portent actuellement sur le suivi et la modélisation du comportement du CO₂ dans le réservoir, en faisant intervenir des notions de géochimie et de géomécanique.

Le BRGM, IFPEN, mais aussi des laboratoires UMR du CNRS tels que Georessources à Nancy, Géosciences Environnement Toulouse, Géosciences Montpellier et l'IPGP sont particulièrement bien placés dans ce domaine. Notons que ces trois derniers laboratoires s'intéressent particulièrement à la séquestration minérale du CO₂ dans les roches mafiques et ultramafiques en lien avec le site pilote CARBIFIX en Islande (devenu la compagnie CARBIFIX depuis 2020) et le site projet de forage de recherche ICDP (International Continental Scientific Drilling Program ; OmanDP) portant sur l'ophiolite d'Oman. La caractérisation des réservoirs est au cœur des préoccupations actuelles (projets européen PilotSTRATEGY et français EVASTOCO2). La définition des protocoles de surveillance et de gestion des risques fait l'objet de discussions entre les différents acteurs du stockage.

Les différents projets de stockage passés et actuels, notamment le projet PYCASSO à Lacq, ont mis en évidence l'importance de l'acceptation sociétale pour pouvoir développer une activité sur un site donné. Les acteurs locaux tels que les mairies, associations, acteurs économiques ou encore les institutions ont besoin de comprendre les risques, les enjeux et les bénéfices liés à ces activités de stockage. Les travaux de Xavier Arnauld de Sartre (co-porteur du PEPR « Sous-Sol, Bien commun » et responsable d'un projet du PEPR SPLEEN) et de Sébastien Chailleux (coordinateur du projet VERTIQUAL du PEPR « Sous-sol, Bien commun », ciblé sur la politisation du sous-sol) ont bien montré la nécessité de structurer un débat national autour du principe même du CCS, de mettre en place des échanges à l'échelle locale autour des différentes briques technologiques, des comparaisons avec les autres technologies et des spécificités du territoire visé. Toutefois, la complexité de la chaîne de valeur du CCUS, son intégration dans la stratégie globale de décarbonation et les incertitudes qui subsistent sur certains projets rendent la communication autour de ces technologies parfois délicate pour les différents acteurs.

Les impuretés, le monitoring et le cycle de vie : des enjeux transversaux à l'ensemble de la chaîne de valeur

Le développement des différents projets de CCUS a également révélé la nécessité de prendre en compte la qualité réelle du CO₂ issu du captage, car les impuretés qu'il contient ont des répercussions sur toutes les étapes du CCUS. Par exemple, la présence d'impuretés conduit à des exigences spécifiques en matière de sécurité pour la liquéfaction et le transport, des problèmes importants de corrosion pouvant apparaître dans les canalisations et les réservoirs.

Le monitoring est un élément clé pour assurer la crédibilité et la sûreté des projets CCUS, depuis le captage jusqu'au stockage géologique. Il est notamment nécessaire de suivre la propagation du CO₂ injecté dans les réservoirs, de contrôler la présence d'impuretés, de vérifier la qualité du confinement (absence de fuites), de gérer les risques (sismicité induite, surpression, intégrité des puits) et de prouver la performance climatique à long terme. Sur l'ensemble des briques du CCUS, une compréhension et une optimisation complète de la chaîne de valeur passent par une détermination du cycle de vie ou de la figure de mérite. L'objectif est d'identifier précisément les étapes critiques qui nécessitent une optimisation renforcée. Différents acteurs (BRGM, CEA, IFPEN, CNRS) développent à cet effet des outils spécifiques, fondés sur des normes et des méthodologies distinctes.

Dans le contexte actuel d'objectifs climatiques très contraints, ces analyses mettent en évidence la nécessité de valider les performances et les compromis entre les aspects techniques et économiques à des niveaux de maturité technologique plus élevés. Si le CNRS est remarquablement bien placé sur le créneau « amont » du captage et de la valorisation du CO₂, il peine à mettre en œuvre le relai vers le génie chimique des procédés, ce créneau étant plutôt exploité par IFPEN (à travers sa filiale Axens) et le CEA. Les scientifiques et acteurs privés du CCUS s'accordent ainsi sur la nécessité de monter rapidement en TRL pour chacune des étapes du CCUS, en développant des pilotes et des démonstrateurs. Atteindre la maturité technologique propre à chaque étape nécessite en effet une dizaine d'années de développement industriel.

LES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Plus de 75 000 publications scientifiques relatives au CCUS ont été produites dans le monde entre 2005 et 2023. Comme souvent, la production annuelle de publications croît avec les années (Figure 6), portée au début de la période par les applications de récupération assistée du pétrole (EOR), puis plus tard par la perspective de la mise en place de politiques environnementales. On observe toutefois un ralentissement de l'activité scientifique au début des années 2010, probablement associé à une prise de conscience de l'absence de modèle économique sous-jacent et à des difficultés technologiques qui ont conduit à un désintérêt temporaire pour ces thématiques. Comme le montre la Figure 7, les publications scientifiques sur le CCUS portent essentiellement sur les briques captage, valorisation et stockage, le transport n'étant que très peu étudié. Au fil du temps, les recherches orientées sur la valorisation du CO₂ prennent le pas sur le stockage.

Avec plus de 2 300 publications scientifiques relatives au CCUS produites entre 2005 et 2023, la France occupe sur cette période le 11^{ème} rang mondial (3,1% des articles) et le 4^{ème} rang en Europe, derrière le Royaume-Uni (6,5%), l'Allemagne (4,3%) et l'Espagne (3,4%). Bien que le nombre de publications scientifiques de la France ait doublé entre 2010 et 2023, sa contribution relative à cette thématique s'est érodée au cours du temps, passant de plus de 5% vers les années 2010 à des valeurs plus proches de 2,5% au début des années 2020. On observe des tendances similaires, plus ou moins marquées, dans les autres principaux pays. Ces évolutions sont dues à la progression spectaculaire de la recherche en Chine qui devient le contributeur majoritaire de la recherche CCUS avec près de 50% des publications en 2023, contre 23% en 2005. A un niveau évidemment bien moindre, d'autres pays comme l'Inde ou l'Iran (12^{ème} rang mondial sur la période, juste derrière la France), progressent également et doublent leur implication mondiale sur la période.

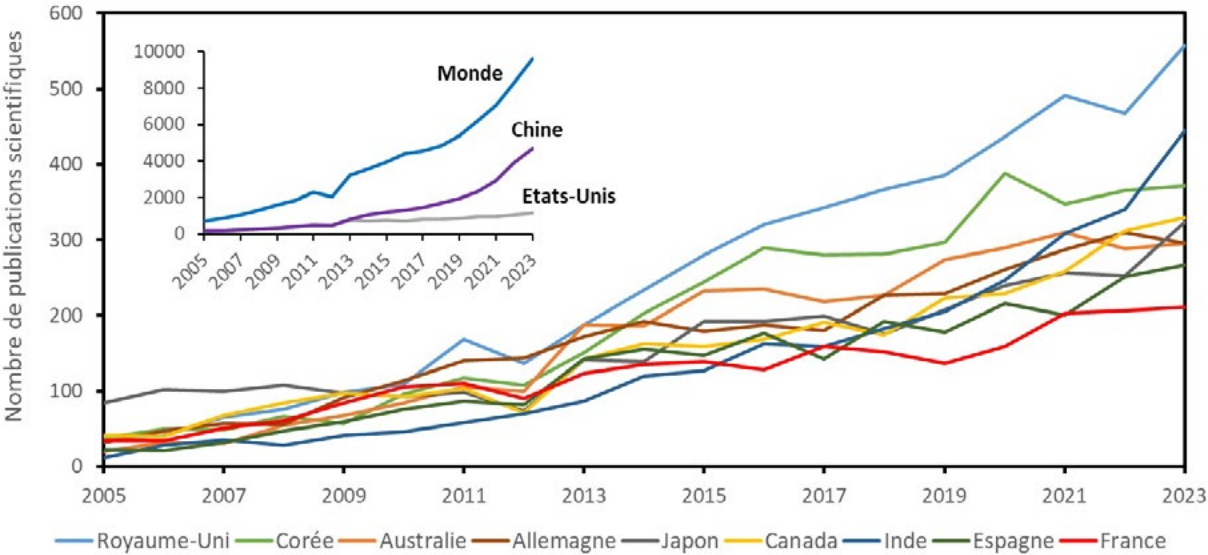


Figure 6 : Nombre de publications scientifiques par pays signataire ; le graphe principal présente les principaux pays sauf les États-Unis et la Chine, dont la forte croissance depuis 25 ans est clairement visible dans l'insert

(source : Scopus ; VIA INNO)

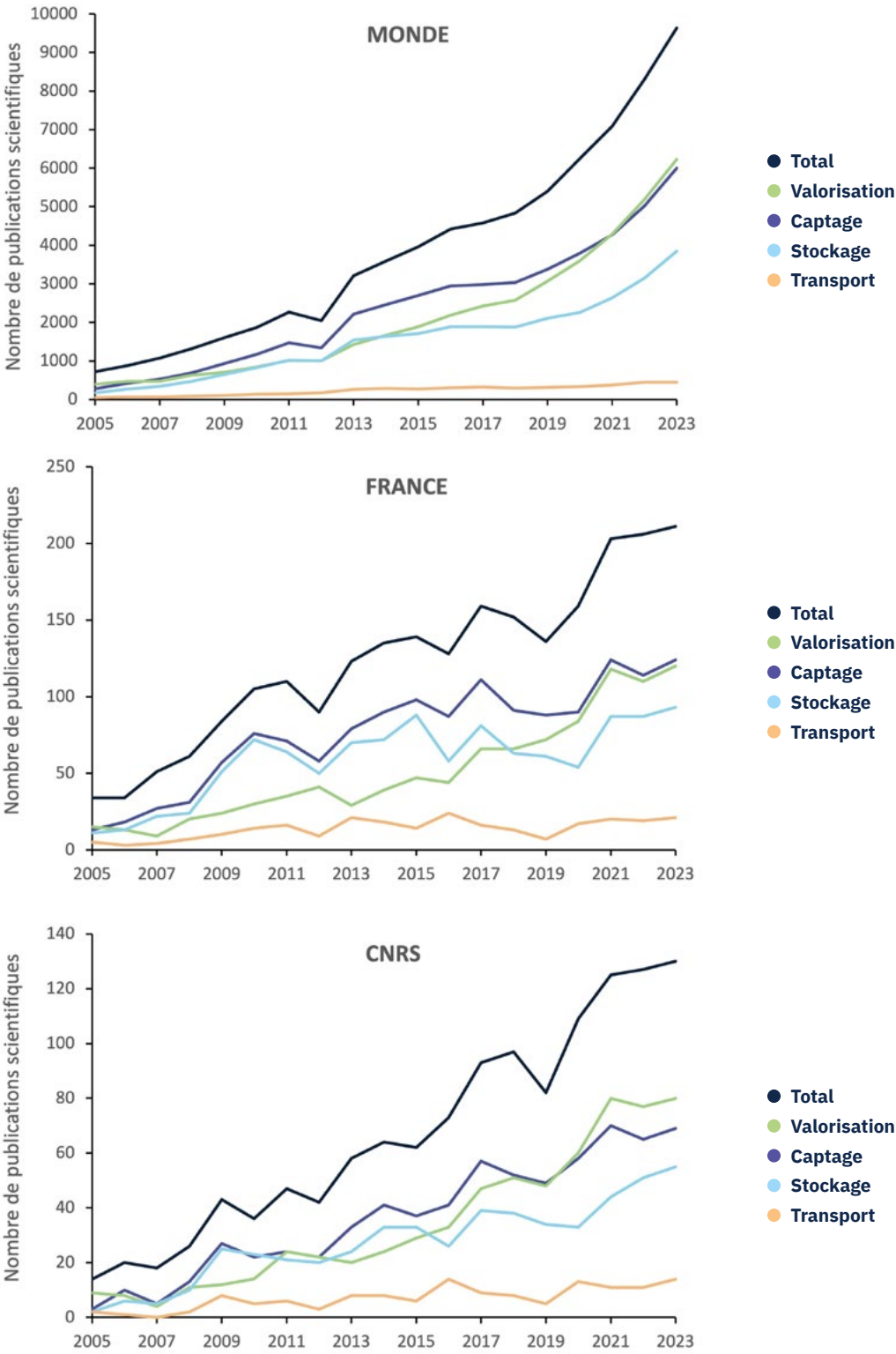


Figure 7 : Nombre de publications scientifiques selon les différentes briques du CCUS (captage, valorisation, stockage, transport et total), au niveau mondial, en France et au CNRS

(source : Scopus ; VIA INNO)

Présent en moyenne dans près de 55% des publications scientifiques de la France entre 2005 et 2023, soit plus de 1 250 publications, le CNRS contribue de façon majeure à la recherche scientifique française du domaine. Il renforce d'ailleurs assez nettement sa contribution au cours du temps, en particulier pendant les années 2010 où il passe de 40 à 45% en début de décennie à plus de 60% des publications françaises à partir de 2018. Parmi les autres principaux contributeurs français figurent IFPEN (près de 180 publications), le BRGM, Mines ParisTech, mais aussi des industriels comme TotalEnergies, avec chacun une centaine de publications.

Comme c'est le cas au niveau mondial, les recherches sur le captage et le stockage dominant très largement la production scientifique française sur la période 2005-2015 (Figure 7). Au fil des années, un intérêt croissant est porté à la valorisation du CO₂, qui est devenue un champ de recherche aussi développé que le captage du CO₂ en France depuis la fin des années 2010. Cette évolution, du stockage du CO₂ capté vers sa valorisation et son réemploi, est très

largement soutenue par les recherches du CNRS, où cette thématique est devenue dominante depuis le début des années 2020.

La Figure 8 montre la répartition géographique des auteurs des publications CCUS du CNRS. Elles émanent en premier lieu de laboratoires de l'Île-de-France. Viennent ensuite les travaux des régions lyonnaise, toulousaine et montpellieraine, puis nancéenne et grenobloise.

Les publications du CNRS ont été largement citées, avec plus de 60 000 citations reçues selon le Web of Science, soit une moyenne de 50 citations par publication et un h-index de 117⁴. Une douzaine d'articles internationaux, publiés dans des grandes revues interdisciplinaires comme Nature ou Science et cosignés par le CNRS, sont classés par le Web of Science comme « Highly Cited Papers », c'est-à-dire parmi les 1% des publications postérieures à 2015 les plus citées de leur année et de leur domaine (le plus souvent en chimie). Les dix premières publications sont listées en Annexe 3.

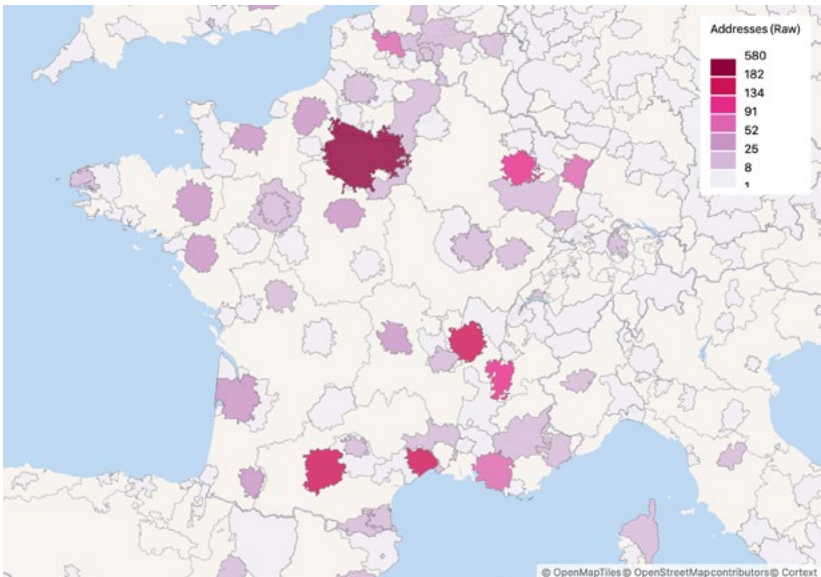


Figure 8 : Répartition des adresses des auteurs de publications scientifiques du CNRS dans les métropoles françaises

(source : Scopus/Web of Science ; VIA INNO ; traitement Cortext Manager)

4. Le h-index est un indicateur d'impact des publications d'une entité (chercheur, organisme...) égal au **nombre h de ses publications qui ont reçu au moins h citations chacune** : un h-index de 117 signifie que 117 publications CCUS du CNRS ont chacune été citées au moins 117 fois, ce qui montre qu'au moins 10% des papiers sont abondamment repris dans la littérature scientifique.

D'autres articles du CNRS, antérieurs à 2015, ont également été très cités. C'est le cas en particulier d'un article de 2012 cosigné par C. Costentin, S. Drouet, M. Robert et J-M. Savéant (Laboratoire d'Electrochimie Moléculaire de Paris Diderot) portant sur l'électroréduction du CO₂ en CO en présence d'un catalyseur à base de fer⁵ (1 150 citations reçues), ou encore d'un article impliquant E. Oelkers (GET, ex LMTG, Toulouse) paru en 2008 sur la carbonatation minérale du CO₂⁶ (756 citations).

LES BREVETS TECHNOLOGIQUES

Plus de 18 000 demandes de protection de nouvelles inventions relatives au CCUS (comptabilisées en familles de brevets) sont répertoriées dans le monde entre 2005 et 2021⁷. Après une phase de progression du nombre de demandes de brevets au niveau mondial entre 2005 et 2011 (nombre de demandes multiplié par deux), on observe un ralentissement puis une stagnation des demandes pendant quelques années, avant une reprise amorcée vers la fin des années 2010

et qui se poursuit depuis (Figure 9). Le pic observé au début des années 2010 a été identifié comme étant produit par les applications du CO₂ pour la récupération assistée de pétrole (EOR), en miroir de ce que l'on observe pour les publications scientifiques. Il est suivi d'une période plus stable, avant une reprise liée à un regain d'intérêt pour ces technologies, davantage porté par les pays asiatiques à la fin de la décennie. Les demandes de brevets concernent avant tout les technologies de captage et de valorisation du CO₂, qui représentent 75% des demandes de protection, alors que les briques stockage et transport restent très peu protégées.



Le CNRS contribue de façon majeure à la recherche scientifique française du domaine.

