



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Définition et technologies existantes

Une grande diversité de technologies pour traiter le CO₂ issu d'installations fortement émettrices

La filière du captage et stockage du CO₂ (CSC) et de sa valorisation couvre l'extraction du dioxyde de carbone des installations fortement émettrices pour la production d'énergie (centrales à combustibles fossiles, notamment à charbon) ou la production industrielle (aciéries, cimenteries, etc.), sa purification et compression, son transport (par canalisations ou bateaux) vers des sites de stockage (on-shore et off-shore) et son injection de façon définitive et sûre dans des formations géologiques adaptées. Au lieu d'être stocké, le CO₂ peut également être valorisé en tant que matière première dans des procédés industriels.

LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES

La filière du CSC est une filière émergente avec différentes voies technologiques en cours de développement. Trois principales voies sont à distinguer pour le captage du CO₂, décrites plus en détail ci-dessous. Le transport et le stockage font appel à des compétences issues notamment des domaines des hydrocarbures et de l'exploitation du sous-sol. La valorisation, complémentaire au stockage, comprend une multitude de voies à maturité fortement variable.

Les trois principales techniques de captage

Le captage peut se faire selon trois principales voies : la post-combustion, l'oxy-combustion et la pré-combustion. Ces trois voies technologiques

sont applicables aux chaudières industrielles ou aux installations de production d'électricité :

- **le captage en post-combustion** vise à séparer le CO₂ des rejets gazeux issus de la combustion à l'aide de technologies d'absorption, d'adsorption, de cryogénie, de cycle calcium et de séparation membranaire ;
- **le captage par oxy-combustion** consiste à réaliser une combustion en absence d'azote afin que les fumées de combustion soient riches en CO₂. L'oxygène nécessaire pour

cette voie est produit soit de manière conventionnelle, soit apporté par combustion en boucle chimique (voir infra), la séparation étant ensuite opérée par dépressurisation ;

- **le captage en pré-combustion** consiste à produire un combustible qui ne contient pas de carbone : le combustible fossile primaire est transformé en gaz de synthèse composé d'hydrogène et de CO₂. Le CO₂ est alors séparé de l'hydrogène. L'hydrogène peut ensuite être brûlé pour produire de l'électricité ou utilisé dans la synthèse chimique ou la production de carburants.

Zoom : Combustion en boucle chimique

La technologie de combustion en boucle chimique dite CLC (« Chemical Looping Combustion »), permet de s'affranchir de l'étape de séparation de l'oxygène de l'air, coûteuse en énergie.

L'apport d'oxygène est réalisé via un oxyde métallique, alternativement oxydé à l'air et réduit par le combustible, l'oxygène est directement converti en CO₂ et en eau.

En partenariat avec Total Gaz et Énergies Nouvelles, IFP Energies nouvelles a conçu et réalisé une unité pilote CLC, où il met en œuvre son expertise des lits fluidisés. Ces travaux doivent conduire, à brève échéance, au dimensionnement d'une unité de démonstration.

Autres solutions technologiques de captage

L'application du captage du CO₂ à des secteurs industriels tels que la sidérurgie, la pétrochimie ou la production de ciment nécessite l'adaptation des technologies et équipements pour répondre aux particularités des installations émettrices utilisées dans ces secteurs.

A titre d'exemple, une des voies technologiques prometteuses permettant de réduire les émissions de CO₂ de la sidérurgie consiste en la mise en place d'un procédé de recyclage des gaz de haut fourneau et de captage de CO₂.

Aujourd'hui, les efforts de développement et de déploiement portent sur l'ensemble des voies de captage qui font face à des enjeux technologiques importants. Outre les enjeux propres à chaque voie



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

(comme par exemple l'adaptation de la post-combustion au régime flexible de la centrale électrique, l'optimisation de la combustion à l'oxygène pour la voie de l'oxy-combustion et le développement de turbines à hydrogène pour la pré-combustion), il s'agira notamment de tester les technologies à grande échelle et de réduire leur consommation énergétique (« pénalité énergétique »).

Différentes technologies dites de « première génération » sont actuellement testées dans le cadre de projets démonstrateurs (absorption, adsorption, production d'oxygène pour l'oxy-combustion, etc.).

D'autres technologies (de deuxième génération) sont étudiées et développées telles que le captage en post-combustion par anti-sublimation (givrage – dégivrage des gaz).

Les principales technologies utilisées pour le transport du CO₂

Le transport du CO₂ s'appuie sur les technologies et procédés mis en œuvre dans des secteurs connexes qui concernent l'acheminement d'hydrocarbures (et notamment du gaz naturel sous pression) ou le traitement et le transport de gaz industriels. Les efforts de recherche et développement sont ainsi moindres que pour le captage et le stockage du CO₂, des canalisations de transport de CO₂ existent par ailleurs d'ores et déjà (chaque année, environ 3 000 km de canalisations transportent près de 50 000 000 t de CO₂, essentiellement aux États-Unis¹).

Les principaux axes de recherche concernent l'adaptation des matériaux au transport de flux de CO₂ supercritique et contenant un très faible niveau de substances annexes, les effets accidentels liés à la perte de confinement d'une canalisation de transport, ainsi que les méthodes et équipements de surveillance des réseaux de transport.

Les principales technologies utilisées pour le stockage du CO₂

Le stockage fait appel à des compétences relatives à l'exploration et l'exploitation du sous-sol. Trois principaux types de formations géologiques sont susceptibles d'accueillir le CO₂ capté : les aquifères salins profonds, des gisements de pétrole ou de gaz naturel épuisés et les veines de charbon profondes inexploitées et inexploitable. L'évaluation des capacités de stockage mondiales reste à entreprendre. Il s'agira de valider et d'affiner des premières estimations indiquant actuellement un potentiel de stockage (notamment dans les aquifères salins profonds) équivalent à 250

– 500 fois les émissions mondiales annuelles de CO₂.²

Parmi les technologies nécessaires pour le stockage du CO₂ on peut notamment citer :

- **la caractérisation préalable des sites de stockage** : en faisant entre autre appel à des campagnes sismiques, des informations sur les caractéristiques des formations souterraines sont obtenues
- **la modélisation du comportement des gaz injectés** : il s'agit d'anticiper le comportement des flux de CO₂ injectés en les modélisant en fonction des caractéristiques du site de stockage
- **les différents procédés d'injection** : l'injection inclut également le forage, la mise en place de tubages et la cimentation
- **la surveillance des sites de stockage à long terme** : mise en place de capteurs de détection in-situ et à la surface, techniques de modélisation 3D à long terme

Les principales voies de valorisation du CO₂

Il y a de nombreuses voies de valorisation en fonction de l'utilisation prévue de la molécule de CO₂ : utilisation directe sans transformation, transformation chimique, transformation biologique. Au sein de ces trois segments, une douzaine de voies de valorisation ont été identifiées comme indiqué dans la figure n°2.

