



SEPTEMBRE
2021



Vers un rôle accru du CCS dans la décarbonation industrielle en Allemagne et en France

Sylvie CORNOT-GANDOLPHE

L'Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d'information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l'Ifri est une association reconnue d'utilité publique (loi de 1901). Il n'est soumis à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L'Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l'échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité de l'auteur.

ISBN : 979-10-373-0421-6

© Tous droits réservés, Ifri, 2021

Couverture : © Mimpki/Shutterstock.com

Comment citer cette publication :

Sylvie Cornot-Gandolphe, « Vers un rôle accru du CCS dans la décarbonation industrielle en Allemagne et en France », *Études de l'Ifri*, Ifri, septembre 2021.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteur

Sylvie Cornot-Gandolphe est consultante en énergie, spécialiste des questions internationales. Depuis 2012, elle collabore avec le Centre Énergie & Climat de l'Ifri en tant que chercheur associé, avec CyclOpe, la publication de référence sur les matières premières et avec CEDIGAZ, le Centre international d'information sur le gaz naturel de l'IFP Énergies nouvelles (IFPEN).

Sylvie a une connaissance approfondie des marchés gaziers et charbonniers mondiaux, acquise au cours de sa carrière, tout d'abord comme secrétaire général de CEDIGAZ, au sein de l'IFPEN, puis directrice de projet, au Centre du Gaz de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies à Genève, puis administrateur principal, expert en matière de gaz, à l'Agence internationale de l'Énergie (AIE), puis adjointe au directeur du Développement commercial, au sein d'ATIC SERVICES et conseiller auprès du Président pour les questions énergétiques. Elle est l'auteur de plusieurs publications de référence sur les marchés gaziers et charbonniers. Sylvie est diplômée de l'École nationale supérieure du Pétrole et des Moteurs (ENSPM).

Résumé

Cette étude analyse de manière approfondie les politiques et projets de captage, stockage (CCS) et/ou réutilisation du carbone (*Carbon Capture, Utilization and Storage* – CCUS) en Allemagne et en France. Depuis 2019 et l'impératif de décarbonation accélérée, la question du CCS est à l'ordre du jour dans les deux pays et l'intérêt porté à l'apport des technologies de CCS/CCU à la décarbonation industrielle s'est renforcé récemment. De nouvelles mesures en faveur du CCS sont en train de se mettre en place, et des projets de CCS sont initiés par les industriels désireux de réduire leurs émissions rapidement et font l'objet de demandes de financement auprès de la Commission européenne (CE).

En Allemagne, le CCS n'est plus un sujet tabou et devient incontournable face à l'objectif renforcé de réduction des émissions d'ici 2030. Le gouvernement fédéral reconnaît que le CCS sera indispensable pour maintenir la compétitivité des industries. Des financements ont été mis en place depuis mai 2021 afin de permettre le développement du CCS et de la CCU, et garantir l'acceptabilité des technologies de CCS/CCU en tant que « technologies de transition ». Des projets sont entrepris pour décarboner les filières industrielles (acier notamment) et transporter et stocker le CO₂ en mer du Nord. L'Allemagne est par ailleurs très avancée en matière de CCU, sa politique visant à créer une économie circulaire du carbone. Cependant, malgré cette évolution favorable, la législation en Allemagne est un frein au démarrage de projets CCS sur le territoire national. De manière cruciale, l'Allemagne doit rouvrir le débat sur l'acceptabilité du CCS. Au-delà de la mise à jour de la législation nationale, l'adhésion du public sera essentielle.

