

BILAN DES ACTIONS R&D DE L'ADEME POUR LA FILIÈRE CAPTAGE ET STOCKAGE DU CO₂

1. OBJECTIFS

Le dioxyde de carbone (CO₂) est considéré comme étant une des principales sources de l'augmentation de la température de l'atmosphère.

Pour réduire les émissions de CO₂, les techniques consistant à le capter et le transporter depuis les sources industrielles émettrices vers des sites de stockage souterrain sont une des solutions identifiées dans le récent rapport du GIEC («Climate Change 2014: Mitigation of climate change»). Elles pourraient contribuer à hauteur de 14%, à l'horizon 2050, aux réductions d'émissions mondiales de CO₂.

Depuis 2007, le CSC est un des programmes de la stratégie recherche de l'ADEME. Entre 2007 et 2013, ce programme a poursuivi 4 objectifs :

- ▶ **Favoriser l'émergence d'innovations** significatives sur le CSC ;
- ▶ **Développer l'offre technologique** nationale sur le CSC et renforcer sa base industrielle et économique ;
- ▶ **Expliciter et réduire les incertitudes** liées à son exploitation et mettre en place un environnement politique, économique, réglementaire propice à sa diffusion et appropriation par les acteurs industriels ;
- ▶ **Développer et consolider son intégration** technologique dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie manufacturière.

En 2011, l'ADEME a lancé l'appel à projets de R&D «STOCKCO₂» sur la faisabilité technique et la sécurité du stockage géologique de CO₂ et pour favoriser le déploiement de la technologie CSC.

Les axes principaux de ce programme sont :

- ▶ **Le développement et le test d'outils de surveillance** (qualitatif et quantitatif), en conditions réelles (ex. : site préindustriels, démonstrateurs de stockage géologique de CO₂, laboratoire expérimental sur site naturel ...),
- ▶ **La mise en place de technologies et méthodologies** pour répondre à des comportements non-conformes des sites de stockage en incluant des mécanismes d'intervention et de remédiation,
- ▶ **L'étude des impacts sanitaires et environnementaux** en cas de migration du flux de CO₂ du réservoir jusqu'à l'extérieur.

Par ailleurs, l'ADEME anime la thématique captage et stockage du CO₂ au travers du Club CO₂, lieu de concertation des acteurs de la recherche et de l'industrie sur ce domaine.

2. LE BILAN 2007/2013 SUR LE CAPTAGE ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO₂

Le bilan 2007-2013 des actions de recherche engagées par l'ADEME sur le captage et stockage géologique du CO₂ est résumé ci-dessous :

Budget estimatif cumulé 2007-2013	15 à 19 M€
Nombre projets R&D engagés	18
Budget cumulé	12 M€
Budget moyen des projets	676 K€
Aide cumulée	3,8 M€
Montant aide moyenne par projet	240 K€
Thèses sélectionnées	11

Les deux éditions de l'appel à projets « STOCKCO₂ » ont conduit à soutenir 5 projets de recherche.

LES PROJETS DÉMONSTRATEURS DE RECHERCHE

En 2007, les membres du Club CO₂ ont mis en évidence le besoin de financement pour mettre en œuvre des opérations «de démonstration de captage et stockage de CO₂ dans le contexte français». Le Grenelle de l'Environnement a également précisé dans ses conclusions la nécessité d'expérimenter le CSC.

Un fonds de soutien à la mise au point de démonstrateurs en nouvelles technologies de l'énergie (NTE) a alors été créé, dont la gestion a été confiée à l'ADEME. Dans ce cadre, en 2008, l'ADEME a lancé un appel à manifestation d'intérêt (AMI).

Suite à cet AMI, 4 projets démonstrateurs de recherche ont démarré en 2010 pour une aide globale de 38 M€ :

- ▶ **un projet intégré en contexte sidérurgique « TGR-BF »**, opéré par ArcelorMittal ;
- ▶ **un projet sur le stockage géologique du CO₂ « France Nord »**, opéré par Total et GDF SUEZ ;
- ▶ **un projet de captage en post-combustion par solvant amine « C2A2 »**, porté par EDF et Alstom ;
- ▶ **un projet de captage en post-combustion par antisublimation (givrage/dégivrage du CO₂) « Pil Ansu »**, porté par le consortium EDF, GDF Suez, Alstom et Armines. Ce dernier projet a été arrêté par le consortium fin 2010, suite à un surcoût non anticipé au démarrage du projet.