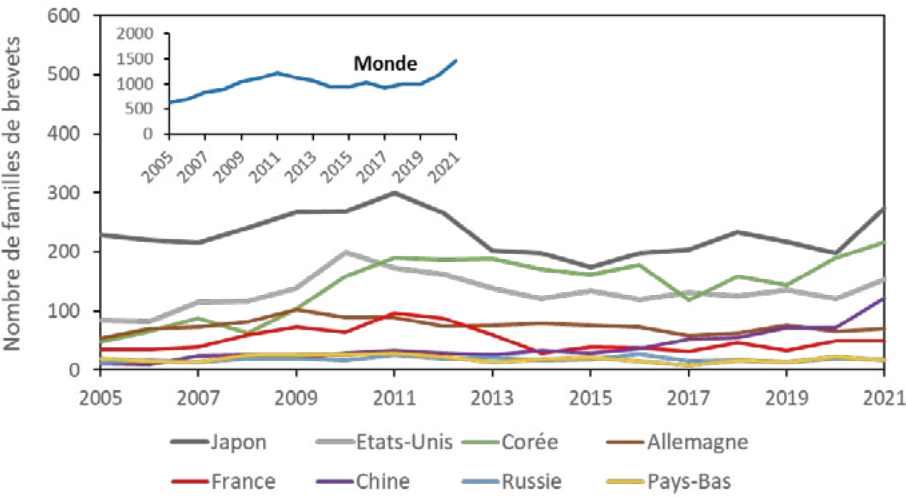


Figure 9 : Nombre de documents liés aux dépôts de brevets

(données base Questel, traitées par VIA INNO puis CNRS)

5. "A Local Proton Source Enhances CO₂ Electroreduction to CO by a Molecular Fe Catalyst", Science 338(6103):90-94 (2012)
6. "Mineral Carbonation of CO₂", Elements 4(5):433-437 (2008)
7. Familles de brevets pris dans le monde. Une restriction est faite sur les brevets pris en Chine qui doivent faire l'objet d'une extension internationale pour être considérés dans le décompte présenté dans cette étude.

Avec quelque 900 demandes de protection dans le monde, les déposants français placent notre pays au 6^{ème} rang mondial sur cette période (5% des demandes de brevets), derrière l'Allemagne (7,3%) et loin devant les Pays-Bas (1,8%)⁸. Les trois principaux déposants français sont Air Liquide (plus d'un tiers des brevets), puis Alstom Technology (20%) et IFPEN (15%). Viennent ensuite TotalEnergies, le CNRS et le CEA.

Au total, près de 280 demandes de brevets sur le thème CCUS ont été émises par le CNRS entre 2005 et 2024 dans les différents offices de propriété intellectuelle existants dans le monde⁹. Ces demandes se répartissent dans 73 familles d'inventions, ce qui correspond au nombre réel d'inventions distinctes dans lesquelles le CNRS a été impliqué¹⁰. La plupart font l'objet d'une demande de protection étendue dans plusieurs pays ou zones du monde (demandes de brevets EP ou demande de brevets PCT, extension vers les grands offices mondiaux, souvent aux États-Unis, parfois au Japon ou en Chine).

Ces brevets concernent en premier lieu des inventions relatives au captage du CO₂ (absorption, adsorption, membranes, procédé cryogénique...). Quelques-uns s'appliquent plus spécifiquement au stockage et on observe plus récemment des demandes d'inventions davantage orientées vers la valorisation du CO₂, notamment sa réduction pour différentes applications.

Les demandes du CNRS sont rarement déposées par le CNRS seul (14% des familles) mais très majoritairement avec des co-déposants. Pour un quart des brevets, il s'agit d'une entreprise, et généralement d'une grande entreprise (TotalEnergies, Air Liquide, Vicat, Lafarge Holcim, EDF, Syensqo), mais les co-déposants sont le plus souvent des établissements publics français (IFPEN, INRAE, BRGM, universités ou écoles).

Enfin, si l'on s'intéresse au devenir de ces demandes de protection (informations recensées dans la base de données VEGA de CNRS Innovation), on constate que près d'une cinquantaine de familles font encore aujourd'hui l'objet d'une protection intellectuelle, mais que peu d'entre elles sont pour l'instant exploitées. Une dizaine de brevets ont fait l'objet d'un transfert de technologie vers des PME ou des startups, mais peu de revenus ont été générés pour l'instant (15 000 €) au regard des frais totaux de propriété intellectuelle qui s'élèvent à 1,15 M€ (entretien des brevets et rachat de droits, en particulier pour les brevets relatifs aux MOFs). On observe toutefois que les contrats actuels sont encore assez récents (pour la plupart conclus depuis 2021), et que des revenus supplémentaires pourraient être générés par des mises sur le marché de futurs produits.

8. La comparaison des nombres de brevets doit être considérée avec prudence. Sont intégrés ici des demandes faites dans des offices de brevets à travers le monde qui n'ont pas tous les mêmes règles de soumission. Certains offices, notamment en Asie sont réputés moins stricts dans leurs critères de sélection que dans les offices des pays occidentaux, par exemple l'Office Européen des Brevets (OEB).

9. Demandes de brevets avec le CNRS identifiées parmi les déposants et recensées dans la base Espacenet, base publique de l'OEB. Notons que l'implication réelle du CNRS dans l'activité inventive de la France est supérieure à ces chiffres qui n'intègrent que les brevets pour lesquels le CNRS est déposant. Le CNRS contribue aussi à la production d'invention par ses chercheurs mentionnés comme inventeurs dans des brevets où le CNRS n'est pas déposant. Des travaux académiques récents (Neuhäusler, P., Frietsch, R., 2024. RISIS Datasets — Academic Patents in Europe (doi : 10.5281/zenodo.13837760)) ont montré que l'implication réelle d'un établissement d'enseignement supérieur dans l'activité inventive est en moyenne deux fois supérieure à celle mesurée sur la seule base des déposants.

10. Les demandes de brevets sont regroupées en familles élargies (familles INPADOC) dans Espacenet.

PRÉMATURATION, MATURATION ET STARTUPS

L'accompagnement du CNRS en matière d'innovation et de transfert technologique est relativement récent. Longtemps centré sur la recherche fondamentale non valorisée, le CNRS a progressivement proposé des outils structurants pour couvrir toute la chaîne de valeur de l'innovation. Ce tournant s'est notamment concrétisé par le lancement du programme RISE d'accompagnement à la création de startup en 2019 et par la montée en puissance des actions menées par CNRS Innovation et les SATT. Contrairement au CEA qui dispose d'une organisation plus intégrée avec ses propres plateformes technologiques, unités de développement et canaux de transfert, le CNRS s'appuie sur un réseau de laboratoires académiques et de partenaires de valorisation répartis sur tout le territoire, avec une forte insertion dans les écosystèmes locaux d'innovation. Malgré ces outils, les scientifiques impliqués dans le CCUS soulignent les difficultés à monter ou à participer à des projets de transfert technologique, en raison d'un manque de sites pilotes (par exemple pour le stockage) et de démonstrateurs.

Depuis 2020, deux projets de prématurisation ont été soutenus par le CNRS, pour un investissement cumulé d'environ 275 k€, et 20 projets de maturation issus d'UMR CNRS ont été financés par les SATT depuis 2013, pour un montant total de **4,64 M€**, afin d'accompagner les TRL intermédiaires (3 à 6). Ces projets portent essentiellement sur la valorisation du CO₂, seuls trois projets concernent son captage et aucun n'aborde le stockage.

Le CNRS, par sa production de connaissances, le dépôt de brevets et ses dispositifs d'innovation, a également contribué à la création ou à la consolidation de huit startups issues ou adossées à des laboratoires CNRS depuis 2018. Bien que très récentes, certaines sont déjà très prometteuses ou ont atteint dès à présent le statut de PME.



Les scientifiques impliqués dans le CCUS soulignent les difficultés à monter ou à participer à des projets de transfert technologique, en raison d'un manque de sites pilotes et de démonstrateurs.

PARMI LES EXEMPLES LES PLUS MARQUANTS, ON PEUT CITER LES STARTUPS SUIVANTES, AVEC LEUR ANNÉE DE CRÉATION ET LEUR LABORATOIRE D'ORIGINE :

- **MECAWARE** (2020, ICBMS et ISM2 ; phase de déploiement) utilise le CO₂ pour extraire sélectivement les métaux critiques contenus dans les batteries usagées, en vue de leur réutilisation industrielle sous forme de carbonates, grâce à un procédé hydrométallurgique novateur permettant d'atteindre des niveaux de rendement et de pureté très élevés. Ce procédé vert, unique au monde, repose sur la valorisation de CO₂ capté et répond à deux problématiques environnementales : la réduction des émissions de CO₂ et le recyclage de matériaux stratégiques.
- **ENERGO** (2018, IPCM ; phase de développement) a mis au point une technologie de plasma-catalyse pour convertir des gaz en molécules d'intérêt de manière plus rapide, plus économique et plus écologique. Ce procédé, appliqué à la méthanation du CO₂, permet de produire du gaz renouvelable à un coût inférieur de 40% à celui des approches conventionnelles. Compact et modulaire, leur dispositif peut être déployé au plus près de la source de CO₂, en pratique du biogaz issu de déchets agricoles, avec pour perspective la production de e-carburants destinés à l'approvisionnement d'aéroports à proximité.

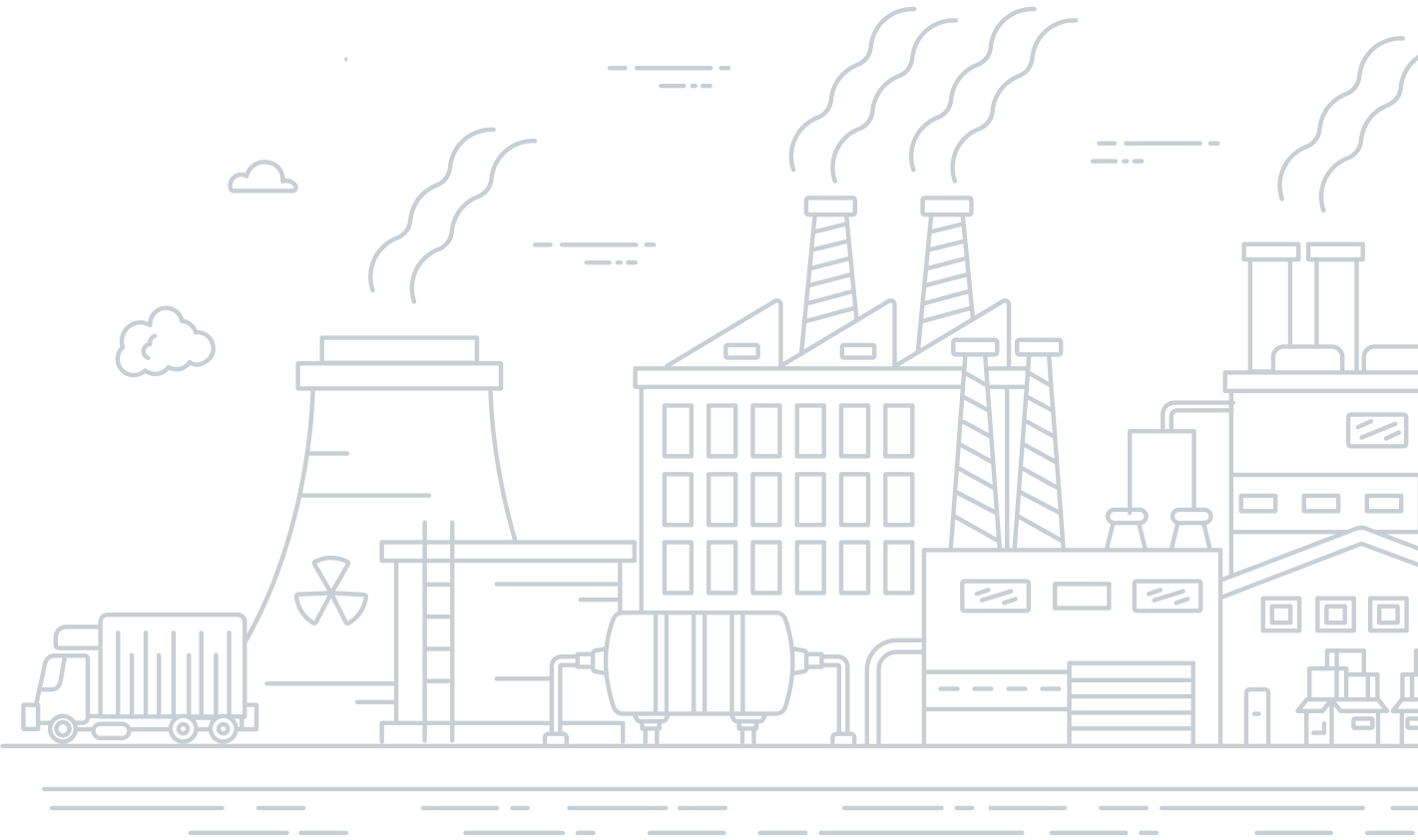
- **NETCARBON** (2022, CESBIO ; phase de déploiement) mesure et améliore le stockage du carbone, en particulier dans les milieux urbains et ruraux. La startup utilise une plateforme SaaS (Software as a Service) innovante fondée sur des données satellitaires et l'intelligence artificielle pour simuler l'impact environnemental de projets de développement ou de renaturation, à partir d'indicateurs tels que les îlots de chaleur, les stocks de carbone, la biodiversité et la perméabilité des sols. Cette approche permet à ses clients de concevoir des projets plus durables, de certifier leurs actions via des crédits carbone ou des labels reconnus, et d'en communiquer plus facilement les résultats.
- **DIOXYCLE** (2020, CRPP ; phase de développement) met au point un électrolyseur modulaire alimenté par de l'électricité renouvelable, qui transforme du CO₂ ou du CO en éthylène composé uniquement de carbone recyclé, en substitution de l'éthylène d'origine fossile largement utilisé dans l'industrie chimique.

D'autres startups issues des laboratoires du CNRS sont à un stade plus précoce, comme **CARBONEO** (2020, LEM) qui développe des électrodes très stables dans le temps pour l'électrolyse du CO₂, à partir de métaux abondants comme le fer et le cobalt.

FORMATION

Les laboratoires du CNRS et de ses partenaires attirent et forment en thèse des étudiants du monde entier sur les différentes facettes du CCUS. Ainsi, près de 115 thèses ont été soutenues en France sur cette thématique depuis 2006, tous établissements confondus et pas uniquement dans les laboratoires CNRS (source : *theses.fr*).

Outre la participation des scientifiques aux formations initiales, le CNRS propose des formations continues pour les professionnels sur diverses thématiques. S'il n'existe pas de formation spécifiquement dédiée au CCUS, contrairement à celles délivrées par IFPEN et le BRGM, deux formations en lien plus direct avec ce domaine sont proposées : « Adsorption gazeuse et applications : caractérisation des matériaux et séparation ou stockage des gaz » (conçue par le laboratoire Madirel à Marseille) et « Les bases de la catalyse hétérogène » (conçue par l'IC2MP à Poitiers).



CIRCULATION des connaissances et intermédiaires

Le positionnement des acteurs intermédiaires du CCUS s'est construit au rythme des évolutions des politiques publiques, entre phases d'attentisme et de relance. Les activités dans ce domaine ont connu une première accélération en 2015 avec l'Accord de Paris sur le climat (COP21), aussi bien pour les grands industriels, l'État français et l'Europe.

Pour donner suite à la signature de cet accord, la plupart des grandes entreprises se sont dotées d'une feuille de route « décarbonation » en vue d'une neutralité carbone en 2050. Le deuxième coup d'accélérateur est venu de la loi *Inflation Reduction Act* (IRA), adoptée sous la présidence de Joe Biden en 2022, qui a défini une série de mesures relatives à la transition énergétique, dont une définition légale des crédits carbone américains. Cela a enclenché la mise en place de hubs consacrés à l'hydrogène et au stockage du CO₂. Toute une dynamique internationale a suivi, aux États-Unis comme en Europe, au niveau des instances politiques, des industriels, des startups et des acteurs

académiques. Aujourd'hui, « *les grands industriels de la chimie sont dans l'attente de la fin de la politique favorisant les ressources fossiles du Président Trump mais aussi d'un modèle économique stable* » (Régis Réau, Air Liquide). Dans ce contexte, la Commission européenne a adopté en mars 2026 une proposition législative, l'*Industrial Accelerator Act* (IAA), visant à accroître la demande de technologies et de produits à faible intensité de carbone fabriqués en Europe. Ces évolutions successives ont conduit les intermédiaires du CCUS à se structurer progressivement, selon des rythmes différents.

LES INSTITUTIONS POLITIQUES NATIONALES ET EUROPÉENNES

En réponse à l'Accord de Paris de 2015, le Pacte Vert européen vise à atteindre la neutralité carbone de l'Europe d'ici à 2050. Il ambitionne de réduire d'ici 2030 les émissions de CO₂ d'au moins 50% par rapport à 1990 (et si possible 55%) et de rendre juridiquement contraignant l'objectif de neutralité à l'horizon 2050 au moyen de la loi européenne sur le climat, une loi qui se veut économiquement viable et socialement équitable. L'Europe s'est ainsi dotée d'une série d'outils réglementaires et financiers. Un des principaux leviers incitatifs pour les entreprises mis en place par l'Europe s'appuie sur le paquet législatif « *Fit for 55* » qui comprend, entre autres, les révisions de partage de l'effort (Effort Sharing Regulation, directive UE 2023/857) et du marché carbone ETS-EU (Emissions Trading System in the European Union, directive UE 2003/87/EC puis UE 2023/959). Ce marché correspond à un système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (SEQUE-UE)22 et s'appuie sur un plafonnement dégressif avec le temps du volume total de quotas, applicable aux secteurs de l'énergie, de certaines industries (sidérurgie, BTP...) de l'aviation et du transport maritime, responsables d'environ 40% des émissions totales de l'Union européenne. Depuis son lancement en 2005, le SEQUE-UE a contribué, au sein de son périmètre, à réduire les émissions de GES à hauteur de 46% (source : *Commission de régulation de l'Énergie*).