En France, la Stratégie nationale bas carbone de 2020 (SNBC2) intègre maintenant le CCS dans ses objectifs d'atteinte de la neutralité carbone, mais de manière trop prudente. Les feuilles de route portant sur la décarbonation des industries à forte intensité énergétique (acier, chimie et ciment) ont été révisées au cours du second trimestre 2021 et intègrent maintenant le CCS comme levier de décarbonation d'ici 2030 (acier, chimie) ou 2035 (ciment). Une feuille de route sur le développement du CCUS est en cours d'élaboration avec l'industrie pour proposer des pistes concrètes, et de nouveaux financements sont à l'étude. Plusieurs projets de CCS ont été lancés par les industriels désireux de réduire les émissions de leurs productions dès 2030. Tout comme en Allemagne, les projets initiaux visent le stockage du CO₂ en

mer du Nord, mais les premiers projets de *clusters* industriels CCS, incluant le stockage dans le sous-sol français, émergent. La France, qui possède des structures sédimentaires aptes au stockage du CO₂, a mis en place un cadre réglementaire sur le stockage du CO₂ dès 2010 et bénéficie d'une compétence industrielle couvrant l'ensemble de la chaîne CCS. Elle a toutes les conditions requises pour démarrer des projets CCS dès maintenant et développer ses savoir-faire.

Ces évolutions sont à conforter par la mise en place d'un cadre réglementaire approprié afin de soutenir le financement des investissements initiaux et couvrir la différence entre le coût des projets et le prix du CO₂ sur le marché européen. Il convient également de renforcer l'effort de recherche et développement (R&D) en matière de captage du CO₂, qui permettra de réduire considérablement le coût de la chaîne CCS. Les avancées technologiques en France montrent déjà des résultats très prometteurs. Il est également nécessaire de définir clairement l'apport des technologies de CCS/CCU dans la décarbonation du secteur industriel, en évaluant le potentiel des filières CCS (et/ou CCU) et en les comparant aux alternatives réalistes de décarbonation. En France, les études des bassins parisiens et aquitains ont montré qu'ils offrent un potentiel de stockage élevé. Il est toutefois nécessaire de mieux caractériser ce potentiel, ainsi que d'évaluer celui du domaine maritime, et d'échanger avec les populations locales sur l'enjeu de la décarbonation industrielle et les aspects de sécurité du stockage de CO₂. En Allemagne, la question du stockage sur le territoire national (à terre ou en mer) nécessite également que la loi de 2012 sur le stockage géologique du CO₂ soit revue. Dans un premier temps, les projets de CCS allemands envisagent le stockage transfrontalier du CO₂ en mer du Nord, ce qui devrait faciliter leur acceptation. Parallèlement, un réseau régional de transport du CO₂ doit être créé, ce qui nécessitera l'établissement d'un cadre réglementaire à l'échelle européenne.

Si l'Allemagne et la France n'ont pas la chance de disposer dans leur domaine maritime de gisements d'hydrocarbures analogues à ceux de la mer du Nord, les deux pays sont toutefois dans des positions idéales pour développer les technologies de CCUS. Ils sont situés au cœur de l'Europe, avec un accès au stockage de CO₂ en cours de développement en mer du Nord. Ils ont une position stratégique pour l'acheminement du CO₂ et la création d'un réseau européen de CO₂, et ils possèdent des expériences de stockage du gaz naturel et un réseau gazier dense. La France, en particulier, dispose d'acteurs de renom international tout au long de la chaîne CCS, parmi lesquels Air Liquide, TotalEnergies, Alstom, l'IFPEN, Axens, le Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM), et une trentaine d'autres acteurs, qui se sont par ailleurs organisés au sein du Club CO₂.

TotalEnergies est impliqué dans les grands projets avancés de transport et stockage du CO₂ en mer du Nord, dont Northern Lights, Endurance et Aramis. En matière d'innovation, l'Allemagne peut compter sur des partenariats forts établis entre les universités et le secteur privé et sur ses industriels comme Heidelberg Cement et Linde, déjà impliqués dans le captage du CO₂. Les géants industriels nationaux ou présents en France et en Allemagne (par exemple : ArcelorMittal, Thyssenkrupp, Heidelberg Cement, Vicat, LafargeHolcim, TotalEnergies, ExxonMobil, Yara, Borealis) sont fortement engagés dans la décarbonation de leurs productions et ont inclus le CCS dans leur stratégie. Les technologies de CCS seront requises pour construire le marché mondial promis à une croissance exponentielle (plus de 7 gigatonnes [Gt] de CO₂ stockées à l'horizon 2050 selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur la neutralité carbone en 2050). L'Allemagne, sur le segment captage et utilisation du CO₂, et la France, sur l'ensemble de la chaîne CCS/CCU, sont bien placées pour commercialiser ces technologies, qui seront également nécessaires à terme pour produire des émissions négatives.