3. LES RÉSULTATS CLÉS OBTENUS SUR LA PÉRIODE 2007/2013

3.1 ETUDES TECHNICO-ÉCONOMIQUE OU DE PRÉFAISABILITÉ SUR LA FILIÈRE CSC

▣ Pour compléter les travaux de R&D, des études technico-économiques ou de préfaissabilité ont été conduites. Une étude, menée par EDF, Alstom et Gradient, compare les technologies de captage du CO₂ applicables aux futures centrales à charbon européennes et a souligné l'intérêt du procédé d'oxycombustion.

▣ Une autre, menée par Alstom et l'IFP Energies nouvelles, a tenté de dégager la meilleure solution pour le captage du CO₂ émis par les grandes centrales thermiques au charbon sous la forme d'un nouveau procédé intégré de combustion avec captage et stockage du CO₂. L'analyse multicritères réalisée montre que, compte tenu du développement technologique actuel, les deux procédés intégrés de captage sont très proches en particulier en termes de coût de l'électricité et coût de CO₂ évité. Par ailleurs, il est apparu que l'intégration du procédé de captage et de la compression du CO₂ avec la centrale permet un gain de 0,8 point de rendement dans le cas postcombustion et 0,6 point de rendement dans le cas oxycombustion.

▣ Des travaux sur deux bassins industriels ont été réalisés pour répondre à la problématique de la réduction des émissions atmosphériques de CO₂ d'origine anthropique de ces zones. Dans la région du Havre, une étude de préfaissabilité de l'implantation d'un démonstrateur mutualisé de captage, transport et stockage du CO₂ a été conduite. Un pré-dimensionnement technique et économique de l'ensemble de la chaîne a été réalisé. Pour le bassin industriel de la zone de Fos-Berre-Lavéra-Gardanne-Beaucaire, une étude technico-économique a permis d'étudier différentes solutions techniques pour la mise en place de la technologie CSCV. Les méthodologies et outils mis au point dans le cadre de cette étude ont vocation à être appliqués sur toutes problématiques de bassins industriels en France, en Europe et dans le monde.

3.2 RÉSULTATS OBTENUS SUR LE CAPTAGE DU CO₂

CAPTAGE EN POST-COMBUSTION

▣ Une nouvelle technique de captage du CO₂, soutenue par l'ADEME, a été développée au Centre d'Énergétique d'Armines et protégée par deux brevets. C'est une méthode de post traitement dont le procédé est basé sur l'anti-sublimation du CO₂ à pression atmosphérique sur une surface à basse température (de l'ordre de -120 °C) permettant de givrer (anti-sublimer) le CO₂ sur cette surface.

▣ Un projet de post-combustion, nommé CARGESE et mené par Atanor, l'IFP Energies nouvelles et Armines, a également permis de développer et mettre au point un procédé de captage du CO₂ en voie sèche, par absorbant calcique, en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre des chaudières industrielles d'une puissance comprise entre 50 et 300 MWth.

CAPTAGE EN OXYCOMBUSTION

Pour le captage en oxycombustion, deux aspects ont été étudiés :

- ▣ la maîtrise des risques des procédés d'oxycombustion avec recyclage des fumées en vue du captage du CO₂ ;
- ▣ le développement d'un procédé d'oxycombustion de 2^{ème} génération, le « Chemical looping » (boucle chimique en français).

▣ Le Chemical Looping est une des technologies de captage du CO₂ les plus prometteuses. Elle permet de capter le CO₂ émis par des installations neuves ou existantes tout en conservant une efficacité énergétique élevée. Un projet, mené par Alstom, a permis d'étudier le comportement hydrodynamique d'une installation Chemical Looping à l'aide de modélisation numérique et d'essais sur maquettes froides. L'objectif final est la conception d'un prototype de 1 MWt piloté par Alstom soutenu par le Fond de Recherche Charbon Acier (RFCAS).