En outre, la Commission européenne a publié en février 2024 une stratégie industrielle du carbone à l'horizon 2030 et 2050, qui entérine la nécessité de déployer le CCUS pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Cette orientation a ensuite été déclinée au niveau réglementaire en juin 2024 par le *Net-Zero Industry Act* (NZIA), avec pour objectif de capter et stocker 50 MtCO₂/an en Europe. Enfin, la Commission européenne régit l'usage des énergies

durables, et notamment des e-carburants dans les transports aériens et maritimes. La directive RED II révisée impose ainsi dès 2030 l'incorporation d'au moins 1% de carburants durables d'origine non biologique dans les transports. Les initiatives ReFuelEU Aviation et FuelEU Maritime fixent des perspectives jusqu'en 2050 avec des quotas d'incorporation spécifiques : dans le secteur aérien, 20% de carburants durables dès 2035, dont 5% de e-carburants biosourcés, pour atteindre 70% en 2050 dont 35% de e-carburants ; dans le secteur maritime, l'objectif est d'incorporer un minimum de 2% d'e-carburants dès 2034. Par ailleurs, l'Europe finance la filière CCUS à travers le programme-cadre pour les aspects relevant de la R&D et mobilise le Fonds pour l'Innovation, financé par la vente de quotas de CO₂ issus du SEQUE-UE, pour accompagner les projets industriels innovants à forte valeur environnementale et favoriser le déploiement de technologies à faible émission de carbone, en particulier les innovations de rupture contribuant à la décarbonation des secteurs les plus émetteurs. Les entreprises françaises ont ainsi bénéficié de 527 M€ de ce fonds depuis 2021.

La déclinaison française du Pacte Vert, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), propose une feuille de route fondée sur la sobriété et l'efficacité énergétiques, le développement des sources renouvelables d'énergie et l'électrification des usages (voir Figure 10 page suivante). Dans ce cadre, une trajectoire est définie pour chaque secteur de l'économie, en particulier pour l'industrie (Figure 11). Si la France a longtemps mis l'accent sur la décarbonation par l'électricité bas carbone et l'efficacité énergétique (notamment grâce à son parc nucléaire) plutôt que sur le CCS et le CCU, la nécessité de déployer ces solutions est maintenant clairement affirmée pour réduire les émissions de CO₂ de l'industrie (actuellement de 63 Mt) de 68% d'ici 2030 par rapport à 1990 (45 Mt comparé à 140 Mt), puis de 97% d'ici 2050 (4 Mt).

Le cadre de déploiement qui vise à fournir aux acteurs une visibilité financière et réglementaire a été fixé de la façon suivante (DGE, 2024) :

- 1

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
- 2

PHASE 2 (2030-2040) :

le développement de stockages souverains et les évolutions réglementaires permettraient de capter entre 12 à 20 MtCO₂/an à l'horizon 2040
- 3

PHASE 3 (2040-2050) :

les quantités de CO₂ captées pourraient atteindre 30 à 50 Mt/an

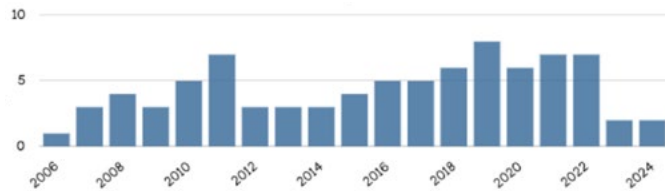
Notons par ailleurs que les besoins de conversion du CO₂ en e-SAF sont d'environ 15 MtCO₂/an pour répondre aux réglementations ReFuelEU Aviation et FuelEU Maritime.



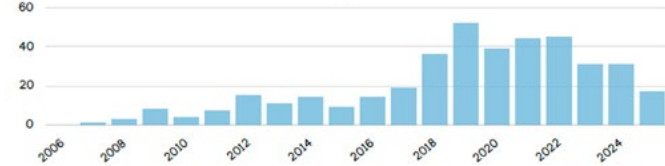
Les auteurs les plus cités sont Éric H. Oelkers (stockage du CO₂) et Philippe Ciais (cycle du CO₂). La plupart de ces policy documents sont produits par l'ONU et les agences onusiennes, l'Union européenne (Publication Office), mais aussi par la Banque mondiale et l'OCDE. Ils concernent principalement l'ODD13 relatif à la lutte contre le changement climatique. Certains policy documents émanent également de sources nationales, en particulier des services gouvernementaux espagnols, américains, allemands et suisses, et traitent de la décarbonation, du stockage de CO₂ ou d'émissions négatives. Ces documents sont eux-mêmes repris dans 24 084 policy documents de 1 209 sources différentes et 117 pays, ce qui démontre une large dissémination politique d'éléments factuels et/ou scientifiques. En France, l'influence passe moins par la citation directe des publications scientifiques que par la reprise de ces policy documents intermédiaires, avec 912 documents recensés. Ceux-ci sont référencés principalement par des think tanks et des ONG ayant leur siège en France, plus marginalement par des ministères, l'ADEME, le Haut Conseil pour le Climat, l'ANSES, l'OPECST, mais dans des documents portant sur des sujets beaucoup plus vastes que le CCUS.

En résumé, il a fallu plus de 10 ans pour stabiliser une position politique sur le CCUS, en France et en Europe. Ces années de Stop and Go (« On est passés d'une philosophie 'Peut-être' sur le CCUS à une philosophie 'Il faut', pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 » Hoang Bui, SGPI) ont clairement freiné la mise en œuvre des feuilles de route industrielles et par voie de conséquence les déploiements des innovations, qu'elles soient de rupture ou même incrémentales, d'autant que les réflexions politiques ne se sont que rarement appuyées sur des éléments scientifiques. Ces hésitations politiques rendent les objectifs chiffrés de la stratégie nationale difficilement atteignables dans les délais impartis.

Années de publication des articles scientifiques



Années de publication des policy documents



Années de publication des policy documents citant eux-mêmes des policy documents

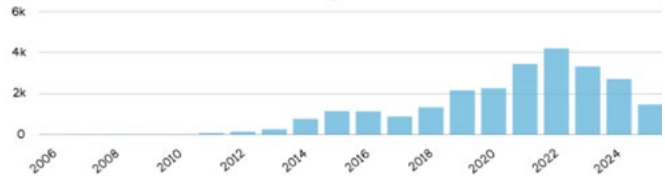


Figure 12 : Références aux publications scientifiques dans les policy documents. Le diagramme du haut présente les dates de parution des publications scientifiques du CNRS sur CCUS citées dans les policy documents, le diagramme du milieu indique l'évolution du nombre annuel de policy documents citant ces publications tandis que celui du bas indique l'évolution du nombre annuel de policy documents citant ces policy documents. (source : Overton)

LES INVESTISSEURS PUBLICS ET PRIVÉS

En France, en dehors des acteurs publics, une centaine de Fonds d'Investissements sont labellisés Greenfin (anciennement TEEC, label français de l'AFNOR), ce qui permet d'assurer aux investisseurs que les produits financiers contribuent effectivement au financement de la transition énergétique et écologique. Ils peuvent s'appuyer sur la taxonomie verte européenne, un cadre officiel qui permet de mesurer et de rendre transparente la part «verte» des activités d'une entreprise ou d'un produit financier selon plusieurs critères :

- **l'atténuation** du changement climatique ;
- **l'adaptation** au changement climatique ;
- **l'utilisation durable** et la protection des ressources aquatiques et marines ;
- **la transition** vers une économie circulaire ;
- **la prévention** et la réduction de la pollution ;
- **et enfin la protection** et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes.

Cette norme permet de quantifier l'impact des entreprises en fournissant des indicateurs et un suivi, à condition qu'elles fournissent des données précises, réalisent des bilans carbone et analysent les cycles de vie à long terme (en faisant des hypothèses pour les entreprises à bas TRL). Il n'existe pas de label propre au CCUS, et encore moins d'investisseurs spécifiques.

Les investisseurs sont un levier essentiel de la montée en TRL des projets. Ils peuvent financer des projets allant du laboratoire à l'entrée en bourse. Le CCUS pose cependant de multiples questions liées à la maturité scientifique et technologique des projets, au rendement financier à court et moyen terme, mais aussi à leur efficacité écologique réelle et à l'image de cette filière auprès du grand public. Enfin, aucun investisseur ne finance l'ensemble de la chaîne de valeur CCUS. D'une part les acteurs sont trop nombreux, différents et chacun dépend des autres ; d'autre part le modèle économique global n'est pas stabilisé et reste risqué en raison de la volatilité du prix du CO₂ et des attermolements politiques et réglementaires.



Il a fallu plus de 10 ans pour stabiliser une position politique sur le CCUS, en France et en Europe. Ces années de Stop and Go ont clairement freiné la mise en œuvre des feuilles de route industrielles et par voie de conséquence les déploiements des innovations.

POUR ATTEINDRE SES OBJECTIFS DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS DE CO₂ ET RÉPONDRE AUX DÉFIS PRÉCÉDEMMENT CITÉS, L'ÉTAT A MIS EN PLACE DES OUTILS DE FINANCEMENT ET D'ACCOMPAGNEMENT DES ACTEURS À DIFFÉRENTS NIVEAUX, DONT LES PRINCIPAUX SONT MENTIONNÉS CI-DESSOUS :

- **LE PEPR**, pour promouvoir la recherche (TRL 1-4).
- **L'APPEL À PROJETS DEMIBAC** développement de briques technologiques et de démonstrateurs) soutient des projets d'innovation d'entreprises qui accélèrent la mise sur le marché de technologies ou de solutions durables pour décarboner l'industrie, depuis les phases de recherche industrielle jusqu'à la démonstration.
- **L'APPEL À PROJETS IBAC PME** vise à développer des briques technologiques et des services pour la décarbonation de l'industrie, en ciblant tout particulièrement les PME.
- **L'APPEL D'OFFRE « GRANDS PROJETS INDUSTRIELS DE DÉCARBONATION »** (GPID) s'adresse aux industriels soumis au système ETS. La première vague de lauréats a été dévoilée en février 2026, avec notamment trois projets de captage de CO₂ dans des cimenteries et un projet dans l'industrie de l'aluminium.

• **LE DISPOSITIF « ZONES INDUSTRIELLES BAS CARBONE »** (ZIBaC) aide le

développement d'infrastructures mutualisées nécessaires à la décarbonation (y compris le CCUS) en finançant des études mutualisées sur des zones particulièrement émettrices et favoriser ainsi l'élaboration de trajectoires de décarbonation à l'échelle d'une zone géographique. Ainsi, les dix zones industrielles financées représentent 70% du CO₂ industriel émis en France.

• **LA MISE EN OEUVRE DE "CONTRATS CARBONE POUR DIFFÉRENCE"** (CCfD)

à l'échelle des États européens vise à offrir aux entreprises engagées dans la décarbonation une protection contre les incertitudes liées au prix du carbone. Le principe est de compenser la différence entre le prix du CO₂ observé sur le marché et un prix de référence correspondant au coût du CO₂ évité ou éliminé (par exemple dans le cas du CCS). Une autre modalité, actuellement en cours de réflexion en France, consisterait à fixer a priori l'évolution du prix du CO₂ sur les prochaines années. Cette voie permettrait à l'Etat de ne pas geler des fonds conséquents pour prévenir les fluctuations du prix du CO₂.



Notons que l'État français n'a pas souhaité à ce jour jouer un rôle direct dans le développement d'infrastructures, comme les pipelines, qui pourraient alors être un bien partagé.

L'État français agit également par l'intermédiaire de la Banque Publique d'Investissement, (Bpifrance), qui finance et accompagne les entreprises en crédit, garantie, aide à l'innovation et fonds propres. En tant qu'opérateur de France 2030, Bpifrance agit en appui et en concertation avec les politiques publiques conduites par l'État. Ainsi les appels à projets i-Lab (pour la création d'entreprises innovantes) et i-Demo (pour soutenir notamment des démonstrateurs à l'échelle industrielle ou préindustrielle d'innovation) comptent déjà de premiers projets lauréats relevant de la filière CCUS. En tant que membre du Club Corporate Venture Capital de France Invest (association professionnelle des acteurs du capital-investissement, de la dette et de l'infrastructure, qui déploie ses ressources pour rendre plus robustes les startups, PME et ETI françaises), Bpifrance oeuvre pour embarquer les industriels et les banques privées dans le partage du risque. Néanmoins, de façon générale, les TRL 5 à 8 sont encore mal couverts par les financements publics.

La méfiance légitime des investisseurs engagés dans le financement de la transition énergétique et écologique vis-à-vis du CCUS tient au fait que cette filière peut apparaître comme une forme de technosolutionnisme. Les carburants e-SAF pour l'aviation peuvent ainsi être perçus comme un déplacement, voire une fuite en avant, des émissions de CO₂ dues au transport aérien. Le stockage onshore, en plus des questions techniques liées aux risques de fuite et aux risques sismiques, peut entraîner une perte d'emploi par rapport à l'exploitation productive de sites géologiques, comme dans le cas de Lacq. Ces interrogations des investisseurs rejoignent donc les retours des discussions avec la société civile. Comparé au captage de CO₂ en sortie

de cheminées d'usine, le DAC peut apparaître plus vertueux et prometteur (pas d'utilisation de métaux rares, pas de rejet énergétique, plus performant) en dépit d'une consommation énergétique plus élevée, et donc plus séduisant aux yeux de certains investisseurs.

D'une façon générale, les investisseurs français prennent moins de risques que leurs homologues américains. Le potentiel de commercialisation constitue un critère primordial, au même titre que la qualité de l'équipe et la solidité du modèle économique. Il est relativement difficile de trouver des financements pour des technologies de rupture, d'autant que les investisseurs, en dehors des acteurs publics, s'appuient peu sur l'expertise scientifique pour objectiver leurs décisions. Ils préfèrent financer des démonstrateurs et des projets de TRL élevés, donc moins risqués.

LES SECTEURS INDUSTRIELS ÉMETTEURS DE CO₂

En 2024, l'industrie française (industrie manufacturière, construction/BTP, métallurgie) reste le troisième secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre derrière le transport et l'agriculture, avec 62,4 MtCO₂, soit 16,9% des émissions nationales. Les principaux secteurs pollueurs sont la sidérurgie, la production d'aluminium, l'industrie chimique et les cimenteries. En raison du mix électrique fortement décarboné de la France, le secteur de l'énergie a une part faible (12%). Si les émissions industrielles ont diminué régulièrement depuis les années 1990 (-60%), cette tendance doit être souvent mise au compte de la baisse de production et non à celui de transformations structurelles des procédés industriels. Les avancées concrètes restent inégales selon les secteurs mais certains industriels, en particulier les cimentiers, amorcent aujourd'hui des démarches concrètes en vue de décarboner en profondeur leurs activités.

Les principaux émetteurs se concentrent dans les bassins industriels autour de Dunkerque, de Fos-sur-Mer, de la zone Rouen-Le Havre et dans la région Grand-Est. Avec 20% des émissions de l'industrie française, ArcelorMittal est le principal émetteur de CO₂ (Dunkerque et Fos-sur-Mer). Viennent ensuite des sites de l'industrie chimique (Naphtachimie et Lyondell-Basell, avec leurs sites dans les Bouches-du-Rhône ou encore le site de Gonfreville de TotalEnergies en Seine Maritime) et des cimentiers (Lafarge Holcim Ciments en Mayenne, Ciment Calcia dans la Marne, LAT Nitrogen en Seine-et-Marne ou encore Vicat à Montalieu en Isère). Pour ces acteurs, le CCS ne s'impose qu'en dernier recours, en absence d'alternative crédible suffisante (électrification, efficacité énergétique, sobriété, amélioration des procédés...) pour éliminer le CO₂, dit « hard-to-abate ». Certains émetteurs s'intéressent également à la valorisation du CO₂ capté pour des biocarburants, pour des produits de l'industrie chimique, pour des matériaux innovants ou pour l'agroalimentaire. Outre les coûts financiers, les besoins en énergie et en ressources variées, certaines transformations, par exemple en e-carburants, requerront une certification de l'origine biosourcée de leur CO₂ qui remplacera progressivement le CO₂ d'origine fossile.

Pour l'heure, le secteur industriel en est plutôt au stade de projets d'unités pilotes CCS et en attente de décisions d'investissements (pas avant 2027-2028 pour les plus avancés). Le positionnement politique récent ainsi que les décisions d'accompagnement financier (Fonds Européen pour l'Innovation et appel d'offre GPID) laissent entrevoir un développement du CCS à moyen terme.

Secteur des cimentiers

Vingt cimenteries françaises comptent parmi les 50 sites industriels en France les plus émetteurs de CO₂. Le CCS est l'unique solution pour abattre les 23% de leurs émissions inévitables et atteindre une réduction de 50% des émissions d'ici 2030. L'industrie cimentière se prête bien au captage du fait de la forte concentration de CO₂ en sortie de préchauffeur (30%) qui rend l'opération relativement aisée. **La feuille de route de décarbonation du secteur cimentier repose sur deux types de leviers :**

- 1

LES LEVIERS TRADITIONNELS,
tels que la décarbonation de l'énergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique des sites, la substitution des combustibles fossiles (coke de pétrole...) par des déchets non recyclables (pneus, huiles usagées...), la réduction du taux de clinker dans les ciments ou son remplacement par des matériaux à plus faible empreinte carbone ;
- 2

LE LEVIER CCS, VOIRE CCU.
Le carbone capté à la cheminée des cimenteries provient de deux sources : d'une part le CO₂ inévitable issu du processus chimique de décarbonatation du calcaire ; d'autre part, le CO₂ issu de la combustion de déchets non recyclables contenant en partie de la biomasse. Entre 15% et 20% du carbone capté en cimenterie sera d'origine biogénique et pourra être valorisé, y compris en e-carburants.

Le cas de **Vicat**, dernier cimentier entièrement français, illustre l'investissement d'un acteur industriel dans tous les niveaux de décarbonation. Sa principale usine en France, à Montalieu (Isère) n'utilise quasiment

plus aujourd'hui de combustibles fossiles, remplacés par des déchets énergétiques divers. Les cendres de combustion sont intégrées au clinker. Le clinker lui-même mélangé à des argiles activées a permis de concevoir des nouveaux produits commercialisés depuis 2009 en particulier au Brésil, plus récemment en France et aux USA. Ces actions, tant sur les combustibles que sur la reformulation des produits à destination commerciale, sont aujourd'hui matures et le marché pour ces produits existe. Pour la capture des émissions incompressibles de CO₂, dans le cadre du projet Rhône Décarbonation, Vicat porte le projet VAIA (*Vicat Advanced Industrial Alliance*) de capture de 100% des émissions résiduelles de CO₂ à Montalieu en vue de son stockage à Ravenne (gisements de gaz épuisés de la mer Adriatique) après transport par un pipeline existant jusqu'à Fos-sur-Mer (opéré par SPSE) puis liquéfaction et stockage primaire à Fos (par Elengy) avant transport au site de stockage définitif (site d'ENI). La méthode de captation prévue combine une étape de capture en amont avec des amines et un procédé cryogénique tel que développé par exemple par Air Liquide. Pour valoriser son CO₂ en e-carburants, Vicat a pris des parts dans la société Genvia qui développe une électrolyse à haute température selon un procédé du CEA (utilisant la chaleur fatale des cimentiers).