La perception du CCS a beaucoup évolué depuis dix ans et il apparaît aujourd'hui comme la seule option possible à court terme en attendant que les technologies d'électrolyse aient atteint une masse critique. Une vision holistique englobant toutes les options de décarbonation est ainsi nécessaire. Elle permet, par ailleurs, d'accélérer l'avènement d'une économie de l'hydrogène décarboné grâce à la mise en place de l'infrastructure nécessaire et l'exploitation des synergies entre CCS, CCU et hydrogène dans des *clusters* industriels décarbonés.

Sommaire

INTRODUCTION	7
LE CCUS EN ALLEMAGNE EST DEvenu INCONTOURNABLE	10
Le CCS n'est plus un sujet tabou.....	10
De nouveaux financements pour les technologies CCS/CCU	14
Le défi du stockage du CO ₂	16
Les projets CCUS en Allemagne se multiplient	17
Des verrous spécifiques à lever	21
LE CCUS EN FRANCE : UN POTENTIEL ENCORE SOUS-VALORISÉ.....	23
Le CCUS dans le cadre de la politique climatique française.....	23
Des financements encore limités, mais de nouveaux moyens sont mis en place	26
Le stockage du CO ₂	27
Les projets CCUS en France	29
Des atouts à exploiter dès maintenant	36
CONCLUSION : DES AVANCÉES À CONFORTER.....	38

Introduction

Le sujet du CCS a longtemps été évité en Allemagne, en raison de l'opposition locale. Celle-ci s'est principalement concentrée sur le stockage du CO₂ et moins sur le captage et le transport. Le débat sur le CCS en Allemagne, particulièrement virulent au début des années 2010, portait sur l'utilisation de la technologie dans les centrales au charbon, soulevant les critiques des groupes environnementaux. Ainsi, la transposition en droit national de la directive européenne sur le stockage géologique du CO₂ a été difficile. Elle n'a abouti qu'en 2012, un an après la date limite fixée par la CE, avec l'adoption d'un compromis, la loi sur le stockage permanent du CO₂ (ou KSpG), qui donne la possibilité aux *Länders* de ne pas autoriser le stockage sur leur territoire¹.

Mais Angela Merkel a remis le captage et le stockage du CO₂ à l'ordre du jour de l'agenda politique allemand à la fin de son mandat². La plupart des parties prenantes conviennent désormais que les technologies de CCUS, y compris le stockage du CO₂, seront nécessaires pour atteindre l'objectif de neutralité carbone³. Ainsi, le Parti des Verts a déclaré en novembre 2020 que toutes les technologies étaient nécessaires, dont le CCS, pour éliminer les émissions incompressibles des procédés industriels⁴. Cette prise de conscience est d'autant plus nécessaire que l'Allemagne a rehaussé ses ambitions climatiques, avançant l'atteinte de la neutralité climatique à 2045 (voir ci-après).

Le débat sur le CCS a également évolué depuis que le gouvernement a adopté un programme de fermeture des centrales au charbon au plus tard en 2038 (certainement avancé à 2030 avec le nouvel objectif de réduction des émissions d'ici 2030). La sortie du charbon permet d'appréhender les technologies de CCS dans un contexte plus neutre. Les applications prévues du CCS se concentrent sur les émissions industrielles, pour lesquelles les scénarios montrent

1. Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das zuletzt durch Artikel 22 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist, disponible sur : www.gesetze-im-internet.de.

2. J. Wettengel, « Merkel Puts Contentious CCS Technology back on German Agenda », *Clean Energy Wire*, 16 mai 2019, disponible sur : www.cleanenergywire.org.