De manière générale, la valorisation se développe en complément au stockage de CO₂, sachant que le potentiel de ce marché apparaît, à ce stade, inférieur à celui associé au stockage de CO₂. Les différentes voies de valorisation mettent en œuvre des technologies et procédés propres à chaque voie. Certains axes de recherche transversaux peuvent néanmoins être cités :

- développement de catalyseurs performants pour l'activation de la molécule de CO₂
- la maîtrise des réactions thermochimiques
- la production décarbonée d'hydrogène

¹ <http://www.metstor.fr/>

² AIE, Technology Roadmap CCS, 2009



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

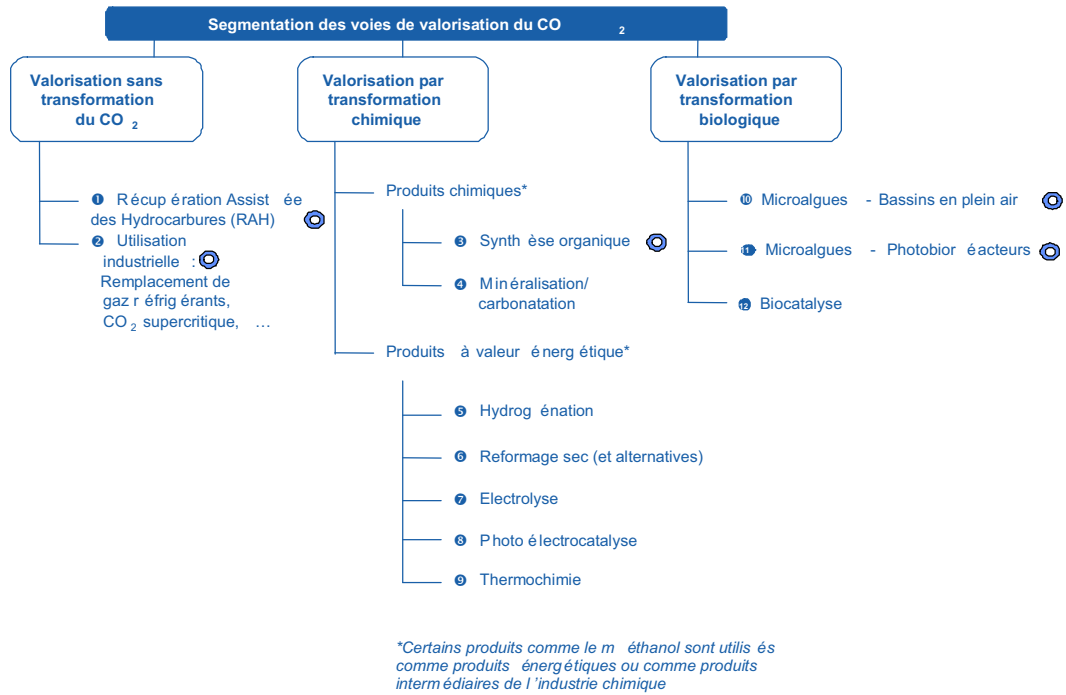


Figure 1 : Etude ADEME (réalisée par Alcimed) - Panorama des voies de valorisation du CO₂, 2010

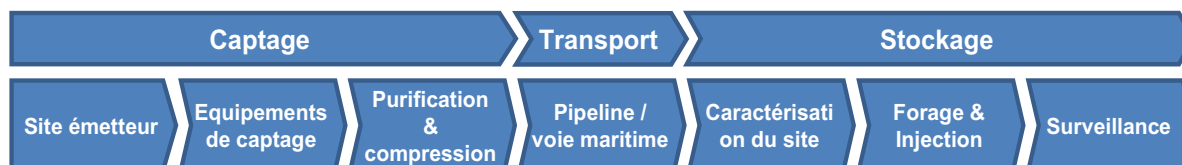


7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Chaîne de valeur

Du captage du CO₂ jusqu' à la surveillance des sites de stockage

DU CAPTAGE AU STOCKAGE DU CO₂ – PRINCIPALES SOUS-ETAPES DE LA CHAÎNE DE VALEUR



Captage du CO₂ – de l'identification du site émetteur jusqu'au conditionnement du CO₂ à des fins de transport

Lors du captage du CO₂ - première étape de la chaîne de valeur - il s'agit d'évaluer pour le site émetteur l'opportunité de mise en place d'une solution de captage et de choisir la plus adaptée.

La mise en place des équipements de captage nécessite des modifications majeures du site et des procédés concernés, soit en amont de la combustion (voies de l'oxy – et pré – combustion, la dernière n'étant pas applicable à un site existant), soit en aval sur les rejets gazeux de l'installation (voie de la post-combustion).

Le déploiement du captage peut également être lié à une réorganisation complète du procédé comme dans la sidérurgie avec la mise en place d'une boucle de recyclage des gaz du haut fourneau.

Les études et débats sur la capacité d'un site émetteur à accueillir un dispositif de captage du CO₂ ont conduit à définir le concept de prêt-à-capter (« capture ready »).

Après la séparation du flux de CO₂ des rejets gazeux du site, des étapes de purification et compression sont nécessaires préalablement à l'acheminement vers le site de stockage. Des substances annexes captées sont séparées du CO₂ et ce dernier est comprimé afin d'être transporté à l'état supercritique.