Secteur de l'aluminium

La réduction des minerais d'aluminium est un des procédés les plus émetteurs de CO₂ pour lequel le captage de CO₂ n'est pas aisé, principalement en raison de la faible concentration de CO₂ rejeté dans les fumées (inférieur à 1%). L'un des défis est la mise au point d'un système de préconcentration du CO₂ avant captage par un procédé utilisant des amines adaptées aux caractéristiques des gaz issus des cuves d'électrolyse de l'aluminium.

Figurant parmi les leaders de la production d'aluminium bas carbone, Aluminium Dunkerque a jusqu'à présent concentré ses activités sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de ses procédés et l'augmentation des activités de recyclage de l'aluminium (2022-2026). Cet industriel se lance maintenant dans des projets de captage du CO₂ (2026-2030), tout en misant à horizon 2035 sur une technologie utilisant des anodes inertes pour éliminer les émissions directes de CO₂ lors de la réduction du minerai d'aluminium. Aluminium Dunkerque collabore avec les entreprises Fives, Trimet et Rio Tinto pour développer une solution de captage du CO₂ destinée à cette industrie (projet C4 Capture). Après des phases de validation et de prototypage, les partenaires ont débuté en janvier 2026 des tests pilotes en conditions réelles sur les sites de Dunkerque d'Aluminium Dunkerque et de Saint-Jean-de-Maurienne de Trimet.

Secteur de la sidérurgie

La sidérurgie est également un secteur très complexe à décarboner en raison de la multiplicité des effluents gazeux produits, dont les compositions dépendent des étapes du procédé : fumées de cokerie (H₂, CO, CH₄), gaz de hauts-fourneaux (CO, CO₂, N₂, H₂) et d'aciéries (CO, CO₂). Cette variété rend le respect des normes complexe. Les installations de captage de CO₂ ne seront viables que si leur usage se fait sur le long terme (en raison du coût élevé). Il est donc essentiel de stabiliser les sources de CO₂ avant toute installation. Ainsi, une électrification massive ferait chuter cette production. Après avoir reporté ses investissements de décarbonation sur son site de Dunkerque, ArcelorMittal a annoncé début 2026 un projet d'investissement dans un four électrique (1,3 Mds€ d'investissement dont 650 M€ financés par le groupe). ■■■

■■■ Un pilote industriel de captage de CO₂ dans les gaz de haut fourneau était opérationnel d’avril 2023 à 2024 sur le site d’ArcelorMittal à Dunkerque et visait à valider le procédé de captage DMX™ (solvant démixant aux amines), développé par IFPEN (projet opéré dans le cadre du projet européen H2020 « 3D » et du projet DinamX, soutenu par l’ADEME). Ce projet a respecté tous ses engagements initiaux et le procédé DMX est aujourd’hui une solution commerciale pour les industriels vendue par la filiale d’IFPEN, Axens.

Secteur de la chimie

Enfin, peu d’investissements ont été réellement engagés par les industriels de la chimie pour des projets de décarbonation profonde reposant sur des transformations structurelles des procédés industriels. Le projet Eco2Normandy, porté notamment par LAT Nitrogen au Grand-Quevilly et Yara au Havre, prévoit le captage et le stockage de CO₂ à horizon 2030.



Le développement du CCUS ne repose pas sur une filière déjà complètement intégrée, mais sur l’articulation encore en construction de technologies, d’infrastructures et de grandes entreprises aux logiques différentes.

LES ACTEURS INDUSTRIELS DES FILIÈRES CCS ET CCU

Cette partie examine les principaux maillons industriels des filières CCS et CCU, du captage du CO₂ à son transport, son stockage et sa valorisation, en mettant en évidence les acteurs qui se structurent sur chacun d’eux. Elle montre aussi que le développement du CCUS ne repose pas sur une filière déjà complètement intégrée, mais sur l’articulation encore en construction de technologies, d’infrastructures et de grandes entreprises aux logiques différentes.

Le captage du CO₂

Dans un grand nombre de cas, le captage du CO₂ peut se faire à la source même des émetteurs : il faut l’extraire des effluents gazeux de combustion industrielle ou de transformation de la biomasse. Le captage direct du CO₂ dans l’air ambiant (DAC) pose d’autres problèmes (voir la section *Innovateurs technologiques* en page 58). Les deux situations supposent en effet des solutions techniques différentes, essentiellement liées au niveau de concentration (qui est « seulement » de 400 ppm dans l’air) et à la pureté du CO₂ qu’elles visent. L’azote, l’oxygène et la vapeur d’eau sont les gaz qui accompagnent le plus souvent le CO₂, présent en général à environ 15% dans le mélange.

En France, le captage des fumées industrielles mobilise déjà quelques grandes entreprises bien identifiées, notamment Air Liquide pour les procédés cryogéniques, IFPEN, avec sa filiale Axens, pour les procédés à solvants aminés, Technip Energies reposant sur le système de captage de CO₂ CANSOLV® de Shell tandis que des acteurs plus récents comme Revcoo ou Cryopur explorent des approches plus ciblées de purification du CO₂.

A l’échelle industrielle, l’extraction du CO₂ contenu dans les fumées se fait le plus souvent par lavage à l’aide d’un solvant mixte, généralement des alcanolamines, qui va réagir sélectivement avec le CO₂ pour former des carbamates ou des carbonates. Le solvant une fois saturé peut être régénéré par chauffage, procédé qui libère le CO₂, et redirigé vers l’absorbeur. Une pureté supérieure à 98% est souvent atteinte avec ce procédé. L’utilisation de ces amines en solution est la technologie de captage du CO₂ la plus mature. Si elle a le mérite d’être efficace et éprouvée, son déploiement à grande échelle se heurte pourtant à un certain nombre de contraintes liées à son coût énergétique et à l’utilisation de grandes quantités d’alcanolamines et nitrosamines toxiques et corrosives. Une alternative consiste dans l’utilisation d’amines dites démixantes, présentant une séparation de phase liquide-liquide en solution aqueuse se produisant à des températures modérées. C’est la solution développée par IFPEN et proposée par Axens (voir plus loin les *Innovateurs technologiques*).

LE LAVAGE AUX AMINES CONSTITUE AUJOURD’HUI LA TECHNOLOGIE DE CAPTAGE À LA SOURCE LA PLUS MATURE ET LA PLUS COURAMMENT UTILISÉE. D’AUTRES SOLUTIONS, DE NIVEAUX DE MATURITÉ DIFFÉRENTS, MÉRITENT ÉGALEMENT D’ÊTRE MENTIONNÉES :

- **L’ADSORPTION SUR SOLIDE POREUX,** en particulier sur les MOFs.
- **LE CAPTAGE PAR VOIE CRYOGÉNIQUE :** les effluents gazeux sont transférés vers une unité cryogénique qui effectue une condensation partielle du CO₂. A la sortie de la boîte froide, le flux de CO₂ pur est comprimé jusqu’à atteindre un état

supercritique ou liquéfié, et stocké à l’état liquide. Cette méthode, mise en avant par des sociétés comme Air Liquide ou les startups Cryopur (spin-off de Mines Paris Tech et maintenant filière de la Française de l’Energie) et Revcoo, commence à se déployer (site de Port Jérôme pour Air Liquide mais aussi les projets de Eqiom, Lhoist et Vicat) mais reste cependant très sensible à la pureté chimique du CO₂ entrant (eau, oxydes de soufre et d’azote sont à proscrire).

- **LA FILTRATION SUR MEMBRANE SÉLECTIVE** qui offre des avantages en termes de simplicité d’utilisation et de facilité de montée en TRL, sous réserve de proposer un bon compromis entre perméabilité et sélectivité. Cette technique nécessite cependant des compressions (ou des dépressions) énergivores et reste sensible aux polluants.

- **LE CAPTAGE PAR CYCLE CALCIQUE :** le CO₂ est cette fois chimisorbé sur de la chaux vive (CaO) pour donner du calcaire (CaCO₃). Le calcaire peut ensuite être décarbonaté par chauffage, ce qui relibère le CO₂ et régénère la chaux vive.



Le transport du CO₂

Le transport du CO₂ est essentiel dans les stratégies CCUS puisqu'il est nécessaire, après captage, de faire parvenir le gaz au site de transformation ou de stockage à moyen ou long terme.

Des solutions plus en amont sont également à l'étude, en particulier des méthodes électrochimiques qui peuvent réduire considérablement les émissions associées au processus de relargage, sous réserve qu'elles soient alimentées par de l'électricité décarbonée. Ces systèmes reposent actuellement sur des molécules organiques (viologène) sensibles à l'oxygène et à la vapeur d'eau présents dans l'air, qu'il conviendra d'améliorer.

De nombreux laboratoires du CNRS sont engagés dans les recherches amont à faible TRL sur la plupart de ces sujets de captation (voir Annexe 2). Notons que les solides poreux de type MOF, dont plus de 100 000 structures ont déjà été décrites, sont l'objet de recherches particulièrement intensives au CNRS. Des plateformes de tests à haut débit ont ainsi été mises en place par l'IMAP en particulier. Un nouveau MOF, le Calgary Framework (CALF)-20 découvert par George Shimizu (Univ. Calgary), ouvre des perspectives car il réussit à piéger le CO₂ plus efficacement que l'eau. Produit par BASF en Europe, il a donné lieu à des brevets exploités par la société Svante (qui vient d'acquérir Carbon Alpha début mars 2026) pour le captage en sortie d'usine, dans le cadre d'un programme ambitieux fortement soutenu par l'État canadien depuis 2022. En Europe, des démonstrateurs ont été opérés (Dunkerque) ou sont en cours de déploiement (Brindisi...) par IFPEN et des acteurs industriels.

Le transport par canalisation est une solution déjà largement utilisée dans le monde pour d'autres applications. Qu'il soit terrestre ou sous-marin, cet acheminement se fait sous forme de CO₂ supercritique et ne présente pas de difficultés majeures. Quelques milliers de km de pipelines sont ainsi actuellement en service dans le monde, principalement aux États-Unis dans le cadre d'opérations de récupération assistée du pétrole. Depuis les années 1980, cette infrastructure a permis de transporter près de 50 MtCO₂ par an. La principale difficulté liée à ce maillon de la chaîne CCUS est le coût de mise en place de ces infrastructures pour le transport de très grandes quantités (estimation de 4 à 5 MtCO₂ d'ici 2032 pour le seul Dunkerquois), avec une complexité particulière liée au tracé en milieu habité. Un autre obstacle technique important est la sensibilité à la rupture des gazoducs liée aux propriétés particulières du fluide lorsqu'il est dans un état supercritique. S'y ajoutent les problèmes de corrosion associés à la pureté du gaz transporté. La présence concomitante d'oxygène, d'azote et de soufre conduit en effet à la formation d'oxydes qui, en présence de vapeur d'eau, forment un mélange d'acides, nitrique et sulfurique, particulièrement agressif pour les canalisations en acier. Ce point, peu étudié actuellement, pourrait être traité dans certaines unités CNRS spécialisées en corrosion (IJL Nancy, IRCP Paris, CIRIMAT Toulouse).

Le transport maritime peut être une alternative moins coûteuse et plus souple pour des longues distances ou un stockage offshore. Le CO₂ y est transporté en phase liquide à faible pression et basse température. Sa densité, supérieure à celle du méthane, permettrait

d'utiliser des cuves de « petit » volume et ainsi d'avoir recours à des navires de capacités plus « modestes » (10 à 30 000 m³ alors que les méthaniers jaugent 120 à 150 000 m³). Si le transport routier ou ferroviaire est techniquement faisable, ces moyens semblent peu pertinents, sauf à une échelle réduite.

Globalement, très peu de laboratoires CNRS sont impliqués dans des recherches en lien avec le transport du CO₂. En revanche, ce maillon commence à se structurer autour de quelques grands acteurs d'infrastructures de transport, de liquéfaction et d'export du CO₂ engagés dans les projets de hubs industriels, tels que NaTran, SPSE et Air Liquide pour le transport par canalisation, Elengy et Dunkerque LNG pour la liquéfaction, le stockage primaire et l'export. Plus largement, 15 entreprises ont manifesté leur intérêt pour des infrastructures de transport de CO₂ (réutilisation de canalisations existantes, développement de hubs d'export, flotte de camions...) dans le cadre d'un appel à manifestation d'intérêt en 2024 pour identifier les industriels intéressés par le développement de la chaîne de captage et de séquestration du carbone (CCS) en France dès 2025.

La valorisation du CO₂

Les usages du CO₂ se heurtent à une double difficulté thermodynamique et cinétique. Dans cette molécule, le carbone se trouve dans son état d'oxydation maximal, ce qui rend sa réduction thermodynamiquement coûteuse, tandis que son inertie induit des barrières d'activation élevées en l'absence de systèmes catalytiques adaptés. Le CO₂ est donc un substrat thermodynamiquement stable et chimiquement peu réactif, dont la valorisation nécessite un apport d'énergie, des catalyseurs ou des conditions réactionnelles spécifiques. Les produits obtenus sont ainsi coûteux à produire et requièrent d'importantes ressources en énergie et en hydrogène (donc en eau), l'énergie emmagasinée pouvant être en partie restituée plus tard, notamment lorsqu'il s'agit de e-fuels.

Les usages actuels du CO₂ sont de ce fait limités, tant en variété qu'en tonnage. La molécule peut être utilisée directement dans plusieurs secteurs comme l'agroalimentaire (conservation, refroidissement, extraction des arômes et de la caféine, carbonatation des boissons gazeuses, pour un total d'environ 600 kt/an en France), la production d'urée (300 kt/an), la métallurgie (protection lors du soudage et refroidissement cryogénique), l'horticulture (injection en serres) et d'autres usages de niche (environ 200 kt/an). On arrive ainsi à un total d'environ 1,1 Mt/an pour un marché français qui ne devrait pas évoluer significativement dans les prochaines années. Notons que près de 40% du CO₂ utilisé dans ces applications est issu de la production de bioéthanol ou de biogaz, 20% des raffineries et 17% de la production d'ammoniac. Il est très souvent transporté par camions sous forme liquide (*vide supra*).



Les perspectives les plus intéressantes concernant l'usage du CO₂ restent à développer à l'échelle industrielle. Il s'agit de boucler le cycle du carbone et donc de mettre fin à l'usage des ressources fossiles, en synthétisant à partir de ce gaz, des molécules et des produits qui, à plus ou moins long terme, se dégraderont en libérant à nouveau du CO₂. Pour être vertueux, ces cycles devront cependant s'appuyer sur de l'hydrogène vert et de l'électricité décarbonée mais aussi progressivement sur du CO₂ d'origine biogénique ou atmosphérique et non sur du CO₂ fossile dont la valorisation sera interdite à partir de 2041.

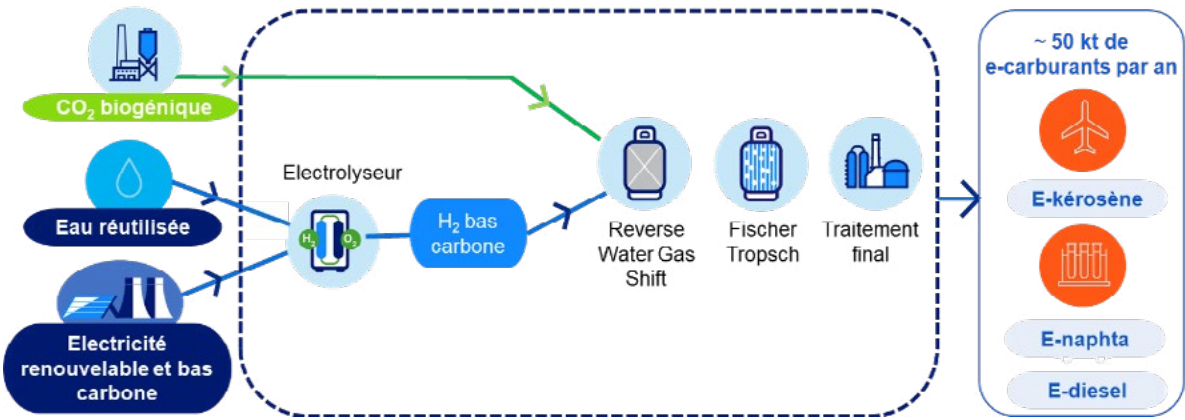
Les principaux débouchés industriels de la valorisation du CO₂ concernent aujourd'hui trois grands secteurs :

• **les carburants** avec la synthèse des e-carburants (e-fuels) et en particulier des SAF (Sustainable Aviation Fuel) et des carburants maritimes (diesel et méthanol), en s'appuyant sur des bioconversions (en particulier la réduction par des microalgues à croissance très rapide) ou des procédés de type Fischer-Tropsch.

Ainsi le projet Take Kair qui vise la construction et l'exploitation à Donges, sur le domaine portuaire de Saint-Nazaire, d'une usine de production de e-carburants à destination de l'aviation à l'horizon 2030, est en cours de consultation publique. Le projet a pour ambition de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, utilisé ensuite pour la réduction puis la conversion selon le procédé Fischer-Tropsch du CO₂ capté en sortie de cimenteries. Ce projet, correspondant à un investissement de 800 à 900 M€, est porté par Hynamics (filiale d'EDF) et RTE, tout en associant IFPEN, Axens, Air France-KLM et Holcim (Figure 13).

L'électroréduction du CO₂ peut également permettre de synthétiser des e-fuels, soit directement (alcools, hydrocarbures), soit indirectement en produisant des intermédiaires comme CO ou du méthanol. La recherche est très active sur ce front mais les problèmes liés à la sélectivité des réactions, le rendement énergétique et la stabilité des catalyseurs à grande échelle font que cette solution reste limitée à des TRL très amont et seules quelques startups issues des milieux académiques explorent cette voie.