3.3 RÉSULTATS OBTENUS SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂

SÉLECTION DES SITES DE STOCKAGE

▣ Une méthodologie permettant de sélectionner des sites géologiques et solutions techniques intégrées pour le stockage du CO₂ sur le territoire français (on et off-shore), a été élaborée. Le projet, coordonné par le BRGM, a permis de collecter des informations permettant de guider la présélection des sites de stockage, en s'appuyant sur un inventaire des données géologiques publiques disponibles des réservoirs potentiels et des émetteurs principaux de CO₂ en France. Les résultats obtenus ont été ensuite mis à disposition du public grâce à un système d'information géographique. Il est ouvert à la consultation depuis le mois de novembre 2008 à l'adresse : www.metstor.fr

ACQUISITION DE CONNAISSANCES POUR LA PÉRENNITÉ DES SITES DE STOCKAGE

▣ Un important programme de recherche sur le stockage géologique du CO₂, conduit par l'Institut de Physique du Globe de Paris, a bénéficié du soutien de l'ADEME et de deux industriels, Total et Schlumberger. L'objectif était d'étudier la stabilité et la pérennité d'un réservoir profond dans lequel on injectait du CO₂ afin d'acquérir les connaissances fondamentales nécessaires à la réalisation pratique et sûre du stockage géologique du CO₂ d'origine industrielle. Ce programme de recherche a en particulier permis des avancées dans les domaines du traçage et de la datation des divers événements affectant un site de stockage. Les mécanismes et constantes de temps, en impliquant ou non une dimension biologique du piégeage du CO₂ ont pu être étudiés et ainsi améliorer la connaissance du cycle du CO₂. Des développements ont été menés en terme de modélisation théorique et de caractérisation géophysique et géochimique des réservoirs et sites de stockage naturels.

▣ La bonne maîtrise de l'évolution de la perméabilité d'une roche réservoir lors de la phase d'injection de CO₂ est de première importance pour la pérennité économique et technologique d'un stockage géologique de CO₂. L'injectivité de la roche constitue un critère de premier ordre qui est susceptible d'évoluer dans la mesure

où des quantités importantes de CO₂ y seront injectées, conduisant notamment à un processus d'assèchement de l'aquifère profond ciblé.

Au travers d'une approche combinant développements théoriques et expérimentaux, le projet SALTCO, réunissant le BRGM, l'IFSTTAR et l'ENTPE, s'est attaché à développer des connaissances sur l'évolution de la perméabilité des roches réservoir suite à l'injection de CO₂, avec un intérêt particulier porté sur le phénomène de génération de pression de cristallisation.

SÉCURITÉ DES SITES DE STOCKAGE DE CO₂

Dans la perspective du déploiement à grande échelle de cette technologie, un des éléments clefs porte sur la surveillance à long terme des sites de stockage, dans une démarche intégrée de gestion des risques (comme rappelée dans la directive européenne 2009/31/EC, avril 2009). Cet aspect a été étudié dans trois projets de recherche soutenus par l'ADEME : MANAUS 1 et 2 et MOMECO₂.

▣ La Directive Européenne sur le stockage géologique de CO₂ rend nécessaire la réalisation d'une étude des risques préalable à tout déploiement. De la même manière la demande de permis de stockage doit contenir tous les éléments relatifs à la sécurité des opérations y compris pendant la période qui suit l'arrêt de l'injection de CO₂. **Dans ce contexte, le projet MANAUS, soit Méthodologie d'ANALYSE Unifiée et de gestion des risques liés au Stockage géologique de CO₂, coordonné par Geogreen en partenariat avec le BRGM, INERIS, OXAND, PHIMECA, a conduit à concevoir un guide méthodologique d'analyse et de gestion des risques associés au stockage géologique du CO₂. Ce guide a été appliqué à des projets potentiels de stockage.** Le guide permet aux futurs développeurs ou opérateurs de stockage de CO₂ d'en assurer la sécurité avant, pendant, et après déploiement. L'application du guide à des sites en projet à différents stades d'évolution a permis de le compléter sur les aspects liés aux mesures de maîtrise du risque, au retour d'expérience et à l'appréciation de la vraisemblance (ou probabilité).