Transport du CO₂

Le transport du CO₂ se fait soit par canalisation soit par navire, et s'appuie sur des technologies existantes. En cas de déploiement commercial réussi et massif de la filière, les infrastructures de transport nécessiteront d'être adaptées afin de permettre leur maillage et la mutualisation de leur usage par plusieurs émetteurs et/ou stockeurs.

Le transport du CO₂ à l'état supercritique par canalisation est la voie privilégiée aujourd'hui. En cas de longues distances entre le site émetteur et le site de stockage, des navires semblables à ceux transportant du gaz de pétrole liquéfié peuvent également être utilisés.

Stockage du CO₂ – de la caractérisation des sites potentiels jusqu'à la surveillance du CO₂ injecté

Le choix d'un site de stockage nécessite au préalable un important travail de caractérisation. Il s'agit, conformément à la directive européenne 2009/31/CE relative au stockage géologique du dioxyde de carbone, d'identifier et de caractériser des formations géologiques propices au stockage du CO₂ de façon permanente et ne présentant pas de risque significatif de fuite ni de risque significatif pour l'environnement ou la santé.

Les données collectées et traitées doivent permettre de construire un modèle géologique (statique et dynamique) du site ciblé. Ce modèle est utilisé pour évaluer l'aptitude du site à accueillir du CO₂ en vue de son stockage pérenne, puis, si le site est retenu, comme outil de gestion du stockage.

Dans le cadre du permis exclusif de recherches, des forages d'exploration et des essais d'injection de CO₂ peuvent être nécessaires pour obtenir des données nécessaires à la caractérisation des sites de stockage. Pour les sites de stockage confirmés pour lesquels l'opérateur a obtenu l'autorisation d'exploiter délivrée par l'administration, le CO₂ capté en amont peut être injecté.

L'évolution du site de stockage est suivie grâce à un plan de surveillance détaillé mis en place par l'opérateur. Le plan de surveillance, dernière étape de la chaîne de valeur, couvre les périodes de l'exploitation, de la fermeture et de la « post-fermeture ».



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Le contexte réglementaire

Un cadre législatif et réglementaire prenant notamment appui sur la directive européenne sur le stockage géologique du CO₂

LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE

EUROPEEN

La directive européenne 2009/31/CE relative au stockage géologique du dioxyde de carbone (2009/31/CE) du 23 avril 2009 joue un rôle moteur en Europe.

Cette directive établit un cadre juridique pour le stockage géologique sûr et pérenne du dioxyde de carbone sur le territoire des Etats membres, leurs zones économiques exclusives et leurs plateaux continentaux. Elle prévoit qu'une formation géologique ne peut faire l'objet d'un permis de stockage que si le demandeur démontre que dans les conditions d'utilisation envisagées, il n'existe ni risque de fuite, ni risque pour l'environnement ou la santé humaine. Pendant l'exploitation, l'exploitant procède à la surveillance des installations et de la formation géologique. Le permis de stockage fait l'objet d'un réexamen périodique tous les 5 ans puis tous les 10 ans. Cet examen peut éventuellement conduire au retrait du permis. Enfin, l'exploitant doit apporter des garanties financières d'un montant suffisant pour assurer que toutes les obligations découlant du permis délivré peuvent être remplies. Au terme de l'exploitation et après une période de postfermeture qui ne peut être inférieure à 20 ans, le site est transféré à l'Etat qui devient responsable de la surveillance et de la mise en œuvre éventuelle de mesures correctives. Préalablement à ce transfert, outre le versement d'une contribution financière à l'Etat, l'exploitant doit notamment démontrer que le dioxyde de carbone restera confiné parfaitement et en permanence. Cette directive doit être transposée dans le droit national des Etats membres.

LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE

NATIONAL

« Loi Grenelle 1 » - Loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement du 03 août 2009

L'article 22 de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (« Loi Grenelle 1 ») prévoit que « (l) le captage et le stockage du dioxyde de carbone seront soutenus par l'organisation d'un cadre juridique adapté et l'allocation de financements particuliers. ».

L'article 19 de cette même loi prévoit que « (t)out projet de construction d'une centrale à charbon

devra être conçu pour pouvoir équiper celle-ci, dans les meilleurs délais, d'un dispositif de captage et stockage du dioxyde de carbone. Aucune mise en service de nouvelle centrale à charbon ne sera autorisée si elle ne s'inscrit pas dans une logique complète de démonstration de captage, transport et stockage du dioxyde de carbone. »

« Loi Grenelle 2 » - Loi portant engagement national pour l'environnement du 12 juillet 2010

Les dispositions de niveau législatif de la directive 2009/31/CE ont été transposées dans le cadre de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement («Loi Grenelle 2»).

L'article 80 détaille, conformément aux dispositions de la directive 2009/31/CE, les dispositions relatives à la recherche de formations souterraines aptes au stockage géologique de dioxyde de carbone

L'article 256 donne habilitation au gouvernement pour adopter toutes mesures de modification de la partie législative du code de l'environnement afin d'en adapter les dispositions au droit communautaire de l'air et de l'atmosphère et de la prévention des pollutions et des risques. L'ordonnance n° 2010-1232 du 21 octobre 2010, ratifiée par la loi n°2011-12 du 5 janvier 2011 a été prise sur la base de cette habilitation. Ses articles 5 à 9 transposent les dispositions de niveau législatif de la directive 2009/31/CE relative à l'exploitation des sites de stockage et à l'accès des tiers.

Ces dispositions ont été codifiées dans les sections 5 (recherche de site de stockage) et 6 (exploitation et accès des tiers) du chapitre IX du titre II du livre II du code de l'environnement relatif à l'effet de serre.

L'encadrement des installations de stockage géologique du dioxyde de carbone se fonde d'une part sur la législation des « installations classées pour la protection de l'environnement » (ICPE) pour réglementer l'exploitation des sites de stockage géologique de dioxyde de carbone et d'autre part sur le code minier (en cours de modification par ailleurs) pour l'encadrement des activités d'exploration et l'attribution de droits patrimoniaux (permis exclusif de recherche et concession de stockage). La transposition de la directive 2009/31/CE est en cours de finalisation. Un décret en Conseil d'Etat transposera les dispositions de niveau réglementaire.