Figure 13 : Le projet Take Kair (source : IFPEN)



• **la chimie de base** puisqu'un certain nombre de molécules simples peuvent être préparées par réduction du CO₂ (e-chemicals). Il s'agit surtout du méthane, du méthanol (pour lequel plusieurs usines pilotes et semi-industrielles existent déjà), de l'éthanol, de l'acide formique, de quelques oléfines (éthylène et propylène), de polymères et de gaz de synthèse. Les procédés requièrent en général une grande pureté du CO₂. Le marché mondial potentiel est important et de nombreux acteurs de la chimie et de l'énergie investissent ces voies de valorisation du CO₂ (Syensqo, Arkema, Tital, INEOS, BASF mais aussi IFPEN). Ainsi, le projet Hynovi mené par Vicat et Hynamics vise à produire du méthanol décarboné à partir du CO₂ capté en sortie de cheminée de la cimenterie de Montalieu et le projet eM-Rhône porté par Elyse, lauréat du Fonds européen pour l'Innovation (Innovation Fund), projette la production de e-méthanol en utilisant le CO₂ capté de l'usine Lafarge Holcim en Ardèche.

• **les matériaux de construction** avec l'utilisation et la fixation du CO₂ dans les matériaux de construction qui s'appuie sur la réaction du CO₂ avec des minéraux pour former des carbonates. Ces procédés plutôt matures (TRL 7-9), bien qu'encore très énergivores et parfois déjà industrialisés, consistent à stabiliser ou solidifier des déchets minéraux en granulats pour béton, y compris les granulats recyclés, pour la fabrication du ciment mais aussi pour la carbonatation directe des bétons, ce qui permet d'augmenter leur résistance mécanique et de réduire leur temps de cure. Ces voies de valorisation du CO₂ permettent non seulement un stockage du CO₂ à très long terme (>100 ans) mais ne nécessitent pas de CO₂ pur, les fumées d'usine étant parfois suffisantes.

Le potentiel de marché est très important et tous les grands cimentiers (Vicat, Lafarge Holcim, Heidelberg) développent déjà ces procédés à un niveau industriel. CO₂ Value Europe estime qu'environ 180 Mt de béton préfabriqué pourrait contenir du CO₂ en 2050.

Outre les procédés chimiques, différentes voies biologiques que nous n'aborderons pas ici sont également développées pour transformer le CO₂.

Le stockage du CO₂

À la différence du captage et de la valorisation du CO₂, le stockage repose sur un nombre relativement restreint d'acteurs industriels, disposant d'une expérience du sous-sol, de capacités de forage, d'un accès aux données géologiques et d'une aptitude à porter des projets sur le temps long propre au stockage géologique. En France, TotalEnergies occupe une place centrale, à la fois dans le cadre de partenariats industriels liés au stockage et via plusieurs chaires entre scientifiques et industriels, construites avec des laboratoires du CNRS ou avec IFPEN. À ses côtés, apparaissent aussi des acteurs plus spécialisés du sous-sol, des infrastructures ou de l'ingénierie, comme Geostock, Teréga, Vermilion ou Arverne, qui sont ainsi présents dans plusieurs études et projets liés au stockage. Cette brique du CCS implique donc une participation active et structurante de grandes entreprises ayant accès au sous-sol, assumant des prises de responsabilités sur le long terme et capables de coordonner industriels, pouvoirs publics et territoires.

Les enjeux majeurs ne sont d'ailleurs pas seulement techniques, car les procédés de forage et une partie des savoir-faire issus du pétrole, du gaz ou de la géothermie sont déjà bien établis. Les difficultés tiennent notamment au modèle économique des projets, au cadre réglementaire, à l'acceptabilité locale, ■■■

■■■ à l'état réel des anciens puits, à la disponibilité des infrastructures ou encore à la durée nécessaire pour qualifier puis mettre en exploitation un réservoir.

Pour répondre à ces enjeux, le développement de sites pilotes et de démonstrateurs apparaît aujourd'hui comme une étape décisive, en particulier pour les aquifères salins. En France, ce besoin s'est d'abord concrétisé avec le pilote de Lacq-Rousse, lancé par TotalEnergies. Entre 2010 et 2013, 51 kt de CO₂ ont été injectées dans l'ancien réservoir de gaz de Rousse, avec un suivi post-injection jusqu'en 2016 (la sismicité est encore suivie actuellement). Ce pilote n'a pas seulement démontré la faisabilité d'une chaîne intégrée de CCS, il a aussi permis de développer des méthodologies de qualification, de surveillance et de suivi, tout en alimentant un programme de recherche avec le monde académique. Malgré cela, il n'a pas débouché sur le développement d'un nouveau site pilote onshore en France et reste, à ce jour, la principale référence française en matière d'injection de CO₂ dans le sous-sol. L'abandon du projet PYCASSO en 2024 a montré combien le passage à grande échelle est difficile, à la fois en raison des incertitudes sur l'état des anciens gisements, des risques perçus, des conflits d'usage du sous-sol et des oppositions locales.

Face à ces difficultés, les industriels français se tournent de plus en plus vers des projets européens, le plus souvent offshore. À court terme, les principaux débouchés pour les émissions françaises de CO₂ se situent ainsi en mer du Nord et en Méditerranée : Northern Lights en Norvège, auquel participe TotalEnergies, et Ravenna CCS en Italie, porté par Eni et Snam, sont aujourd'hui les projets les plus structurants. D'autres initiatives, comme Aramis aux Pays-Bas

ou Prinos en Grèce, contribuent aussi à structurer cet espace européen du stockage. À ce stade, les projets actuels s'orientent donc surtout vers l'accès à des capacités de stockage situées hors du territoire.

Néanmoins l'Etat français s'inscrit aujourd'hui dans une perspective de stockage onshore mais aussi offshore dans les eaux territoriales, afin de répondre à des enjeux de souveraineté, de compétitivité et de réduction des coûts de transport. Publiée en 2025, l'étude EVASTOCO2 coordonnée par le BRGM et réalisée avec IFPEN, l'Université de Lorraine et des acteurs privés à la demande de la DGEC (2025), permet d'estimer les capacités théoriques de stockage de CO₂ en France et constitue un cadre de référence prospectif pour poursuivre les investigations ou initier des démonstrateurs. L'appel à manifestation d'intérêt lancée en 2024 a fait émerger 16 acteurs du sous-sol, parmi lesquels des producteurs d'hydrocarbures, des géothermiciens, et même des énergéticiens français souhaitant expérimenter l'injection de CO₂ dissous dans des aquifères salins à partir de centrales géothermiques, ainsi que 18 sociétés et bureaux d'étude spécialisés dans le sous-sol (études géologiques, campagnes sismiques, forages exploratoires, suivi et monitoring). Cette dynamique intéresse aussi des opérateurs du sous-sol confrontés à la perspective de la fin de l'exploitation des hydrocarbures en France à l'horizon 2040 (Loi Hulot adoptée en 2017), pour lesquels le stockage du CO₂ peut constituer une voie de reconversion. Un appel à projets sera prochainement lancé par le SGPI (AgiBAC) afin de mettre en place des démonstrateurs d'injection onshore, absolument essentiels aux futurs développements scientifiques et technologiques.

Dans ce contexte, la recherche joue un rôle important pour qualifier les sites, réduire les incertitudes et préparer d'éventuels démonstrateurs. Elle porte notamment sur la caractérisation des réservoirs, la modélisation de l'injection et du devenir du CO₂, ■■■

■■■ les interactions fluide-roche, la géochimie, la géomécanique, le monitoring et la définition de protocoles de surveillance sur le long terme et le traitement des données. Le CNRS occupe une place reconnue aux côtés du BRGM et d'IFPEN, notamment avec des UMR comme GeoRessources ou Géosciences Environnement Toulouse. Cette articulation apparaît notamment dans les chaires CO2ES, CARB3E ou CarMa, ainsi que dans le programme européen PilotSTRATEGY et dans le PEPR SPLEEN qui intègre le stockage géologique onshore, le monitoring long terme et les dimensions socio-techniques de son déploiement.

Les hubs régionaux français de CCUS

Pour capturer les 4 à 8 MtCO₂/an à partir de 2030, des projets de « hubs » industriels et portuaires sont à l'étude (voir le tableau ci-dessous). Il s'agit de prévoir des chaînes de valeur CCUS complètes dans les zones géographiques où se concentrent les principaux émetteurs : Dunkerque, le bassin rhodanien (projet Rhône Décarbonation), le Val de Loire Saint-Nazaire (projet GOCO2) et Seine-Le Havre. Tous ces projets, à l'étude dans le cadre des Zones Industrielles Bas Carbone (ZIBaC), ont en commun le stockage du CO₂ offshore hors de France (mer du Nord pour la façade atlantique et au large de Ravenne pour la Méditerranée) et nécessitent donc de prévoir l'acheminement du CO₂ des sites de production jusqu'aux ports.

Hub	DKarbonation (D'Artagnan, Kó, CALCC)	Rhône-Décarbonation	Axe Seine	GOCO ₂
Zone	Région de Dunkerque	Vallée du Rhône - Fos-sur-Mer	Rouen - Le Havre	Grand Ouest et Saint Nazaire
Principaux émetteurs	Lhoist (chaux) Eqiom (ciment)	Vicat (ciment)	TotalEnergies et ExxonMobil (raffinage) Yara (engrais) Borealis (Chimie)...	Lhoist (chaux) Heidelberg Materials, Lafarge Holcim Ciments (ciment)
Autres industriels impliqués (captage, transport, stockage)	Air Liquide, RTE, Dunkerque LNG	SPSE, Elengy, ENI	Air Liquide, Haropa Port, NaTran	RTE, NaTran, Elengy
Lieu de stockage final prévu	Mer du Nord (Norvège)	Mer Méditerranée (Ravenne-Italie)	Mer du Nord (Norvège ou Danemark)	Mer du Nord (Norvège)
Budget prévu	1,2 Mds€	1,5 Mds€	2,5 Mds€	2,5 Mds€
Infrastructures de transport	80 km de pipelines à construire	Pipelines existants ; quelques raccords à prévoir	Réseau de pipelines à construire des situés émetteurs jusqu'à la Seine	375 km de pipelines à construire
Objectifs de CO ₂ capté par an	1,5 Mt puis 4 Mt	1,2 Mt (avec VICAT seul puis 4Mt)	~7 Mt	2,6 Mt (2030) 4 Mt (2050)
Concertation publique CNDP	2023-2024	2025	-	2025

LES INNOVATEURS TECHNOLOGIQUES

Dans un domaine tel que le CCUS avec de fortes composantes technologiques, la transformation des résultats scientifiques en solutions industrielles s'opère principalement par l'intervention d'acteurs intermédiaires que l'on peut qualifier d'*innovateurs technologiques*. Leur rôle consiste à faire progresser des briques issues de la recherche académique vers des niveaux de maturité compatibles avec une intégration dans des procédés industriels complets. Comme le soulignent plusieurs sections du présent rapport, les avancées scientifiques du CNRS sont majoritairement situées sur des niveaux TRL bas ou intermédiaires (TRL 1 à 4). Pour devenir économiquement viables et déployables à grande échelle, les technologies de rupture nécessitent une montée en TRL progressive, qui s'inscrit dans des temporalités longues, de l'ordre de dix ans. Cette phase d'intégration et de montée en échelle n'est, en règle générale, pas assurée par les laboratoires académiques.

De plus, la recherche sur le CCUS ne s'est pas historiquement constituée comme une filière intégrée : elle s'est développée à partir de communautés disciplinaires fortes telles que la chimie des matériaux, la catalyse, l'électrochimie, le génie des procédés, la géologie ou encore les sciences sociales, chacune travaillant sur une partie de la chaîne. Cette organisation entraîne une fragmentation des approches et rend plus complexe la prise en compte de la chaîne de valeur dans son ensemble, en particulier lorsqu'il s'agit d'intégrer des contraintes d'ingénierie des procédés et d'économie industrielle. Les innovateurs technologiques assurent ainsi une fonction clé dans le transfert des connaissances scientifiques, et leur rôle est d'autant plus stratégique que les contraintes temporelles liées aux objectifs climatiques imposent une accélération de la montée en maturité de toute la chaîne.

Dans ce contexte, IFPEN occupe une position particulière. Dotée d'une forte culture de génie des procédés et d'ingénierie industrielle, il développe ses propres solutions de captage, notamment le procédé DMX basé sur des amines démixantes. Le développement technologique de ce procédé, engagé dès le début des années 2010, a suivi une trajectoire progressive : essais en laboratoire à très faible débit (de l'ordre du gramme par heure de CO₂), puis pilote (kg/h), avant la mise en place d'un démonstrateur à l'échelle de la tonne par heure. Le pilote permet d'étudier les performances globales du procédé et le vieillissement des solvants, tandis que le démonstrateur vise à établir les règles de conception à pleine échelle. Le démonstrateur DMX installé à Dunkerque entre 2019 et 2024 en partenariat avec ArcelorMittal s'inscrit dans cette logique : il a permis de tester le procédé en conditions industrielles réelles en sortie d'aciérie, avant une perspective de déploiement commercial via la filiale Axens d'IFPEN. Une autre filiale d'IFPEN, BEICIP développe également une activité de conseil sur le CCUS, par exemple sur l'identification de sites de stockage. Cette approche intégrée (développement interne, démonstration, puis commercialisation) distingue IFPEN du modèle académique classique, tel que celui du CNRS, dont les activités restent majoritairement positionnées sur l'amont scientifique.

De leur côté, les grandes entreprises industrielles développent souvent en interne les technologies au cœur de leur stratégie industrielle, et sollicitent la recherche académique davantage sur des sujets prospectifs, exploratoires ou complémentaires. Cette répartition des rôles aboutit à un système où la coordination globale de la chaîne de valeur demeure limitée.

En parallèle, des PME spécialisées, et plus ponctuellement certaines ETI, jouent un rôle important en intervenant sur des segments ciblés de la chaîne de valeur du CCUS (ingénierie, équipements, instrumentation, études, intégration de procédés...). Elles

contribuent ainsi à faire le lien entre résultats de la recherche, démonstrateurs et déploiement industriel, avec le soutien de dispositifs publics récents tels que les appels à projets IBaC PME et DEMIBaC portés par l'ADEME dans le cadre de France 2030, qui visent à soutenir le développement de briques technologiques et de démonstrateurs par des entreprises de différentes tailles.

Les startups occupent une place particulière, en prenant en charge des technologies encore trop immatures ou risquées pour mobiliser directement les grands industriels. Comme indiqué précédemment dans la partie *Output des recherches* (page 37), leur nombre reste encore modeste en France, et en particulier au CNRS, même si un développement notable est observable depuis 2018 dans le domaine du CCUS. Ces jeunes entreprises se positionnent généralement sur des briques technologiques de rupture issues de travaux académiques récents. Dans le domaine du captage du CO₂, Revcoo (une startup qui n'est pas issue du CNRS) et Cryopur (spin-off de Mines Paris Tech qui a intégré la Française de l'Energie) ont ainsi développé des procédés de captage du CO₂ par anti-sublimation permettant de produire du CO₂ de grande pureté, même lorsqu'il est en faible concentration initiale.

Les startups issues du CNRS sont quant à elles plus focalisées sur la valorisation du CO₂ en exploitant les compétences de pointe issues des recherches académiques, notamment dans le domaine de l'électrolyse du CO₂, de la plasma-catalyse ou d'autres procédés électrochimiques innovants. Des startups comme Dioxycle et plus récemment E-ETHYLENE illustrent cette dynamique : elles s'appuient sur des avancées académiques pour développer des dispositifs de conversion du CO₂ en éthylène, avec l'objectif de franchir les étapes critiques vers le pilote. D'autres startups élaborent des cellules électrochimiques pour réaliser l'électrolyse du CO₂ (Carboneo, 2020).

On peut également citer les startups suivantes dans le domaine de la valorisation du CO₂ :

- **Energogreen** se positionne sur du CO₂ provenant du biogaz issu de déchets agricoles (fumiers, lisiers de porc, autres déchets). Ce CO₂ est liquéfié puis, grâce à leur procédé de plasma-électrolyse, transformé en méthane ou méthanol. L'objectif final consiste à produire du e-kérosène pour fournir directement des compagnies d'aviation sur des aéroports. Ce carburant, issu à 100% de carbone biogénique répond donc bien à la directive européenne sur les e-SAF. Le modèle de développement, basé sur des petites usines très efficaces (1 000 m³/h) placées au plus près du déchet agricole, profite ainsi d'une production qui ne nécessite pas ou peu de transport, n'utilise qu'un foncier très modeste et bénéficie d'une énergie décarbonée dont le coût est abordable en France.
- Comme mentionné précédemment, Mecaware utilise le CO₂ pour recycler les métaux critiques issus en particulier du recyclage des batteries (nickel, manganèse, cobalt, lithium...) et les transformer en carbonates, permettant ainsi d'incorporer du CO₂ dans des matériaux pérennes et en évitant l'utilisation de sulfates.



Dans un domaine tel que le CCUS avec de fortes composantes technologiques, la transformation des résultats scientifiques en solutions industrielles s'opère par l'intervention d'acteurs intermédiaires que l'on peut qualifier d'innovateurs technologiques.

Enfin, bien que le captage direct du CO₂ atmosphérique (DAC) ne fasse pas partie du périmètre principal de cette étude, son développement offre un point de comparaison utile. Les briques scientifiques mobilisées (matériaux poreux, adsorption sélective, optimisation énergétique) sont proches de celles du CCUS mais appliquées à des concentrations de CO₂ beaucoup plus faibles. Le DAC est une solution séduisante du fait de son universalité. Ses dispositifs, éventuellement mobiles, peuvent en effet être installés partout, que ce soit à proximité des sources d'énergie, de transformation ou de stockage. Les méthodes DAC les plus avancées nécessitent cependant des processus thermiques pour libérer le CO₂ capturé et régénérer les adsorbants. L'énergie nécessaire étant souvent une source d'émissions supplémentaires, le bilan est en général mitigé. Ainsi, la startup zurichoise ClimeWorks, considérée comme un des leaders industriels de ce secteur et qui propose de capturer le CO₂ en aspirant l'air à travers une toile de nanofibres de cellulose imprégnée d'une amine, présente un résultat 2025 emblématiquement décevant avec un bilan d'émission positif. L'énergie mobilisée par les DAC se doit donc d'être bas carbone, soit par son origine comme pour Climeworks qui valorise l'énergie géothermique, soit par captage des émissions annexes comme pour l'entreprise Carbon Engineering. Les solutions pour le DAC basées sur des MOFs sont prometteuses, même si elles restent à des TRL assez bas. C'est un domaine dans lequel le CNRS a été actif dès les années 2000 avec les travaux de Gérard Férey. Cette recherche se poursuit, en particulier avec Karim Adil et Amandine Cadiou qui développent des MOFs à piliers fluorés suscitant un vif intérêt en raison de leur grande stabilité chimique et thermique, ainsi que de leur excellente tolérance à l'eau et à H₂S avec une sélectivité élevée en faveur du CO₂. Si la startup Stathmos qui en est issue propose des solutions DAC, le prix et la synthèse de ces MOFs restent pour le moment prohibitifs.