▣ Un autre point de la Directive 2009/31/CE précise clairement l'importance des techniques de remédiation pour l'exploitant mais aussi pour l'autorité publique compétente.

Au niveau français, la transposition de cette directive, à travers notamment l'ordonnance 2010-1232 et le décret 2011-1411 reprend également la même exigence de plan de mesures correctives pour les opérateurs de site de stockage. Leur dimensionnement est ainsi une étape indispensable pour que l'industriel, confronté à une fuite non prévue, puisse évaluer objectivement l'applicabilité, le coût et l'efficacité de chacun des moyens envisageables, les comparer et prendre la meilleure décision possible. Du point de vue de l'autorité publique ou de l'organisme tiers expertisant ces choix, il est de même nécessaire de pouvoir comprendre les mesures choisies par l'opérateur et leur dimensionnement face à un contexte de fuite donné. **Le projet MOMECO₂, coordonné par le BRGM avec TERRA 3E, porte sur les remédiations en cas de fuite détectée lors de l'injection de CO₂.** Ces mécanismes d'intervention s'appuient sur des techniques d'injection ou d'extraction de fluides et doivent permettre de maîtriser la diffusion du nuage de CO₂ ou la pression. Comme le coût de ces

techniques est lié au nombre de puits à forer et à leur localisation, il est nécessaire d'optimiser leur mise en œuvre. Le projet a permis d'élaborer un guide méthodologique d'aide à la décision en cas de fuite de CO₂. Ce guide propose d'abord une liste exhaustive de critères à intégrer dans l'analyse. Outre l'aspect réglementaire, l'étude ainsi que le développement des techniques et des connaissances de remédiation qui sont proposées dans le projet participent à l'objectif global d'acceptabilité sociale du captage-stockage du CO₂ (CSC).

SURVEILLANCE DES SITES DE STOCKAGE DE CO₂

▣ Les outils de surveillance ont pour vocation de suivre le comportement du panache de CO₂ et de détecter et quantifier les fuites potentielles vers la surface ou les aquifères d'eau potable. **Ainsi l'objectif du projet CO₂-Vadose était de suivre un site pilote utilisé comme un analogue terrain naturel, en condition de fuite de CO₂ et de tester dans une configuration facilement accessible et contrôlable des outils géochimiques et géophysiques ainsi que les méthodes pour le suivi des sites de stockage géologique. La suite de ce projet, DEMOCO₂, a conduit au développement d'un prototype de l'outil géochimique** de mesures intégrées quantitatives, en continu et en automatique du flux de CO₂ et des gaz rares (Rn, He, Ne, Ar, Kr, Xe) qui sera testé et expérimenté in-situ sur le site naturel souterrain basé à Saint-Emilion.

La méthode de tomographie électrique sera déployée en complément de l'outil géochimique pour spatialiser en 3D les concentrations en CO₂.

▣ Dans le cadre du projet mHPP, l'outil développé s'adresse à des problématiques de surveillance des environnements extrêmes du sous-sol. **La sonde mHPP (Monitoring Hydromécanique des Pressions de Pores) est une sonde issue d'un prototype de sonde de mesures hydromécaniques en forage, élaboré dans le cadre du projet ANR HPPP-CO₂, qui a été développé lors du projet mHPP en un produit préindustriel robuste et fiable.** La validation technologique du capteur a été réalisée par la mesure de très faibles variations de pressions-déformations dans des failles, permettant de détecter des variations critiques de perméabilité et de coefficient de friction (pouvant mener à des fuites et des séismes). Cette technologie « géomécanique » est complémentaire des différentes technologies géochimiques et géophysiques actuellement développées.

▣ Le développement d'outils pour la surveillance à long terme est un élément clé pour la surveillance des sites de stockage. Parmi les outils de contrôle disponibles, l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR) est une technique peu coûteuse, qui permet d'analyser à partir d'images satellitaires les déplacements du sol de faible amplitude sur de très grandes surfaces, qui pourraient résulter des processus d'injection / soutirage en profondeur. **L'objectif du projet AMIRAL, réunissant BRGM et GEOGREEN, était le développement et l'adaptation aux spécificités du suivi des sites de stockages de CO₂ de cette technique InSAR.** Un guide méthodologique de bonnes pratiques pour la définition et la mise en œuvre de la surveillance des sites de stockage géologique en utilisant les techniques d'interférométrie radar, y compris pour la définition des lignes de base avant injection a été réalisée.



IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES DU STOCKAGE DE CO₂

▣ Une étude, menée par l'INERIS, a permis de synthétiser les connaissances actuelles sur les risques à long terme du stockage du CO₂ dans les réservoirs géologiques et notamment sur les risques de transfert vers les compartiments superficiels (aquifères, écosystèmes).

▣ La prise en compte des risques sanitaires et environnementaux constitue un verrou majeur pour mener à bien une analyse complète des risques liés au stockage géologique de CO₂, et notamment la quantification des conséquences des scénarios de fuite en zone habitée. Dans ce cadre, le BRGM coordonne un projet, IMPACT-CO₂, avec le CSTB, AMPHOS 21 France et l'IMFT (Université de Toulouse) dont l'objectif est de contribuer pour évaluer l'exposition potentielle à l'intérieur d'un bâtiment en cas de fuites de CO₂ arrivant en proche surface. Les acquis du projet pourront être utilisés dans les analyses de risques de site de stockage géologique en permettant une quantification plus précise des potentielles concentrations anormales dans le sol, sous les bâtiments et surtout dans l'air intérieur des bâtiments.

3.4 FAISABILITÉ SOCIALE DU CSC

L'ADEME a mené une démarche conduisant à l'élaboration d'un référentiel sur la concertation à destination des porteurs de projet.

La faisabilité sociale des projets est en effet devenue une variable incontournable pour permettre aux projets de se développer.

Et bien que les deux tiers des Français (65%) se déclarent préoccupés par « la protection de l'environnement » et que depuis une décennie, pollution de l'air, de l'eau et réchauffement climatique forment le trio de tête des préoccupations environnementales, il reste des marges de progression importantes sur la connaissance des mécanismes du réchauffement climatique.

En effet, 20% des Français confondent l'effet de serre et la couche d'ozone, 18% amalgament cette question avec celle des déchets et de la pollution et 23% ne peuvent spécifier un contenu ou apportent des réponses fantaisistes.

4. PERSPECTIVES

L'ADEME attache une importance particulière à l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de captage et à l'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires de la filière CTSC. **Les démonstrateurs de recherche n'ont pu apporter les éléments de réponse escomptés sur la partie stockage suite à l'arrêt du projet France Nord. Il a été identifié clairement un besoin de recherche sur les capacités de stockage en France et sur la faisabilité technique du stockage géologique.** L'ADEME continuera à accompagner les acteurs de la filière sur la maîtrise des impacts environnementaux et sanitaires via le développement d'outils de surveillance et la poursuite d'études sur la compréhension des mécanismes du sous-sol.

En complément des actions sur le volet technologique déjà engagées, l'ADEME pourrait être amenée à considérer d'autres aspects qui impacteront le développement des technologies ainsi que leur déploiement tels que :

- ▣ la recherche pré-normative en vue de la normalisation des méthodes ou matériels, du management environnemental et du risque,
- ▣ la prise en compte de la faisabilité sociale.

LA NOUVELLE STRATEGIE RECHERCHE ADEME

La stratégie RDI de l'ADEME 2014-2020 aborde la filière CSCV au sein de deux programmes :

- ▣ le **stockage géologique du CO₂** est une composante du programme « Agriculture, Forêt, Sols et biomasse » qui a pour objectif de soutenir la gestion durable des sols et sous-sols, et des productions agricoles et sylvicoles tout en favorisant la valorisation de biomasse,
- ▣ le **captage et la valorisation du CO₂** sont associés au programme « Production durable et Energies renouvelables » qui vise à améliorer l'éco-efficacité des systèmes de production, dont la production d'énergie renouvelable, et l'utilisation efficace des ressources et l'optimisation du cycle des matières. La valorisation, conjointe au CSC, permettrait d'utiliser du CO₂ déjà capté et concentré.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.