Les marchés

Un marché à très fort potentiel à l'échelle mondiale et des territoires français mobilisés pour participer au développement d'une offre française

LE MARCHÉ MONDIAL

Le captage et stockage du CO₂ est aujourd'hui considéré comme une voie potentiellement majeure de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'exploration de cette voie est assez récente et liée à la prise de conscience des effets du réchauffement climatique et aux engagements internationaux associés.

Les véritables programmes de recherche n'ont vu le jour qu'au début des années 1990. Les premières réflexions structurantes sur le potentiel de la filière ont eu lieu au niveau international, avec notamment le programme « gaz à effet de serre » de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).³ Fin 2005, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publiait également un rapport de référence sur le sujet.⁴

Différents scénarii et projections soulignent le fort potentiel du captage et stockage de CO₂ en cas de déploiement commercial réussi. L'AIE estime qu'en 2050 le CSC peut contribuer à hauteur de 19% aux réductions des émissions annuelles de CO₂ à l'échelle mondiale (figure n°3), ce qui représenterait une contribution plus importante que celle imputable à l'ensemble des filières d'énergie renouvelable.

La Commission Européenne indique qu'en 2030 les émissions de CO₂ évitées grâce au CSC pourraient représenter environ 15% des réductions requises dans l'Union.⁵

Les enjeux économiques sont considérables : d'après l'AIE, sans utilisation du CSC, le coût de la division par deux des émissions mondiales d'ici 2050 augmenterait de 70%. Le potentiel de marché mondial du CSC en 2030 est estimé par le Boston Consulting Group à 120 Milliards d'euros par an (captage de 4 Gt/an à 30€/t).⁶

La filière est déjà devenue une première réalité économique aujourd'hui avec cinq sites intégrés, de taille commerciale, dans le monde (Sleipner et Snohvit en Norvège, In Salah en Algérie, Rangely et Weyburn-Midale en Amérique du Nord) et environ 70 projets en cours. Un engagement financier international de 26 à 36 milliards de dollars pour le soutien à de nouveaux projets est recensé par l'AIE en juin 2010.⁷

Une analyse des différentes collaborations internationales permet d'identifier les acteurs les plus fortement impliqués, tels que les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie ou encore la Norvège. La Chine affiche un intérêt marqué à la fois pour le stockage et la valorisation du CO₂, dans un contexte d'utilisation massive de charbon.

LE MARCHÉ FRANÇAIS

En France, à partir des émissions actuelles du secteur de la production d'électricité et des secteurs industriels (sidérurgie, cimenterie, raffinerie et autres), on estime que le volume concerné pourrait approcher les 80 Mt de CO₂/an. Le CSC pourrait permettre d'éviter environ 1 Gt de CO₂ entre 2020 et 2050, ainsi que quelques dizaines de millions de tonnes par an à long terme.⁸

Les intérêts français portent essentiellement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone provenant d'installations industrielles les plus émettrices pour lesquelles il n'existe pas ou peu d'alternatives techniques (aciéries, raffineries, cimenteries).

Le développement et déploiement du CSC favoriseront également le maintien et la création d'emplois dans les bassins industriels concernés. Les emplois directs associés aux secteurs industriels fortement émetteurs (acier, ciment, chaux et plâtre) se chiffrent à environ 60 000 aujourd'hui.

³ AIE, Greenhouse Gas R&D Programme, <http://www.ieaghg.org/index.php?/about-us.html>

⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « Piégeage et stockage du dioxyde de carbone », 2005

⁵ Directive européenne 2009/31/CE

⁶ BCG, « Développer les éco-industries en France », 2008

⁷ AIE/Carbon Sequestration Leadership Forum, « CCS Progress & Next Steps », 2010

⁸ IFP, Projet SocECO₂, 2010



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

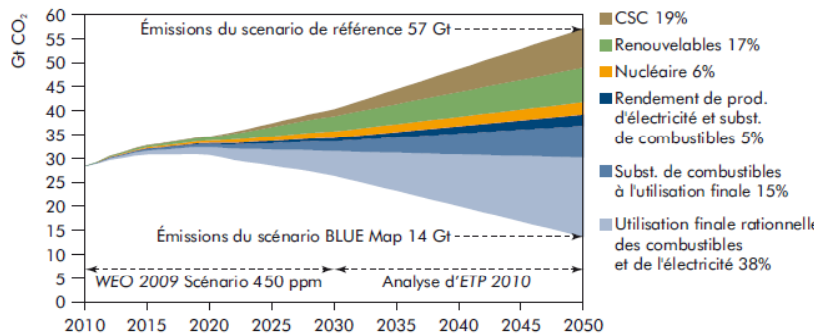


Figure 2 : Options de réduction des émissions de CO₂, 2010-2050 (source AIE)

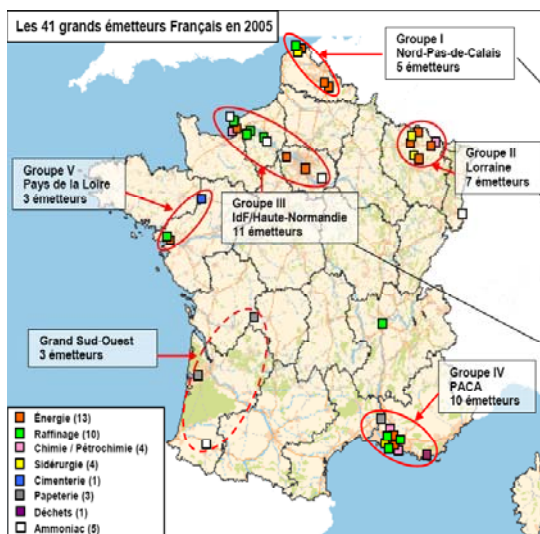


Figure 3 : Les 41 grands émetteurs français en 2005 (source IFPEN, SocECO2)

Quatre territoires particulièrement investis dans cette filière

Les travaux menés sous l'égide de l'ADEME fin 2010 sur la feuille de route technologique de la filière ont permis de mettre en avant quatre territoires particulièrement investis dans la filière :

- Pour le **Béarn**, c'est un élément du plan de reconversion industrielle dans la vallée du Gave de Pau, Pyrénées Atlantiques (64). Le projet pilote CSC intégré de TOTAL (voir infra), en partenariat avec AIR LIQUIDE, contribue à la redéfinition de la plateforme de Lacq comme centre de formation et de recherche. Des structures comme le pôle de compétitivité AVENIA, la structure de reconversion industrielle CHEMPARC et l'association APESA travaillent sur le sujet, en collaboration avec les compétences reconnues d'une part des entreprises comme Total et Air Liquide, et d'autre part l'Université de Pau et IFP Energies nouvelles.