Le rôle de ces différentes startups est stratégique car elles explorent des solutions en assumant un risque que les grands industriels ne prennent généralement qu'à des stades plus avancés, mais qui pourraient constituer des technologies de rupture à moyen terme. Toutefois, plusieurs interlocuteurs ont souligné un déficit structurel en France en matière de financement des technologies au stade des pilotes et des démonstrateurs, ainsi qu'une culture de génie des procédés, au stade de la recherche, moins développée que dans d'autres pays industriels comme l'Allemagne avec les Fraunhofer, le Royaume-Uni ou la Chine. Cette situation peut contribuer à expliquer le nombre relativement limité de startups dans le domaine et la difficulté à transformer rapidement des avancées scientifiques en solutions industrielles déployables.

LES STRUCTURES DE CONSEIL ET D'INFLUENCE

Les acteurs de la chaîne de valeur CCUS se sont regroupés en France sous forme d'associations, le Club CO₂ et l'AFEN (Association française des émissions négatives). Le Club CO₂ créé en 2002 est mobilisé sur la filière CCUS alors que l'AFEN est plus spécialisée dans les CDR (Carbone Dioxide Removal)¹². Ce sont des lieux de sensibilisation, d'information et d'échange entre les entreprises, les chercheurs, les investisseurs et les pouvoirs publics. En outre, ces associations réalisent des études ou « positions papers », afin de faire remonter des informations cohérentes et robustes aux membres des associations, aux comités stratégiques de filière, au comité de régulation de l'énergie mais aussi au gouvernement (DGE). Les documents publiés récemment concernaient la cartographie des potentialités de CDR en France, les potentiels d'emplois de la filière CCUS, les avis sur la régulation des infrastructures de CCS et une vue d'ensemble de la valorisation du CO₂.

12. Le CDR désigne les approches visant à retirer durablement du CO₂ déjà présent dans l'atmosphère. Il se distingue du CCUS étudié ici, centré sur le captage du CO₂ à la source, mais les deux notions se recouvrent lorsque le CO₂ capté est d'origine biogénique et stocké durablement.

Au niveau européen, l'association CO₂ Value Europe rassemble plus de 100 organisations du monde entier issues de divers secteurs (notamment des industries, startups, universités, organismes de recherche et de technologie, ainsi que des clusters régionaux) et développe là encore des espaces d'échanges, des réflexions et des bases de données pour aider l'Union européenne à atteindre ses objectifs climatiques.

Une multitude de cabinets de conseil s'est développée depuis une vingtaine d'années sur le développement durable et la transition écologique. Certains ont développé une expertise CCUS. Ce sont essentiellement des cabinets américains, anglais, suédois, allemands, australiens et canadiens. S'y ajoutent quelques français tels qu'Alcimed, Sia Partners, E-Cube, Yélé Consulting, Carbone 4 parmi d'autres. Leur rôle est de fournir des analyses et expertises sur mesure, des études de marché à différentes échelles, des analyses stratégiques ou encore un accompagnement managérial et des gouvernances.

LES ACTEURS DU DÉBAT PUBLIC

Si le processus d'acceptabilité et d'appropriation sociétale d'un projet industriel résulte d'une construction collaborative entre les porteurs de projets, les élus, les pouvoirs publics et les citoyens (riverains, associations locales ou nationales), encore faut-il, en particulier pour une nouvelle filière industrielle, que chacun dispose des informations permettant d'appréhender globalement les enjeux liés à la filière. Or, force est de constater que le CCUS n'a pas fait l'objet de communication large, tant de la part des pouvoirs publics, des industriels, des scientifiques ou même des médias.

13. La Commission Nationale du Débat Public (CNDP) est « l'autorité indépendante garante du droit à l'information et à la participation du public sur l'élaboration des projets et des politiques publiques ayant un impact sur l'environnement. Ce droit est inscrit à l'article 7 de la Charte de l'environnement. Ce « droit au débat » du public permet également d'améliorer les décisions des responsables des projets ou des politiques. Il les éclaire sur les valeurs, les attentes ou les interrogations du public. La CNDP est obligatoirement saisie pour les plus grands projets mais elle peut également être saisie volontairement pour les projets de moindre impact (Voir <https://www.debatpublic.fr>).

D'ailleurs, une observation commune aux concertations organisées par la Commission Nationale du Débat Public (CNDP)¹³ sur les projets de CCUS GOCO₂ et Rhône Décarbonation est « la difficulté à appréhender, tant dans sa dimension technique que dans sa dimension économique, une chaîne de captage, transport, liquéfaction et séquestration géologique du CO₂ qui n'a encore abouti dans le monde, à une échelle industrielle, qu'au cours de l'année 2025, et n'était pas connue du public ».



« Il est difficile d'appréhender, tant dans sa dimension technique que dans sa dimension économique, une chaîne de captage, transport, liquéfaction et séquestration géologique du CO₂ qui n'a encore abouti dans le monde, à une échelle industrielle, qu'au cours de l'année 2025, et n'était pas connue du public ».

Comme le rappelle l'association négaWatt (Christian Couturier, octobre 2025) en se basant sur les scénarii du GIEC, « *Réduire vite les émissions brutes reste la priorité, les solutions CDR, y compris CCS, contribuent à accélérer la réduction des émissions* ». Ceci étant, « *la capacité de stockage géologique de CO₂ en Europe est estimée à environ 100 GtCO₂, alors que l'Europe émet encore 2,5 GtCO₂/an* ». Aucun scénario crédible ne défend le stockage biologique (forêt, agriculture, bois) comme suffisant, d'autant que certains espaces végétalisés (forêts, prairies) risquent d'émettre du carbone en raison du changement climatique. Le CCS sera nécessaire mais pas suffisant pour atteindre la neutralité climatique. La crainte exprimée que le CCS soit une solution magique qui dispense les industriels d'une remise en question de leur modèle de production n'est donc pas fondée.

En plus de ces considérations globales, chaque brique du CCUS fait l'objet de critiques et d'argumentations constructives de la part d'associations, think tanks, groupes professionnels, riverains... Ainsi, chacune des concertations publiques (GOCO₂, Rhône Décarbonation, CAP Décarbonation) a émis des demandes de présentation du bilan carbone global du projet et des analyses de cycle de vie. Une telle recommandation pourrait permettre de mieux éclairer ou orienter les choix industriels concernant notamment la technologie de captage de CO₂. Le transport du CO₂ par pipeline provoque des réticences sans toutefois déclencher d'opposition frontale, notamment du monde agricole, avec des interrogations sur les tracés envisageables, les conséquences des travaux sur les bocages et la biodiversité, la résistance des canalisations ou des lieux de stockage transitoire dans le temps et les risques de fuites. Notons que l'intervention de structures intermédiaires comme les chambres d'agriculture peuvent faciliter un dialogue constructif entre les porteurs de projets et le public concerné. « La séquestration géologique du CO₂ est ainsi sans doute l'aspect du dossier qui a

été le plus questionné durant toute la concertation, que ce soit pour mieux comprendre comment elle est réalisée, si elle est permanente ou réversible, pour interroger sa pertinence économique, les capacités offshore existantes, ou pour exprimer une méfiance vis-à-vis d'un maillon de la chaîne qui paraît particulièrement risqué ». En effet, si l'étanchéité du stockage sur le long terme est questionnée, le choix du site de séquestration, même offshore, l'est tout autant avec une prise en compte d'arguments de souveraineté. Notons que beaucoup d'acteurs interrogés illustrent la non-acceptabilité sociétale du stockage géologique par l'échec du projet PYCASSO, sans préciser que ce n'était pas la sécurité du stockage qui était réellement mise en cause mais le changement d'usage des gisements de gaz, actuellement exploités par l'industrie chimique, une activité économique jugée indispensable par les élus locaux, les syndicalistes et les industriels concernés pour sauvegarder l'activité locale et des emplois ! D'ailleurs, selon l'un de nos interlocuteurs, « *l'acceptabilité sociale était un prétexte puisqu'il n'y avait pas vraiment de débats publics* ».



Les débats mettent également en avant la nécessité de prendre en compte la place faite à la valorisation du CO₂, en particulier aux projets de e-carburants pour l'aviation. Comme le CO₂ utilisé pour les e-SAF devra bientôt provenir de sources non fossiles, l'utilisation du CO₂ issu des fumées industrielles nécessitera une complète « défossilisation » des procédés en amont ! Ainsi qu'énoncé par le rapport récent du Shift Project et d'AeroDécarbo, « *la production de SAF sera, en France et dans le monde, restreinte par des limites physiques et industrielles, ainsi que par les conflits d'usage sur la biomasse durable et l'électricité bas-carbone* ».

Enfin si les débats publics émettent clairement des réserves quant au modèle économique des projets CCUS et à l'allocation massive de fonds publics au profit d'intérêts privés, les associations et think tanks ne remettent pas en cause le besoin d'aides publiques au CCUS pour préserver la compétitivité, l'économie des territoires et les emplois, à condition toutefois que ces aides publiques soient conditionnées à une décarbonation maximale en amont des procédés CCUS.



Accepter la nécessité d'une solution technologique ou au contraire prôner la décarbonation par une baisse des usages ne relève pas que du choix idéologique mais aussi de la prise en considération des données factuelles et chiffrées des émissions de CO₂ actuelles et leur nécessaire évolution pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Les réflexions des citoyens démontrent qu'un débat public global et objectif sur les enjeux de la décarbonation et le rôle de la puissance publique dans la trajectoire zéro carbone sera essentiel. D'ailleurs la méconnaissance du CCUS et de son positionnement factuel dans la trajectoire de décarbonation se retrouve dans la sphère politique et dans les débats animés à l'Assemblée Nationale, rendant plus difficile l'adoption de positions claires de la part des pouvoirs publics. Accepter la nécessité d'une solution technologique ou au contraire prôner la décarbonation par une baisse des usages ne relève pas que du choix idéologique mais aussi de la prise en considération des données factuelles et chiffrées des émissions de CO₂ actuelles et leur nécessaire évolution pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

LES ÉTABLISSEMENTS OU STRUCTURES DE FORMATION

Le développement de la filière CCUS va requérir des besoins importants en compétences spécifiques. Aucune étude disponible n'identifie à ce jour les métiers clés qui seront nécessaires, ni qualitativement, ni quantitativement. Pour répondre à ces besoins en compétences, le développement de formations initiales et continues imposera la mobilisation de tous les acteurs, qu'ils soient académiques ou privés (organismes de formation continue, entreprises). Notons que IFPEN et le BRGM, mais aussi les entreprises (par exemple : Terega) proposent déjà des formations continues à l'attention des ingénieurs et des techniciens. Les scientifiques des UMR CNRS diffusent leurs connaissances dans les formations initiales prodiguées par les universités et les écoles d'ingénieur et ont, via l'encadrement de près de 115 thèses, participé à la formation des cadres de cette filière.

LES MÉDIAS

L'attention portée par les médias sur le CCUS oscille au cours du temps suivant l'intérêt général fluctuant porté à ces technologies. Selon les données recueillies à partir des bases de données Factiva et Europress, la presse francophone propose typiquement plusieurs centaines d'articles par an sur ce sujet à partir de 2005, provenant le plus souvent de grands quotidiens (édition papier ou articles en ligne). S'ensuit un tassement vers le milieu des années 2010 suivi d'un fort regain d'intérêt depuis 2018 (dépassant largement le millier d'articles publiés par an). Ces articles rapportent des questionnements relatifs à la pertinence des technologies CCUS et à leur avenir, présentent le développement de premiers projets industriels (par exemple en France : TotalEnergies, ArcelorMittal, Air Liquide...) ou annoncent les premières orientations stratégiques de la France pour soutenir le CCUS (en particulier en 2023). La recherche n'y est évoquée qu'à la marge (4% des articles). On recense tout de même plus de 500 articles sur le CCUS mentionnant le CNRS entre 2005 et 2025 (sur les quelque 13 000 articles relatifs au CCUS en général), et en particulier plus d'une cinquantaine par an depuis 2019 (hors année Covid en 2020).

Les principales sources en France appartiennent à la presse écrite ou en ligne nationale : Le Monde (49 articles), Les Echos (27), Le Figaro (27), Usine nouvelle (32), la Tribune (29) ou La Croix (16) ; viennent ensuite les sources régionales : L'Est Républicain (11), Sud-Ouest (13), Ouest France (7) puis les sources plus spécialisées : Science et Avenir (23), le Journal de l'Environnement (10) et enfin l'agence France Presse (20).

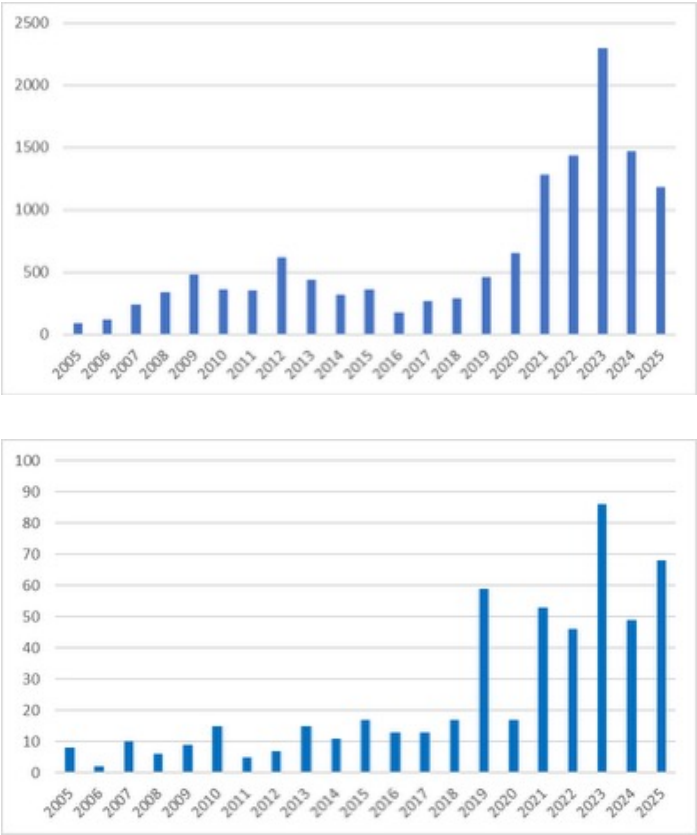


Figure 14 : Nombre d'articles recensés dans la presse francophone portant sur le CCUS en général (figure du haut) et impliquant le CNRS (figure du bas)
(sources : bases de presse Factiva et Europress)



IMPACTS

Conceptuellement, l'impact de la recherche doit toujours s'apprécier par rapport à un contrefactuel, c'est-à-dire par comparaison avec une situation dans laquelle ces recherches n'auraient pas été menées. Nous distinguerons dans cette étude les impacts déjà observables ou avérés, les impacts initiés ou attendus, et les impacts dont nous anticipons la réalisation ou espérés.

Précisons que nous n'analysons que l'impact sociétal de la recherche et pas l'impact sociétal du CCUS. Dans la mesure où aucune filière industrielle de CCUS n'est opérationnelle à ce jour en France, les impacts sociétaux de la recherche sont encore très peu observables.

IMPACT SCIENTIFIQUE (impact attendu)

L'impact scientifique des travaux du CNRS et ses partenaires sur le CCUS concerne une gamme variée de secteurs scientifiques. Dans le panorama extrêmement fragmenté de cette filière, cet impact reste difficile à mesurer car le CCUS ne correspond pas à une thématique scientifique mais à une collection de disciplines et de technologies qui, si elles sont présentes dans nos laboratoires, n'entrent usuellement pas en interaction. Cette hétérogénéité explique en partie que la communauté CCUS soit peu structurée

et fasse l'objet d'une coordination institutionnelle imparfaite. Dans ce contexte, le PEPR SPLEEN créé en 2023 joue, de l'avis unanime des personnes interrogées, un rôle important dans la coordination des acteurs scientifiques et des thèmes de recherche, mais le lien avec les acteurs industriels reste encore ténu malgré des efforts notables. De son côté, le Club CO₂ constitue un forum où les acteurs se rencontrent régulièrement pour échanger, mais il semble que les communautés académiques y soient peu actives.

Enfin, des freins pour la montée en TRL ont été mentionnés de façon récurrente par les différents acteurs : ils sont liés au déficit de pilotes et de démonstrateurs (qui sont développés à l'international mais aux dépens des chercheurs français), ainsi qu'à une articulation insuffisante au CNRS entre chimie et génie des procédés chimiques, deux disciplines pilotées par des instituts différents du CNRS.

Néanmoins, dans chacun de ces segments d'activité, l'impact scientifique des recherches menées au CNRS est susceptible d'être très important puisque certains choix technologiques structurants pour la filière restent encore ouverts et s'appuieront nécessairement sur des travaux amont (TRL 1-3), actuellement conduits dans les laboratoires académiques et « attendus » par les industriels. **On peut ainsi noter pour les différentes briques du CCUS :**

- **Captage** : dans un premier temps, il sera important d'améliorer les amines actuellement utilisées dans les procédés standards commerciaux, que ce soit en termes d'efficacité, de bilan énergétique, de stabilité ou de toxicité. Au-delà des recherches sur leur composition, le travail de procédés sur les modalités de leur emploi (systèmes démixants ou systèmes d'amines avec précipitation, contacteurs membranaires) devra être poursuivi, en particulier au LRGP Nancy. A moyen terme, des systèmes de captage plus efficaces et à des températures moins élevées pourront leur succéder, en particulier les solides poreux ; la recherche est particulièrement active dans ce domaine au CNRS (IMAP Paris, IJL Nancy, IRCÉLYON, CP2M et LAGEPP Lyon, UCCS Lille, ICPEES Strasbourg, CRPP Bordeaux, IMN Nantes...) comme le montrent les publications et les brevets. Les recherches sont également très soutenues sur les membranes sélectives pour la filtration des fumées, en particulier à l'IEM Montpellier. Les technologies de cryocaptage, désublimation et liquéfaction du CO₂ sont plutôt du ressort des industriels et peu d'UMR du CNRS semblent impliquées

dans ce domaine, d'autant plus que leur sensibilité aux polluants et leur caractère énergivore questionnent sur l'emploi de ces technologies en tant que solution à long terme. Il s'agit également de développer des systèmes de captage reposant sur des procédés électrifiés, afin que le captage n'engendre pas de consommation d'énergie fossile, et d'améliorer leur flexibilité opérationnelle pour les adapter aux variations de fonctionnement des installations industrielles, souvent plus rapides que les temps de réponse des systèmes chimiques de captage.