3. L. Beck, « Carbon Capture in Germany: Long-Overdue Momentum Is Building », *Atlantic Council*, 13 avril 2021, disponible sur : www.atlanticcouncil.org.

4. C. Nijhuis, « Consensus on Need for CCS to Reach Climate Goals Growing in Germany », *Clean Energy Wire*, 26 novembre 2020, disponible sur : www.cleanenergywire.org.

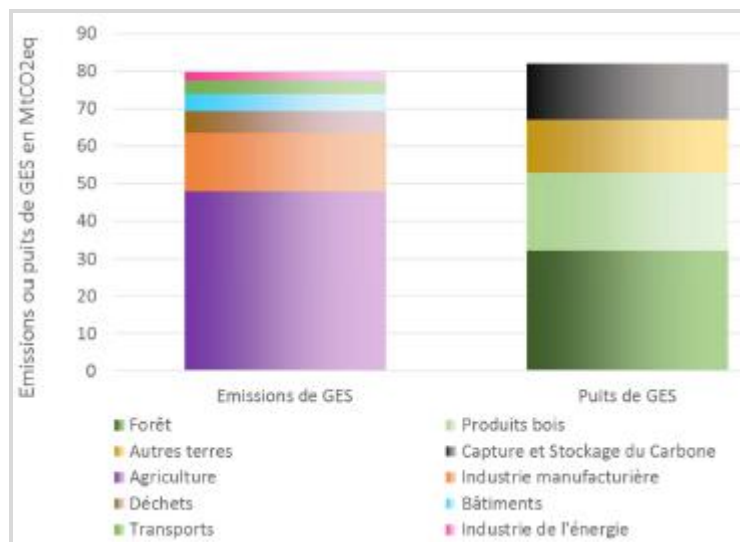
que le CCS est indispensable pour atteindre la neutralité carbone, et sur la création d'émissions négatives, *via* le BECCS (bioénergies avec captage et stockage de CO₂) notamment. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'Allemagne s'élèvent à environ 800 millions de tonnes de CO₂ équivalent par an (MtCO₂eq/an). Elles représentaient 810 Mt en 2019 et 740 Mt en 2020⁵. Environ un quart des émissions proviennent de l'industrie, en majorité générées par la production de ciment, d'acier et de produits chimiques. Décarboner ces émissions est un enjeu industriel majeur. L'Allemagne est le plus grand producteur de ciment et d'acier de l'Union européenne (UE). Le secteur industriel emploie 5,5 millions de personnes et représente un quart du produit intérieur brut. Les émissions du secteur ont chuté au cours des trente dernières années et la marge de manœuvre pour des réductions supplémentaires se restreint. De nouvelles pistes basées sur l'innovation et la transformation industrielle sont nécessaires pour garantir la compétitivité et la durabilité à long terme du secteur.

Après l'accord de Paris, la France a révisé sa Stratégie nationale bas carbone (SNBC) pour atteindre la neutralité climatique d'ici 2050, maintenant inscrite dans la loi énergie et climat du 8 novembre 2019, et a inclus le CCS pour contribuer à l'équilibre entre les émissions résiduelles et le puits de carbone français. La SNBC2, adoptée en 2020, reconnaît qu'atteindre la neutralité climatique implique de renforcer les puits de carbone naturels et de développer des technologies de CCS, afin de compenser les émissions résiduelles⁶. Elle appelle à soutenir les développements d'unités pilotes et éventuellement commerciales de CCS, ainsi que de CCU avec l'utilisation du CO₂ capté dans de nouveaux vecteurs énergétiques par méthanation, comme matière première dans la fabrication de carburants ou de produits chimiques ou dans des produits de construction.

5. « Treibhausgas-Emissionen in Deutschland », Umweltbundesamt, 21 juin 2021, disponible sur : www.umweltbundesamt.de.

6. « Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone », Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES), mars 2020, disponible sur : www.ecologie.gouv.fr.