- La zone s'étalant de la **vallée de la Seine jusqu'au Havre** est également fortement impliquée dans le développement du CSC. Les capacités de stockage sont étudiées dans le cadre du projet « FranceNord », soutenu par l'ADEME. La communauté de communes du Havre met en œuvre depuis plusieurs années une stratégie de développement du Port et de la zone industrielle associée dans laquelle le CSC peut jouer un rôle important. La création de la Chaire Industrielle de Recherche sur le CO₂ de Mines-ParisTech, avec l'appui de l'Université du Havre et de la majorité des établissements compétents au niveau national, et à laquelle contribuent de grands industriels français ainsi que la région du Havre (via le Grand Port Maritime, la Ville et la CODAH), montrent l'importance accordée par ce territoire à cette technologie.
- **La Lorraine** pourrait accueillir le seul projet au monde de démonstration industrielle du CSC pour la sidérurgie. Prévu à Florange, il est porté par ArcelorMittal et fait suite au programme de recherche « ULCOS » (Ultra-Low CO₂ Steelmaking, voir infra). L'importance de cette industrie dans la région et pour le pays est historique et reconnue au plus haut niveau.
- **Le Grand Port Maritime de Marseille** s'est engagé dans une stratégie globale de réduction des émissions de CO₂ sur la Zone Industrielle Portuaire (ZIP) de Fos-Lavéra. Dans le cadre de cette stratégie de réduction, quatre axes de diminution massive des volumes de CO₂ émis (récupération assistée de pétrole, bio remédiation du CO₂ avec production d'algues, valorisation du CO₂ pour des applications industrielles, stockage géologique du CO₂) sont étudiés.



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Le projet de TOTAL à Lacq

Depuis janvier 2010, TOTAL opère à Lacq, dans le sud-ouest de la France, un projet intégré de captage-transport-injection de CO₂. Celui-ci est capté à la sortie d'une chaudière modifiée de la plate-forme industrielle de Lacq, transporté par pipe sur 27 km et injecté à 4500 mètres de profondeur dans le gisement de gaz de Rousse qui est en fin de vie. Pendant la durée du pilote, plusieurs milliers de tonnes de CO₂ seront captées et stockées. L'objectif du pilote est de tester, en vue d'applications à plus grande échelle sur d'autres opérations, le captage par oxycombustion et le stockage dans un gisement de gaz épuisé.

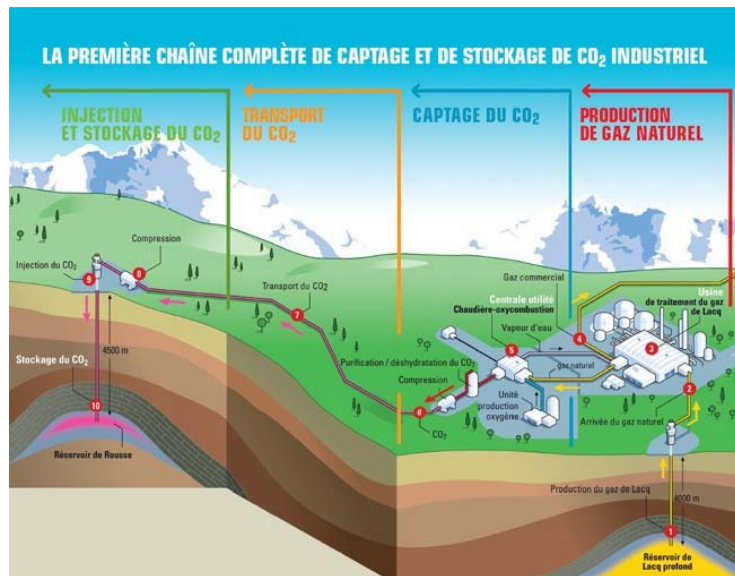


Figure 4 : Projet CSC de TOTAL à Lacq (source TOTAL)

Le programme de recherche européen « ULCOS »

Le site web dédié au programme résume son contenu de la manière suivante :⁹

« ULCOS est l'abréviation d'Ultra-Low Carbon dioxide (CO₂) Steelmaking, ce qui signifie « Processus sidérurgiques à très basses émissions de CO₂ ». Il s'agit d'un consortium de 48 entreprises et organisations issues de 15 pays européens, réunies au sein d'une initiative de coopération en R&D afin de réduire de manière drastique les émissions de dioxyde de carbone liées à la production d'acier. Ce consortium regroupe toutes les principales entreprises sidérurgiques de l'Union européenne, ainsi que des partenaires du secteur de l'énergie et de l'ingénierie, des instituts de recherche et des universités. Il est soutenu par la Commission européenne.