- **Valorisation** : cet aspect est bien pris en compte dans l'axe 4 du PEPR SPLEEN « Stockage et valorisation du CO₂ », du moins à l'échelle académique. Le CNRS est un acteur stratégique dans ce domaine car il fait partie des leaders mondiaux en ce qui concerne la réduction électrochimique du CO₂ (avec des laboratoires comme IPCM Paris, CPB Paris, ICBMS Lyon, ICMPE Thiais, IEM Montpellier, LCBM Grenoble, LRGP Nancy...), mais aussi la carbonatation des bétons (LMGC Montpellier, LSCE Versailles, LGC Toulouse, LaSIE La Rochelle...), le captage par les microorganismes (TBI et LISBP Toulouse, BIP Marseille, LPCV Grenoble...). Le CNRS est donc susceptible de faire avancer significativement les usages du CO₂, y compris à grande échelle, dans les années à venir.

- **Stockage** : bien que ces aspects ne soient pas, ou très peu, pris en compte par les PEPR SPLEEN et « Sous-sol, bien commun », des recherches de haut niveau sur le stockage souterrain sont menées au CNRS (notamment LGENS Paris, Géosciences Montpellier, Géosciences Environnement Toulouse, Géoressources Nancy, LOG Wimereux), en plus des recherches sur les stockages chimique et minéral déjà décrits (voir la partie *Output des recherches* en page 30).

• **Débat public et acceptabilité sociétale** : si le PEPR SPLEEN n'aborde pas les technologies et les conséquences physico-chimiques du stockage du CO₂, il s'intéresse toutefois à l'étude des conditions d'identification socio-techniques de sites de stockage onshore en France. Plusieurs unités du CNRS travaillent ainsi sur les dimensions sociales, politiques et territoriales du stockage du CO₂, par exemple TREE Pau, PACTE Grenoble ou le CIREN Nogent-sur-Marne. Ces travaux sont appelés à avoir un impact sociétal significatif dans l'analyse des conditions de déploiement du CCUS.

À plus court terme, les travaux du CNRS et de ses partenaires pourront avoir un impact significatif sur des points bloquant le développement économique de la filière, notamment ceux liés aux limites des technologies actuellement disponibles. Ainsi, le problème de la corrosion induite par les oxydes d'azote et de soufre dans les pipelines de **transport** (avec un impact sur les normes) n'est actuellement pas pris en compte par les différents PEPR du domaine, mais il intéresse quelques unités du CNRS spécialistes de ces questions (IRCP Paris, CIRIMAT Toulouse, CEMHTI Orléans, CRISMAT Caen). Il en va de même pour le suivi du stockage géologique, domaine ignoré par les PEPR mais qui pourrait être avantageusement pris en charge par les unités Terre et Univers listées plus haut. Le traitement des données massives qu'un tel suivi à long terme devrait engendrer sera une étape clé dans le succès de cette opération. Reste enfin les thématiques essentielles du débat public, de l'acceptabilité voire de l'appropriation sociétale pour lesquelles les acteurs du CNRS spécialistes du domaine seront déterminants. Les travaux menés sur le CCUS sont appréciés de tous les acteurs, qu'ils

soient économiques, politiques ou représentants de la société, mais perçus comme étant encore trop peu développés. *« Il s'agit d'un enjeu majeur car au-delà des concertations préalables, concertations et enquêtes publiques, impactant l'obtention des permis de construction et d'exploitation, je constate que l'incompréhension de la population de ces enjeux et solutions entraîne des impacts politiques importants. Quand la politique environnementale avec les moyens financiers associés mis en œuvre n'est pas comprise, les gouvernements européens font face à un vote contestataire vers les extrêmes »* (E. Bourdon, Vicat).



« Quand la politique environnementale avec les moyens financiers associés mis en œuvre n'est pas comprise, les gouvernements européens font face à un vote contestataire vers les extrêmes. »

IMPACT ÉCONOMIQUE

Afin d'évaluer l'impact économique des recherches menées au CNRS sur le CCUS de 2005 à 2024 et non, de façon plus large, l'impact économique direct produit par toutes les recherches académiques, voire même par l'ensemble de la filière CCUS, trois directions d'analyse ont été explorées :

- 1

LES TECHNOLOGIES ISSUES DE BREVETS en copropriété avec le CNRS,
- 2

LE DÉVELOPPEMENT DES ENTREPRISES dont la technologie princeps est issue du CNRS,
- 3

LES REVENUS MÉDIATIQUES générés par les articles de presse citant les recherches du CNRS sur le CCUS.

Outre ces impacts économiques directs, il conviendra, quand le CCUS sera mis en œuvre à l'échelle industrielle, de prendre également en compte les impacts indirects et en particulier l'effet des entreprises qui, en utilisant ces résultats de la recherche, contribuent au développement économique de leur région d'implantation ou à l'attractivité industrielle de ces territoires.

REVENUS DES BREVETS (impact espéré)

Comme mentionné précédemment, une dizaine de familles de brevets ont fait l'objet d'un transfert de technologie vers des PME ou des startups, notamment dans le domaine des MOFs et de la réduction du CO₂. Néanmoins, ces contrats sont très récents, la plupart ayant été conclus depuis moins de 5 ans. Aussi, les revenus produits par ces brevets (de l'ordre de 15 000 €) et les chiffres d'affaires générés sont actuellement trop faibles pour caractériser d'ores et déjà un impact économique significatif. En revanche, des retombées plus substantielles devraient apparaître à mesure de la mise sur le marché de futurs produits ou procédés.



REVENUS ET EMPLOIS GÉNÉRÉS
PAR LES STARTUPS ISSUES DU CNRS ET
LES ENTREPRISES UTILISANT DES PROCÉDÉS
DÉVELOPPÉS PAR OU AVEC LE CNRS
(impact attendu)

Huit startups sont issues ou adossées à des laboratoires CNRS depuis 2018. D'autre part, certaines technologies co-développées dans le cadre de partenariats entre laboratoires CNRS et entreprises sont également à la base d'industries innovantes. Bien que très récentes, certaines de ces startups sont aujourd'hui devenues des PME au devenir très prometteur. A partir de ces acteurs issus du CNRS, de leurs résultats financiers avérés ou attendus, qu'ils soient publics ou issus d'une communication confidentielle, il est possible d'évaluer le chiffre d'affaires global actuel et sa progression jusqu'en 2028, ainsi que le nombre d'emplois directs générés :

ANNÉE	EMPLOIS	CHIFFRES D'AFFAIRES (M€)
2025	110-150	1
2028	~ 300	~ 120

REVENUS MÉDIATIQUES (impact avéré)

Comme indiqué précédemment, les recherches menées au CNRS sur le CCUS ont fait l'objet de près de 1 000 documents de 2000 à 2025, dont 520 dans la presse francophone. Sachant que le chiffre d'affaires moyen généré par un article de presse sur ce sujet est d'environ 9 200 € (pour la méthodologie employée, voir Annexe 1), les revenus générés par les articles mentionnant la recherche du CNRS sur le CCUS s'élèvent à plus de **9,6 M€** dans le monde dont la moitié, soit **4,8 M€** dans la presse française.

BILAN ET PERSPECTIVES

Le chiffre d'affaires généré par les recherches du CNRS sur le CCUS est donc très modeste en 2025 (environ 10 M€) et pourrait atteindre au moins 130 M€ en 2028. Mis en regard des investissements financiers (400 M€, voir le bilan page 27), le retour sur investissement est pour l'instant négatif. Néanmoins, l'impulsion récente donnée par le gouvernement au CCUS devrait permettre un déploiement industriel plus large d'ici 2030 et, par conséquent, une amplification progressive du développement et de l'utilisation des résultats de la recherche et des innovations de rupture.



L'impulsion récente donnée par le gouvernement au CCUS devrait permettre un déploiement industriel plus large d'ici 2030 et une amplification progressive du développement et de l'utilisation des résultats de la recherche et des innovations de rupture.

IMPACT POLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE
(impact espéré)

Si une large partie des acteurs s'accorde désormais sur le rôle essentiel du CCUS pour atteindre les objectifs nationaux et européens de réduction des émissions de CO₂, la portée environnementale de cette filière industrielle reste aujourd'hui fortement limitée par l'absence de modèle économique viable dans l'immédiat. Une réglementation contraignante mais contrebalancée par des co-financements publics et un cours du carbone adapté sont les principaux leviers qui permettront de mettre en place le CCS dans un avenir proche, si toutefois ils sont actionnés de façon coordonnée. En effet, une réglementation sans aide publique mènerait au mieux à un statu quo des émissions (si le cours du carbone reste bas) et au pire à des délocalisations industrielles. La valorisation du CO₂ capté en sortie d'usine semble n'avoir d'avenir à terme que dans son utilisation dans les matériaux puisque le développement des e-carburants fera de plus en plus appel au carbone d'origine biogénique.

Dans ce contexte, les recherches menées au CNRS avec ses partenaires seront déterminantes pour :

- 1

OPTIMISER LES PROCÉDÉS
de captage du CO₂ au niveau du coût, de la pollution et des performances,
- 2

DÉVELOPPER DES PROCÉDÉS
de valorisation moins énergivores, moins consommateurs en eau et donc économiquement plus viables,
- 3

METTRE À PROFIT les connaissances du sous-sol, améliorer les méthodes de suivi à long terme de son utilisation et renforcer le traitement des données.
- 4

FACILITER L'APPROPRIATION
par la population de cette nouvelle filière industrielle, que ce soit sur son positionnement dans la trajectoire de décarbonation, sur les aspects de sécurité (pipelines de transport, stockage), sur la nécessité de financements publics, ou encore sur les enjeux sociaux. De l'avis de toutes les personnalités interrogées, les débats publics doivent être analysés, objectivés, voire co-construits par des scientifiques des UMR CNRS en sciences humaines et sociales.



Et pourtant, force est de constater qu'à ce jour les acteurs scientifiques, de façon générale, sont exclus des dispositifs d'élaboration des stratégies nationales d'accélération. Ainsi le premier comité de pilotage du CCUS en février 2026 a réuni responsables politiques et industriels en l'absence de tout acteur scientifique. D'après plusieurs personnes interviewées, l'éclairage scientifique des décisions prises par les administrations centrales sur le CCUS est assuré par les informations transmises par les industriels, associations et think tank (qui souvent s'appuient eux-mêmes sur les données scientifiques) mais pas directement par les scientifiques ou leurs représentants institutionnels. S'il est légitime que les acteurs scientifiques ne soient pas décisionnaires, ils ont vocation à éclairer et objectiver les débats et décisions publiques. L'avantage des institutions scientifiques est pourtant leur impartialité. Cette constatation, déjà mentionnée dans l'étude d'impact des recherches du CNRS sur les batteries¹⁴, fait écho au peu de citations de données scientifiques dans les documents stratégiques français, au contraire des documents stratégiques de la Commission européenne et de pays tels que l'Allemagne ou la Grande-Bretagne. Dans le cas du CCUS, filière industrielle en devenir, les acteurs économiques et acteurs scientifiques ont des rôles complémentaires et synergiques dont ils sont parfaitement conscients. Quels sont les leviers à actionner pour que la science éclaire mieux les politiques publiques sur le CCUS ? Le CNRS doit-il plus s'impliquer au sein du Club CO₂ ? Quel rôle pour l'Agence de Programme sur l'Energie Décarbonée ? Autant de questions qu'il faudrait aborder pour que recherche, développement industriel et politiques publiques agissent de concert pour atteindre les objectifs de décarbonation.



Le premier comité de pilotage du CCUS en février 2026 a réuni responsables politiques et industriels en l'absence de tout acteur scientifique. S'il est légitime que les acteurs scientifiques ne soient pas décisionnaires, ils ont vocation à éclairer et objectiver les débats et décisions publiques.



14. https://www.cnrs.fr/sites/default/files/page/2025-12/CNRS_ETUDE_IMPACT_SOCIAL_BATTERIES.pdf

IMPACT ENVIRONNEMENTAL (impact espéré)

Par définition, la chaîne CCUS est pensée dans un objectif d'impact environnemental, puisqu'elle est l'ultime brique pour baisser les émissions de CO₂ par l'industrie. Ainsi, selon l'ADEME, si l'ensemble des projets des cimentiers, secteur le plus avancé dans le captage de CO₂, se mettait en place, 1,2 MtCO₂ pourraient être captés par an à l'horizon 2030 (sur les 4 à 8 MtCO₂ prévus dans la feuille de route française). Pour autant, il est essentiel que la filière CCUS ne contrevienne pas elle-même aux enjeux environnementaux, notamment en termes de consommation d'énergie, d'eau, voire de surfaces d'implantation au sol même si, toutes proportions gardées, le coût de l'inaction quant à la réduction des émissions de GES est incommensurable.

Dans ce contexte, les différentes briques du CCUS présentent encore d'importantes marges d'amélioration, sur lesquelles porte une partie des recherches actuelles. Ainsi, les procédés de captage du CO₂ sont consommateurs d'énergie et d'eau. IFPEN, avec son procédé DMX commercialisé par Axens, s'est efforcée de réduire cette pénalité énergétique. Actuellement, capter une tonne de CO₂ en sortie d'usine représente une dépense de l'ordre de 2 à 3 gigajoules, contre environ 10 gigajoules pour le CO₂ atmosphérique.

Les recherches menées sur les membranes, les solides poreux et les MOFs (en particulier pour les sources pauvres en CO₂), mais aussi les progrès sur les analyses de cycle de vie de toute la chaîne CCUS, désormais routinières, participent à cet effort d'amélioration. Elles devraient à terme renforcer la performance environnementale des procédés de captage, et même permettre des émissions négatives dans le cas du CO₂ biogénique ou atmosphérique, à condition que la filière industrielle correspondante se déploie effectivement et suscite un besoin durable d'innovations technologiques. Ces évolutions sont essentielles afin que le CCUS n'apparaisse pas comme du techno-solutionnisme pérennisant un modèle productif existant mais soit considéré comme un maillon ultime et indispensable pour accélérer la décarbonation de l'industrie.

Il en est de même pour les procédés de valorisation, qui soulèvent eux aussi des enjeux environnementaux importants : non seulement certains catalyseurs utilisent des métaux rares, mais la production d'une tonne de e-carburant requiert 5 tonnes de CO₂ et 0,7 tonne de dihydrogène, obtenu par électrolyse de 6,5 tonnes d'eau consommant 40MWh d'électricité (voir Figure 15).

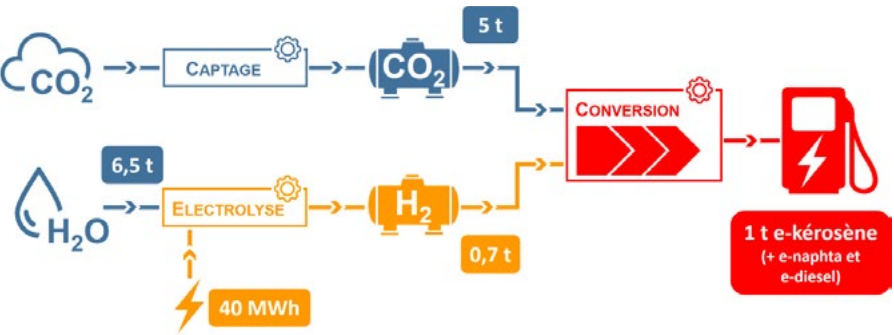


Figure 15 : Schéma descriptif de la production d'e-carburant

(source : fiche CEA/IFPEN « Vers une Première Filière de Production d'E-Carburants »)

IMPACT SOCIAL

Aussi, les recherches menées au CNRS ont pour ligne directrice l'efficacité énergétique, qui constitue un point clé de la possibilité de montée en TRL. Cela vaut aussi bien pour l'utilisation de la lumière naturelle concentrée que pour le recours à des LED permettant de diminuer le coût énergétique de la réduction du CO₂. Les startups issues du CNRS telles que Mecaware, Energo, ou Dioxycle se basent toutes sur l'efficacité énergétique et la durabilité de leur procédé chimique respectif. La découverte récente par le CNRS et l'Université de Lorraine d'une réserve importante d'hydrogène naturel dissous dans des eaux souterraines en Moselle laisse par ailleurs entrevoir des possibilités de valorisation du CO₂ en e-carburants moins énergivores et moins consommatrices en eau. Enfin, les bétons carbonatés devraient permettre d'obtenir des bétons denses, résistants et capables de fixer le CO₂ à long terme.

Que ce soit au niveau de la recherche académique ou des startups, les activités développées apportent déjà des réponses concrètes aux enjeux de réduction des coûts énergétiques, de durabilité, de réduction des risques et de sécurisation des ressources. Bien que ces thématiques aient des niveaux de maturité différents et doivent encore surmonter plusieurs verrous pour permettre une montée en TRL, elles illustrent déjà la pertinence des orientations scientifiques du CNRS.

L'impact social s'interprète d'abord en termes d'effet sur l'emploi. Une étude prospective du Club CO₂ fait apparaître que le développement de la filière CCUS en France pourrait générer, selon les scénarios retenus, la création de 200 000 à 400 000 emplois (dont 50% d'emplois directs) d'ici à 2050. Ces emplois, très largement temporaires puisqu'associés aux besoins de développement et de construction des infrastructures, devraient atteindre un pic vers 2035. Les besoins pérennes liés à l'exploitation des installations (opérateurs, maintenance) sont estimés entre 12 000 et 55 000 emplois directs et indirects ; ils devraient croître après 2030¹⁵. Ils sont avant tout associés au captage, puis au stockage et à la valorisation du CO₂. Le transport, en dehors de la construction du réseau nécessaire de carbodycs, ne devrait pas générer beaucoup d'emplois pérennes.

Si la filière CCUS s'industrialise réellement, elle pourrait aussi contribuer à maintenir en place des emplois existants dans les industries fortement émettrices de CO₂ qui faute de solutions de décarbonation viables, seraient tentées de délocaliser leurs productions hors d'Europe, vers des pays où l'énergie est moins chère et la réglementation moins contraignante. A l'inverse, certaines situations peuvent menacer l'emploi local, lorsque des activités existantes sont remplacées par des activités liées au CCUS. C'est le cas notamment pour le changement d'usage des gisements d'hydrocarbures (les gisements de gaz peuvent en outre être parfois exploités par l'industrie du soufre), qui deviendront des lieux de stockage et non plus de production. C'est l'une des raisons qui a probablement contribué à faire échouer le projet PYCASSO à Lacq.