L'objectif du programme ULCOS est de réduire les émissions de CO₂ d'au moins 50 % par rapport aux méthodes de production actuelles les plus performantes. »

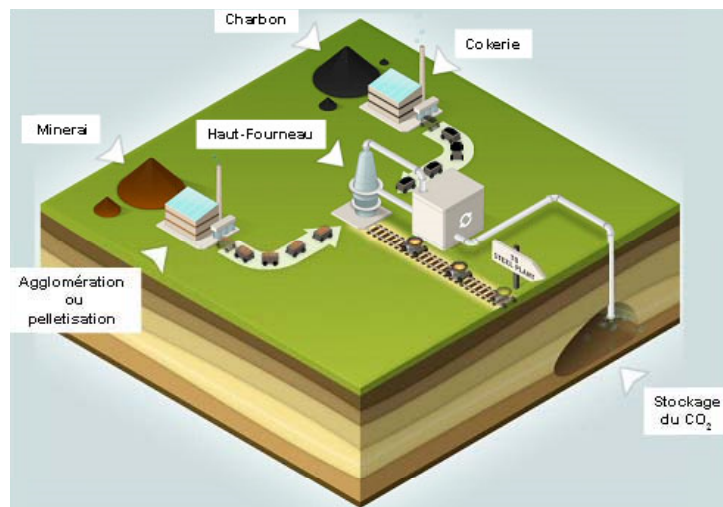


Figure 5 : Captage & stockage du CO₂ appliqué à la production d'acier⁹

Le projet porté par ArcelorMittal, associant un consortium de sidérurgistes européens, fait suite aux travaux du programme ULCOS et vise à déployer une des technologies identifiées sur le site de Florange en Lorraine.

⁹http://www.ulcos.org/fr/about_ulcos/home.php



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

MODELE ECONOMIQUE

Le niveau d'incitation venant des marchés carbone (prix du quota de CO₂) n'apparaît pas suffisant aujourd'hui. Par ailleurs, les dispositifs publics existants de soutien à la filière (PEER, NER 300) pour le financement de démonstrateurs à taille commerciale de CSC ne pourront financer (partiellement) qu'un nombre limité de projets.

Une des priorités d'action pour permettre à moyen terme le développement de la filière est aujourd'hui d'identifier des modèles économiques adaptés à cette activité.

Parmi les hypothèses fréquemment évoquées dans les instances communautaires et internationales, on peut citer :

- un tarif d'achat de l'électricité décarbonée,
- la réduction de la quantité de quotas alloués dans le cadre du dispositif ETS européen
- un système de bonus-malus
- une taxe dédiée
- ou encore des standards de performance en g CO₂/kWh



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Les acteurs de la filière

Des acteurs industriels français maîtrisant l'ensemble de la chaîne de valeur

LES ACTEURS INDUSTRIELS

Les acteurs français sont aujourd'hui capables de couvrir l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur, en fournissant des équipements et services à haute valeur ajoutée tout au long de la chaîne.

Différents types d'acteurs interviennent : les opérateurs de sites émetteurs ont recours à des ingénieries et fournisseurs de solutions techniques pour équiper leurs sites ; en aval des opérateurs avec des compétences de domaines connexes comme le pétrole interviennent. Des prestations sur mesure (fourniture d'équipements et de technologies, conseil, support R&D, analyse des risques) sont fournies par de plus petites structures (PME/PMI/ETI).

Le captage

Les industriels émetteurs

Ils interviennent sur la première étape de la chaîne de valeur en tant qu'émetteurs, mais peuvent également intégrer les autres étapes en tant qu'intégrateur. C'est notamment le cas :

- des énergéticiens (comme EDF et GDF SUEZ)
- des industriels (comme ARCELORMITTAL ou LAFARGE)

Équipementiers / ingénieries

Les équipements et procédés pour le captage, la purification et la compression du CO₂ sont essentiellement fournis par des acteurs se positionnant en tant que prestataires « EPC » (engineering, procurement, construction) comme ALSTOM ou fournisseurs de technologies comme AIR LIQUIDE ou PROSERNAT.

Opérateurs aval

Le transport et le stockage

Les acteurs du monde pétrolier se positionnent sur ces segments, en s'appuyant sur leurs compétences historiques, et en associant des prestataires pour la fourniture d'équipements de mesure, la

modélisation des gaz et la caractérisation du sous-sol, des organismes de conseil et de support R&D. On retrouve ainsi sur ces segments des acteurs comme TOTAL, SCHLUMBERGER ou TECHNIP.

Les acteurs de la valorisation

De nombreux acteurs français se positionnent sur la valorisation du CO₂. C'est le cas de grands groupes industriels tels que TOTAL ou AIR LIQUIDE, présents sur des voies matures comme la récupération assistée de pétrole ou l'utilisation industrielle du CO₂, ou encore RHODIA qui s'intéresse entre autres à la production de méthanol par hydrogénation.

Des PME/PMI/ETI fournisseurs de technologies et de services tout au long de la chaîne de valeur

Les PME/PMI/ETI ont un rôle important à jouer avec une valeur ajoutée tout d'abord sur la fourniture d'études et d'équipements spécifiques (exemples : SETARAM & IMAGEAU pour l'instrumentation notamment du stockage).

Elles sont également présentes sur l'analyse des risques et la gestion transversale de projet, épaulant ainsi un futur intégrateur (exemples : GEOGREEN et OXAND avec une activité développée spécifiquement pour cette filière), ou encore sur la conception de sites et l'analyse du sous-sol.

Enfin elles proposent des prestations « sur mesure » et innovantes.

Aujourd'hui, il n'y a qu'un nombre limité de PME/PMI/ETI visibles au sein de la filière du CSC, alors qu'un nombre important de sociétés est présent dans les domaines connexes en termes de compétences requises comme le pétrole, la métrologie et l'environnement.

Ces PME/PMI/ETI ont un véritable rôle à jouer dans la structuration du futur tissu industriel, en étroite collaboration avec les pôles de compétitivité.



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

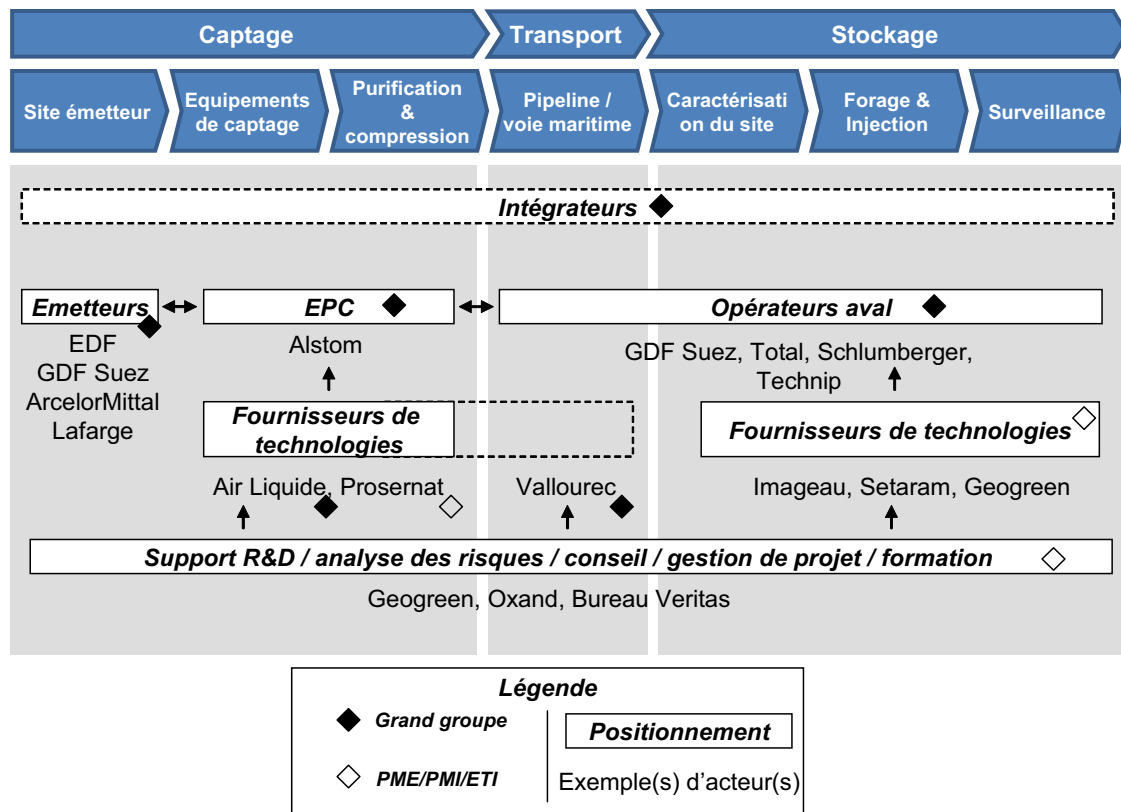


Figure 6 : Acteurs industriels français – exemples et schématisation du positionnement

AUTRES ACTEURS

L'association des acteurs de la filière : le Club CO₂

Le Club CO₂ est né en 2002 à l'initiative de l'ADEME, avec l'appui d'IFP Energies nouvelles et du BRGM qui assurent son secrétariat. Il regroupe aujourd'hui les principaux acteurs de la filière.

Les pôles de compétitivité

AVENIA, un pôle de compétitivité d'Aquitaine, s'intéresse aux énergies du sous-sol et regarde ainsi notamment le maillon du stockage du CO₂. Les pôles AXELERA et RISQUES sont également fortement engagés dans la filière du CSC. TRIMATEC situé dans le sud-est, est un pôle de compétitivité s'intéressant au captage. Cet acteur travaille sur la séparation membranaire de gaz, notamment sur le captage du CO₂ issu de la combustion du carbone.

La communauté scientifique

Parmi les EPST et les Universités les plus impliqués dans cette filière, on peut citer : CNRS, INRA, Mines Paris-Tech, Nancy, Paris (IPGP), Grenoble, Montpellier, Pau, Toulouse, Le Havre, Bordeaux, Lyon, Orléans, Metz, Strasbourg.

Le BRGM et IFP Energies nouvelles sont fortement impliqués dans la filière (voir page suivante « R&D innovation »).

La coopération internationale

La dimension internationale de la filière du CSC s'explique avant tout par l'enjeu d'ordre mondial que représente la lutte contre le réchauffement climatique, ainsi que par sa proximité avec des secteurs industriels fortement internationalisés, en particulier celui de l'énergie. De plus, les centrales de production d'énergie à base de combustibles fossiles et les sites industriels, tels que les cimenteries ou aciéries, sont des unités émettrices de CO₂ fortement déployées à l'échelle internationale. Il s'agit d'une filière émergente avec des barrières financières et sociétales importantes nécessitant d'avoir recours à une mutualisation des efforts et des risques. Les coopérations internationales servent donc de plateforme de promotion permettant aux États impliqués de mettre



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

en avant les compétences des acteurs nationaux dans une logique de positionnement sur le futur marché mondial.

De nombreuses initiatives internationales ont ainsi vu le jour au cours des dernières années. La liste ci-dessous donne un premier aperçu des principales initiatives, quelles soient européennes ou internationales, qui ont été mises en place.

Europe :

- EU Zero Emissions Technology Platform for - Fossil Fuel Power Plants (ZEP)
- European Industrial Initiative on CCS (CCS EII)
- EU CCS Demonstration Project Network
- Berlin Forum – Sustainable Fossil Fuels Working Group

AIE :

- Working Party on Fossil Fuels (WPF) de l'AIE
- IEA Greenhouse Gas R&D programme
- Biennial Regulatory Review

- IEA Clean Coal Centre

Autres :

- Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)
- Global Carbon Capture & Storage Institute (GCCSI)
- Carbon Capture Use & Storage (CCUS) Action Group (Forum des Economies Majeurs)

Le rôle de la France au sein de ces initiatives internationales

La France participe aujourd'hui à ces initiatives. Cette participation est indispensable pour contribuer à la visibilité de la filière française à l'international et pour identifier des opportunités de marché.

La participation à l'ensemble de ces initiatives permet non seulement de suivre l'avancement de la filière à l'international, de présenter les activités françaises devant un cercle élargi de participants, de participer aux travaux de rédaction de feuilles de route et d'établir un réseau de contacts.