Dans ce contexte, l'impact social directement attribuable aux recherches du CNRS est, aujourd'hui, beaucoup plus modeste. Des opportunités d'emploi

générées par l'implantation et le développement des startups issues du CNRS pourraient voir le jour, mais à l'échelle de quelques centaines d'emplois seulement. A court terme, ces perspectives d'emploi ciblent plutôt des profils d'ingénieurs ou d'ingénieurs-chercheurs intervenant dans les phases pilotes. Les laboratoires du CNRS contribuent également à l'impact social en assurant la formation par la recherche. Si ces projets se poursuivent, ils pourraient ensuite favoriser le recrutement d'une main d'œuvre déjà familiarisée aux exigences industrielles (compétences en génie électrique, en mécanique, en informatique industrielle et en montage/assemblage), ce qui peut contribuer à relancer l'attractivité de territoires délaissés. C'est probablement l'implication du CNRS dans les recherches sur la valorisation du CO₂ qui pourrait à terme générer le plus d'emploi si les filières de e-carburants, de e-chimie et de production de matériaux bas carbone trouvaient leurs modèles économiques et venaient à se développer.

Si les projets de e-carburants par électrolyse menés notamment par des chercheurs du CNRS atteignent une maturité suffisante, des emplois pourraient alors être créés sur l'ensemble de la chaîne de valeur, en incluant ceux générés par la filière hydrogène qui alimente les solutions de valorisation (e-kérosène et power-to-liquid).

Mais la portée sociale la plus frappante est sans doute de prouver qu'il est possible de concilier visions industrielle et environnementale et ainsi contribuer à la construction d'une société plus durable.

À ce stade, l'étude ne fait en revanche pas apparaître d'impact culturel ou sanitaire direct et identifiable des recherches du CNRS sur le CCUS.



15. <https://www.club-co2.fr/documents/storage/documents/2025/04/Club-CO2-Etude-Emploi-Synthese-publique.pdf>

ANNEXES

ANNEXE 1 : MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES

De façon générale, toutes les estimations chiffrées de l'étude sont réalisées en coût réel, non indexé sur l'inflation.

1. ESTIMATION DE LA MASSE SALARIALE

A partir de 2012, le CNRS a réalisé des enquêtes « Energie » annuelles ou bisannuelles auprès de tous les laboratoires CNRS. Les données issues de ces enquêtes permettent d'accéder au nombre d'etp dans les laboratoires CNRS, par thématique, avec la part d'agents rémunérés par le CNRS, la masse salariale correspondante (totale et CNRS) et donc le salaire en coût complet moyen chaque année, ainsi que les FEI (dépenses de fonctionnement, d'équipement et d'investissement). Dans le tableau suivant, sont indiquées en noir les données extraites de cette enquête et en rouge les données extrapolées.

Année	Etp Totaux	Etp CNRS	% CNRS	Etp CCUS	Etp CCUS CNRS	Masse Salariale CNRS énergie (M€)	FEI Énergie (M€)	Salaire moyen CNRS (k€/an)	Coût salaires CCUS CNRS (M€)	Coût total CCUS tout employeur (M€)
2012	7436	2251	30,3	141	43	145	31	64,4	2,7	9
2013	6812	1803	26,5	243	64	116	28	64,5	4,1	16
2014	5987	1625	27,1	206	56	109,37	28	67,3	3,8	14
2015	5538	1568	28,3	196	55	105	25	67	3,7	13
2016	5856	1592	27,2	156	42	105,26	23,75	66,1	2,8	10
2017	4546	1285	28,3	137	39	89,5	28	69,6	2,7	10
2018			28,2	153	43		27	70	3	11
2019	3713	1061	28,6	169	48	82	17,6	77,2	3,7	13
2020	4760	1394	29,3	238	70	108	26	77,5	5,4	18
2021			28,2	255	72		25	81,25	5,8	21
2022	4998	1425	28,5	272	78	121	25	85	6,6	23
2023			30	307,5	92	136,5	28	85	7,8	26
2024	5692	1809	31,8	343	109	152	31	84	9,2	27
Total ou moyenne	55338	15813	28,2	2816,5	811	1180,13	345,35		61,5	210,8
							Part CCUS : 17 M€			



En revanche, nous ne disposons pas de données fiables entre 2000 et 2011 et avons donc procédé à des estimations :

- Le salaire annuel en coût total a été estimé en tenant compte de l'évolution du point d'indice salarial entre 2000 et 2011.
- L'évolution du nombre d'etp dans le domaine du CCUS a été estimé à partir de celle du nombre de publications.
- Le pourcentage d'agents rémunérés par le CNRS dans les laboratoires a été fixé à 28,2%, qui correspond à la moyenne sur les années 2011 à 2023.

Année	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Total
Nombre de publications	47	36	43	26	18	20	14	
Etp total	172,6	132,2	157,9	95,5	66,1	73,4	51,4	749,1
Etp CNRS	48,7	37,3	44,5	26,9	18,6	20,7	14,5	211,3
Salaire moyen	64,4	64,4	63,9	63,4	63,1	62,6	61,5	
Masse salariale totale	11,1	8,5	10,1	6,1	4,2	4,6	3,2	47,7
Masse salariale CNRS	3,1	2,4	2,8	1,7	1,2	1,3	0,9	13,5

En résumé, la masse salariale dans les laboratoires du CNRS sur le CCUS peut être récapitulée comme suit :

Années	Etp totaux cumulés	Etp CNRS cumulés	Masse salariale totale (M€)	Masse salariale CNRS (M€)	FEI (M€)
2005-2011	749,1	211,3	47,7	13,5	4,4
2012-2024	2816,5	811	210,8	61,5	17
2005-2023	3565,6	1022,3	258,5	75	21,4

2. REQUÊTE LEXICALE POUR LA BIBLIOMÉTRIE

Pour identifier les publications scientifiques et les brevets technologiques CCUS, cette étude s’est appuyée sur un travail préalable réalisé en 2024 par la plateforme de recherche de l’université de Bordeaux, VIA INNO (www.viainno.fr), dans le cadre d’une étude pour le Club CO₂. Avec l’accord de ce dernier, que nous remercions, VIA INNO nous a transmis les corpus qu’ils avaient constitués et que nous avons adaptés à notre étude pour en restreindre le champ, en raison de différences sur la définition même du domaine CCUS.

L’étude de VIA INNO repose sur la constitution de corpus à partir d’une requête mise au point avec les experts du Club CO₂. Elle est suivie d’une étape de nettoyage des données sur la base de leurs contenus lexicaux (titre et résumé), réalisée avec l’aide d’outils d’intelligence artificielle et validée par les experts. Après un examen des corpus transmis, nous avons réduit le champ thématique du corpus (aussi bien pour les publications scientifiques que pour les brevets technologiques) afin de l’adapter à notre sujet d’étude en éliminant tout ce qui était relatif au carbone d’origine biologique. Pour cela, nous avons écarté tous les documents dont les titres contenaient l’un des termes suivants : forest, plantation, vegetation, wood, crop, agriculture, biomass, biochar, ocean, mangrove, peatland, wetland. Nous avons ensuite repris le classement établi par VIA INNO en quatre clusters partiellement recouvrants (captage, valorisation, stockage et transport) à partir de l’analyse des contenus lexicaux. Un même document peut parfois se retrouver associé à plusieurs de ces sous-thèmes.

Pour les articles scientifiques, l’interrogation lexicale a été réalisée par VIA INNO sur la base de données Scopus (Elsevier). Elle se concentre sur des documents de type « Articles ». Pour les brevets technologiques, l’interrogation lexicale a été faite par VIA INNO dans la base de données Orbit (Questel). Elle utilise une combinaison de termes et de codes CPC (Cooperative Patent Classification).

3. ESTIMATION DU CHIFFRE D’AFFAIRES GÉNÉRÉ PAR LA PRESSE

L’estimation du chiffre d’affaires moyen généré par un article mentionnant les recherches du CNRS sur le CCUS est basée sur un échantillonnage de 236 articles de presse (Le Monde, Les Echos, Le Figaro, La Tribune, Usine Nouvelle, AFP, Sud-Ouest, Ouest-France, La Croix, Sciences et Avenir) et découle du chiffre d’affaires annuel 2024 et du nombre annuel d’articles pour chaque titre de presse. Pour tenir compte de l’évolution des prix de 2000 à 2024 (+34,3% par rapport à 2000, +22% par rapport à 2010, +16,2% par rapport à 2017) et de la répartition observée des publications dans cet intervalle de temps, ce prix moyen de 11 507 €/article a été réduit à 9 200 €.



ANNEXE 2 : TABLEAU DES PRINCIPAUX LABORATOIRES CNRS ET PARTENAIRES IMPLIQUÉS DANS LES RECHERCHES SUR LE CCUS

Acronyme des laboratoires	Cotutelles	Captage et Séparation du CO ₂	Transport du CO ₂	Stockage du CO ₂	Valorisation du CO ₂	Institut	Nom du Laboratoire
BIP	AMU	X			X	INSB	Bioénergétique et ingénierie des protéines
CEMCA	UBO				X	INC	Chimie, Électrochimie moléculaire et chimie analytique
DCM	Univ Grenoble Alpes				X	INC	Département de Chimie Moléculaire
EM2C					X	INSIS	Laboratoire d'énergétique moléculaire et macroscopique, combustion
Georessources	Univ Lorraine	X		X	X	INSU	GeoRessources
GET	Univ Toulouse, IRD, CNES	X		X	X	INSU	Géosciences Environnement Toulouse
I2M	Univ Bordeaux	X		X	X	INSIS	Institut de mécanique et d'ingénierie
IC	Univ de Strasbourg	X				INC	Institut de Chimie de Strasbourg
IC2MP	Univ Poitiers				X	INC	Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers
ICCF	UCA, CHU Clermont			X		INC	Institut de Chimie de Clermont-Ferrand
ICGM	Univ Montpellier	X			X	INC	Institut Charles Gerhardt Montpellier
ICMPE	UPEC				X	INC	Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est
ICMUB	Univ Bourgogne			X	X	INC	Institut de Chimie Moléculaire de l'Université de Bourgogne
ICPEES	Univ Strasbourg			X		INC	Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé
IEM	Univ Montpellier				X	INC	Institut européen des membranes
IODE	Univ Rennes	X	X	X	X	INSHS	Institut de l'Ouest : Droit et Europe
IP	UCA				X	INSIS	Institut Pascal
IPCM	Sorbonne Université				X	INC	Institut Parisien de Chimie Moléculaire
IRCELYON	Lyon 1, Univ Lyon	X			X	INC	Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon
ISTO	Univ Orléans, BRGM, OSUC			X		INSU	Institut des Sciences de la Terre d'Orléans
LCBM	CEA, Univ Grenoble Alpes				X	INC	Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux
LCC	INP, Univ Toulouse				X	INC	Laboratoire de chimie de coordination
LCM	IP Paris	X			X	INC	Laboratoire de Chimie Moléculaire
LCPB	College de France				X	INC	Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques
LCS	UniCaen, ENSI CAen	X		X	X	INC	Laboratoire de catalyse et spectrochimie
LFCR	UPPA	X		X		INSIS	Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs
LGC	Univ Toulouse, Toulouse INP	X				INSIS	Laboratoire de génie chimique
LiPhy	Univ Grenoble Alpes	X				INP	Laboratoire interdisciplinaire de physique
LPP	IP Paris, Sorbonne U, Paris Saclay, PSL, Obs de Paris	X			X	INSIS	Laboratoire de physique des plasmas
LRGP	Univ Lorraine	X		(X)	X	INSIS	Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
NIMBE	CEA, Univ Paris Saclay				X	INC	Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie
RAPSODEE	IMT Mines Albi	X	X	X	X	INSIS	Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement
SyMMES	CEA, Univ Grenobles Alpes, INP				X	INC	Systèmes moléculaires et nano matériaux pour l'énergie et la santé
TBI	Inrae, INSA Toulouse	X			X	INSIS	Toulouse Biotechnology Institute, Bio & Chemical Engineering
TREE	UPPA			X		INSHS	Transitions énergétiques et environnementales
UCCS	Univ Lille, Centrale Lille, Univ Artois	X		X	X	INC	Unité de Catalyse et de Chimie du Solide

La liste de ces laboratoires est établie selon leur réponse aux enquêtes Energie de 2023 et 2025 et ne considère que ceux qui ont déclaré plus de 4 etp sur la thématique.

ANNEXE 3 : LES 10 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES LES PLUS CITÉES (SOURCE : WOS)

Pour rappel, les “Highly Cited Papers” identifiés par le Web of Science correspondent aux articles publiés depuis 2015 qui se situent dans le top 1% des articles les plus cités publiés la même année dans le même champ scientifique (ici principalement la chimie).

1

869 CITATIONS

Visible-light-driven methane formation from CO₂ with a molecular iron catalyst (2017)
Rao, H; Chmidt, LCS; Bonin, J; Robert, M. Nature 548(7665), pp.74

France/Argentine

2

800 CITATIONS

Molecular electrocatalysts can mediate fast, selective CO₂ reduction in a flow cell (2019)
Ren, SX; Joulié, D; Salvatore, D; Torbensen, K; Wang, M; Robert, M; Berlinguette, CP. Science, 365(6451), pp.367

France/Canada

3

756 CITATIONS

Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions (2016)
Juerg, MS; Snaebjornsdottir, M; Sandra, O; Oelkers, EH et al. Science, 352(6291), pp.1312

France/États-Unis/
Royaume-Uni/Islande

4

552 CITATIONS

Photocatalytic CO₂ reduction (2023)
Fang, SY; Rahaman, M; Bharti, J; Reisner, E; Robert, M; Ozin, GA; Hu, YH. Nature Reviews Methodes Primers (3)1

France/États-Unis/
Royaume-Uni

5

480 CITATIONS

Liquids with permanent porosity (2015)
Giri, N; Del Pópolo, MG; Melaugh, G; Greenaway, RL; Rätzke, K; Koschine, T; Pison, L; Gomes, MFC; Cooper, Al; James, SL. Nature 527(7577), pp.216

France/Argentine/Irlande/
Royaume-Uni/Allemagne/France

6	460 CITATIONS Substantial global carbon uptake by cement carbonation (2016) Xi, F; Davis, S; Ciais, P; Crawford-Brown, D <i>et al.</i> Nature Geoscience 9(12), pp.880	Chine/États-Unis/France
7	368 CITATIONS Fast, Ambient Temperature and Pressure Ionothermal Synthesis of Three-Dimensional Covalent Organic Frameworks (2018) Guan, XY; Ma, YC; Li, H; Yusran, Y; Xue, M; Fang, QR; Yan, YS; Valtchev, V; Qiu, SL., Journal of The American Chemical Society, 140(13) pp.4494-4498	Chine/États-Unis/France
8	335 CITATIONS Hydrolytically stable fluorinated metal-organic frameworks for energy-efficient dehydration (2017) Cadiou, A; Belmabkhout, Y; Adil, K; Bhatt, PM; Pillai, RS; Shkurenko, A; Martineau-Corcos, C; Maurin, G; Eddaoudi, M. Science, 356(6339) 731-735	France/Arabie Saoudite
9	301 CITATIONS Negative emissions physically needed to keep global warming below 2 °C (2015) Gasser, T; Guivarch, C; Tachiiri, K; Jones, CD; Ciais, P. Nature Communications, 6:7958	France/Japon/ Royaume-Uni
10	230 CITATIONS Best practices for experiments and reporting in photocatalytic CO ₂ reduction (2023) Bonchio, M; Bonin, J; Ishitani, O; Lu, TB; Morikawa, T; Robert, M et al. Nature Catalyist 6(8) 657-665	France/Italie/Japon/Allemagne/ Royaume-Uni/Chine/États-Unis

ANNEXE 4 : LISTE DES PERSONNES INTERVIEWÉES AU COURS DE CETTE ÉTUDE

ENTRETIENS AVEC LES ACTEURS SCIENTIFIQUES

PERSONNES INTERROGÉES	FONCTION
Fabrice Lemoine	Professeur (Université de Lorraine, LEMTA) ; coordinateur du PEPR SPLEEN
Antonio Pires Da Cruz	Responsable de Programme IFPEN ; coordinateur du PEPR SPLEEN
Vincent Artero	Directeur de Recherches CEA ; Directeur du LCBM
Marc Robert	Professeur (Sorbonne Université, IPCM)
Thibault Cantat	Directeur de Recherches CEA (NIMBE) ; actuellement à l'ANR
Xavier Arnauld de Sartre	Directeur de Recherches CNRS (ISTerre) ; coordinateur du PEPR Sous-Sol
Pascale Benezeth	Directeur de Recherches CNRS (GET)
David Farruseng	Directeur de Recherches CNRS (IRCELYON)
Sabine Rode	Professeur (Université de Lorraine, LRGP)

ENTRETIENS AVEC LES ACTEURS NON SCIENTIFIQUES

PERSONNES INTERROGÉES	FONCTION
Florent Guillou	Chef de projet, IFPEN
Isaline Gravaud	Responsable du programme CO ₂ , BRGM
Basile Goussard	Directeur Technique (CTO) NetCarbon
Vincent Piepiora	PDG Energo
Bernard Salha	Directeur R&D et Directeur technique EDF
Jean-Luc Reboul	CTO CO ₂ & Énergie, ArcelorMittal
Philipp Llewellyn	Conseiller pour le CO ₂ Techno Hub, TotalEnergies
Eric Bourdon	Directeur Général Adjoint, Vicat
Régis Réau	Ex-Directeur scientifique R&D, Air Liquide
Florence Delprat-Jannaud	Présidente du Club CO ₂ , IFPEN
Karima Benelhadj	Responsable sectorielle Chimie-Environnement, Bpifrance
Philippe Vercherin	Crédit Mutuel Impact
Hoang Bui	Coordinateur Hydrogène Décarboné et Décarbonation Industrielle, SGPI
Frédéric Branger	Chef de bureau des marchés carbone et de la décarbonation de l'industrie, DGEC
Solène Bouvier et Aude-Claire Houdon	ADEME
Ginette Vastel	Vice-Présidente France Nature Environnement



3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
01 44 96 40 00
www.cnrs.fr