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

Recherche & développement et innovation

Une filière émergente avec de forts besoins de R&D

AXES DE RECHERCHE ET D'INNOVATION

Le captage et stockage du CO₂ et sa valorisation représentent une filière à caractère émergent avec aujourd'hui un nombre limité de projets intégrés, de taille commerciale, opérationnels dans le monde. La période de 2015 – 2025 est aujourd'hui ciblée pour la commercialisation des technologies utilisées et leur déploiement progressif. Parmi les principaux axes de recherche et d'innovation pour la mise en place de ces technologies on peut citer la réduction de la surconsommation énergétique du captage du CO₂, la maîtrise des substances annexes lors du transport des flux captés, la caractérisation des sites de stockage ou encore le développement de catalyseurs performants pour l'activation du molécule du CO₂ à des fins de valorisation. D'autres exemples de thématiques de recherche et d'innovation sont donnés ci-dessous :

Captage

- Le développement de nouvelles générations de procédés de captage, telles que la combustion en boucle chimique ou la voie cryogénique
- L'intégration énergétique des systèmes de captage dans le schéma global de la production d'énergie
- L'adaptation des procédés de captage à la variation de charge de la centrale électrique (flexibilité)
- Le développement de systèmes de captage spécifiques pour les procédés industriels fortement émetteurs - secteur sidérurgique
- La purification et déshydratation du CO₂

Transport

- Méthodes de détection de fuites
- Modélisation de la dispersion du flux de CO₂ dans l'atmosphère en cas de fuite

Stockage

- Modélisation géologique et dynamique des sites de stockage
- Choix des matériaux pour la construction des puits d'injection

- Développement de techniques et méthodes de surveillance à long terme à coûts compétitifs
- Capacités et défis propres au stockage en aquifères salins
- Perceptions et attentes sociales, communication et éléments pédagogiques associés

EXEMPLES D'ACTEURS

IFP Energies nouvelles (IFPEN)

Les travaux conduits par IFPEN en matière de CSC visent à assurer la cohérence de la chaîne complète de captage, transport et stockage du CO₂, avec une forte volonté de participer à une opération de démonstration intégrée de la chaîne.

Fort de son expérience acquise dans le domaine des hydrocarbures, IFPEN travaille notamment sur les procédés de captage en post-combustion (amélioration des performances pour abaisser la pénalité énergétique) et en oxy-combustion (développement du procédé par boucle chimique), ainsi que sur le développement de modèles numériques et de techniques de surveillance pour le stockage de CO₂. A titre d'exemple, le simulateur « Coores » développé par IFPEN permet de modéliser le comportement hydrodynamique du CO₂ dans un milieu poreux.

IFPEN coopère avec les organismes de recherche SINTEF (Norvège) et TNO (Pays-Bas) dans le cadre de l'alliance « Tri4CCS » qui vise à garantir la sécurité et la faisabilité économique de la filière du captage, transport et stockage du CO₂.

BRGM

Le BRGM est l'établissement public de référence dans le domaine des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Ses actions s'articulent autour de 4 missions : recherche scientifique, appui aux politiques publiques, coopération internationale, sécurité minière.

Dans le domaine du CSC, le BRGM travaille sur une meilleure connaissance des aquifères profonds propices au stockage et l'évaluation de leur potentiel. Au-delà des aquifères profonds, les travaux du BRGM visent à mieux comprendre les conséquences physiques, bio-géochimiques et thermocinétiques de l'utilisation du sous-sol.



7-Captage stockage du CO₂ et valorisation

L'étude des critères de sécurité et des impacts environnementaux du stockage géologique du CO₂ constitue également une part importante de l'activité du BRGM.

Au niveau européen, le BRGM est fortement engagé dans la dynamique académique, notamment au travers du réseau « CO₂GeoNet » et dans le cadre de projets co-financés par le PCRD.

INERIS

Créé en 1990, l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS) est un établissement public qui a pour mission d'évaluer les risques pour l'homme et l'environnement liés aux installations industrielles, aux substances chimiques et aux exploitations souterraines.

Institut pluridisciplinaire, il regroupe aujourd'hui environ 600 personnes et travaille depuis fin 2002 sur les différents maillons de la filière du CSC. L'INERIS est actuellement engagé dans 8 actions de recherche et d'appui au niveau national et 3 projets européens sur ce thème. L'INERIS y met en œuvre plusieurs de ses compétences historiques, dont notamment la sécurité des installations industrielles, l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux, l'évaluation des risques liés à différents types de stockages souterrains.

LES PRINCIPAUX DISPOSITIFS DE SOUTIEN A LA R&D

ADEME

L'ADEME est un acteur de tout premier plan dans l'accompagnement et le financement de projets de recherche dans la filière du captage, stockage et valorisation du CO₂. Entre 2001 et 2009, plus de 20 projets de R&D ont été soutenus par des fonds de l'agence, et dans le cadre du Fonds Démonstrateur, trois démonstrateurs de recherche ont été financés en mai 2010.

La feuille de route technologique élaborée par l'ADEME avec un comité d'experts de la filière constitue un document de référence pour les acteurs en matière d'enjeux technologiques et visions de développement de la filière. La révision de cette feuille de route a été organisée et finalisée fin 2010.

ANR

Les 4 appels à projets de l'ANR des années 2005 à 2008 sur le captage & stockage de CO₂ ont permis de favoriser la constitution d'un tissu dense de recherche en la matière en France. Lors de ces appels à projets, 33 projets ont été financés à hauteur de 27 M€ et couvrant l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur. Le captage, stockage du CO₂ et sa valorisation ont été repris dans la programmation 2011 de l'agence au sein du programme « SEED » (systèmes énergétiques efficaces et décarbonés) avec un appel à projets clôturé début mai 2011.

INVESTISSEMENTS D'AVENIR

Les technologies de captage, transport, stockage et valorisation du CO₂ sont soutenues par les investissements d'avenir.

Dans le cadre du programme « Energie et économie circulaire » dotée de 3,6 Mds €, la filière est éligible à l'obtention de financement sur deux actions :

- la mise en place d'Instituts d'Excellence en matière Energies Décarbonées (« IEED »), dotée d'1 Mds €.
- la mise en place de « démonstrateurs & de plateformes technologiques en énergies renouvelables et décarbonées et chimie verte », dotée d'1,35 Mds €.

Contributeurs : Christian OESER, Lionel PERRETTE, Sabine CAVELLEC