Puits et émissions de GES en France en 2050 selon le scénario de référence de la SNBC2



Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire.

Toutefois, la SNBC2 n'envisage qu'un rôle limité du CCS à l'atteinte de la neutralité carbone en raison de la décarbonation profonde de l'économie à long terme. Le CCS est utilisé pour capturer les émissions incompressibles des procédés industriels et pour générer des émissions négatives associées à la combustion de la biomasse. Dans le scénario de référence de la SNBC2, les technologies de CCS permettent de réduire les émissions de 15 millions de tonnes de CO₂ par an (MtCO₂/an) en 2050, dont environ 5 Mt/an d'émissions résiduelles dans les industries et 10 Mt/an d'émissions négatives grâce à la BECCS. Pour la BECCS, la SNBC2 note qu'il s'agit du seul levier (avec la capture directe du CO₂ de l'atmosphère – DACCS, mais qui est à un stade encore très précoce de développement) qui permet la génération d'émissions négatives continues sur le très long terme (le stockage forestier finissant par atteindre un optimum tarissant le puits à très long terme). Pourtant, la France dispose d'immenses atouts géologiques, économiques, industriels et technologiques pour déployer à plus grande échelle le CCS.

Cette étude complète celle sur le CCUS en Europe et analyse de manière approfondie les politiques et projets de CCUS en Allemagne et en France. Dans un contexte de renouveau du CCS en Europe, cette étude porte sur l'évolution des politiques et des projets de CCUS en Allemagne et en France et les enjeux et obstacles spécifiques au CCS dans ces deux pays.

Le CCUS en Allemagne est devenu incontournable

Le CCS n'est plus un sujet tabou

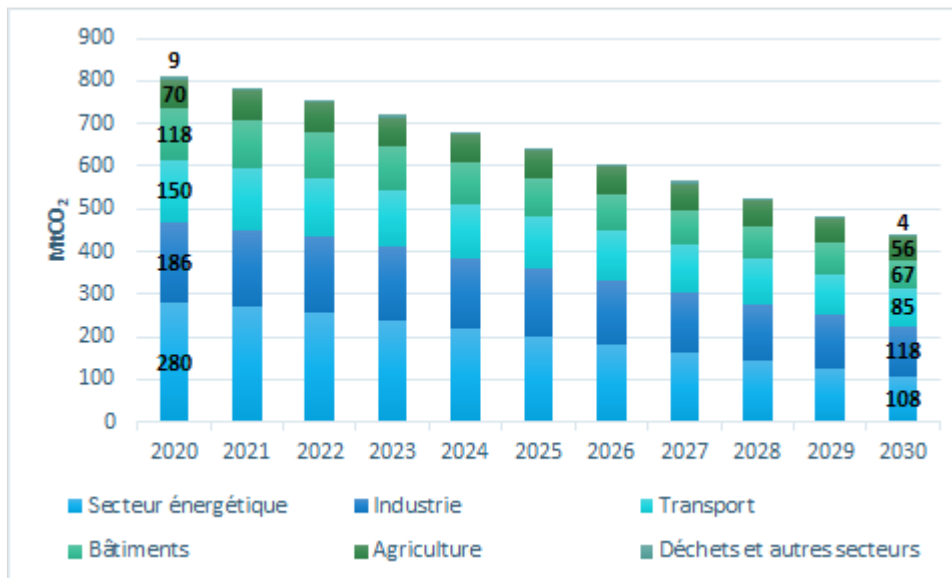
Le gouvernement allemand a annoncé le 12 mai 2021 de nouveaux objectifs de réduction des GES, suite à la décision de la Cour constitutionnelle allemande du 24 mars 2021 jugeant la loi sur la protection du climat de décembre 2019 insuffisante et incompatible avec les droits fondamentaux⁷. La nouvelle loi, adoptée en juin 2021, porte la réduction des émissions à 65 % en 2030 par rapport à 1990 (contre 55 % auparavant). Un nouvel objectif de réduction des émissions d'au moins 88 % s'applique pour l'année 2040. La neutralité climatique doit être atteinte en 2045, contre 2050 auparavant. La réduction d'ici 2030 est déclinée par secteur, le secteur énergétique et l'industrie sont les plus impactés par les réductions supplémentaires : l'industrie doit réduire ses émissions à 118 MtCO₂eq en 2030, alors que le secteur a émis 187 Mt en 2019 (dont environ 30 % d'émissions de procédés)⁸. Pour les émissions de CO₂ uniquement, la base de données Edgar estime les émissions du secteur à 169 Mt, dont 34 % d'émissions de procédés (58 Mt) en 2019⁹. Le secteur énergétique doit réduire ses émissions à 108 MtCO₂eq (250 Mt en 2019). La loi est accompagnée d'un Pacte climat et de mesures immédiates pour soutenir la mise en œuvre des nouveaux objectifs par secteur. Le gouvernement prévoit un financement supplémentaire pouvant aller jusqu'à 8 milliards d'euros (€). Le Pacte climat inclut un pacte d'investissement avec l'industrie pour accélérer les réductions d'émissions dans les secteurs à fortes émissions de procédé tels que l'acier, la chimie et le ciment.

7. « Referentenentwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes », Bundesministerium für Umwelt (BMU), 11 mai 2021, disponible sur : www.bmu.de.

8. « CO₂-Abscheidung und -Nutzung in der Grundstoffindustrie », Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), disponible sur : www.energieforschung.de.

9. EDGAR – *The Emissions Database for Global Atmospheric Research*, disponible sur : edgar.jrc.ec.europa.eu.

Le nouveau plan climatique allemand : réduction des émissions d'ici 2030 par secteur



Source : Bundesministerium für Umwelt (BMU).

La neutralité climatique d'ici 2045 requiert une transformation structurelle plus rapide du système énergétique. Au-delà de mesures supplémentaires d'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, l'électrification, l'hydrogène et les puits de carbone naturels sont appelés à jouer un rôle plus important dans l'atteinte des nouveaux objectifs. Alors que le CCS n'était pas envisagé dans les scénarios énergétiques visant 80 % de réduction des GES à l'horizon 2050, il l'était déjà dans la plupart des scénarios (sauf un scénario de BMU) visant 95 % de réduction¹⁰. Le nouvel objectif de neutralité climatique d'ici 2045 rend le CCS incontournable. D'après une étude d'Agora Energiewende sur la neutralité carbone en 2045, publiée en mai 2021, 63 MtCO₂ d'émissions résiduelles des secteurs agricoles, industriels et des déchets devront être compensées en 2045¹¹. L'étude envisage le développement des technologies de BECCS, DACCS et le CCU pour la fabrication de matières premières/matériaux verts. L'étude « Climate Paths » de la Fédération des industries allemandes (BDI) de 2018 montrait également que pour atteindre une réduction des émissions de GES de 95 % d'ici 2050, au moins 35 MtCO₂ provenant des émissions des procédés industriels devaient être stockées de manière permanente¹². L'abattement total du CO₂ grâce aux technologies CCS

10. Voir « CCU and CCS – Contributing to Climate Protection in Industry », Acatech -National Academy of Science and Engineering, disponible sur : [en.acatech.de](https://www.acatech.de).

11. « Towards a Climate-Neutral Germany by 2045. How Germany Can Reach its Climate Targets before 2050 », Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, juin 2021, disponible sur : [static.agora-energiewende.de](https://www.agora-energiewende.de).

12. P. Gerbert, « Climate Paths for Germany », BCG, 18 janvier 2018, disponible sur : www.bcg.com.

dans tous les secteurs s'élevait à 93 MtCO₂/an en 2050, y compris 38 MtCO₂ d'émissions liées à l'énergie.

Les entreprises concernées – acier, ciment, chimie – ont présenté (avant l'adoption de la nouvelle loi climat) leurs propres plans de réduction des émissions de CO₂, qui incluent les technologies CCUS. L'exemple de l'acier, comme précurseur et modèle de la décarbonation européenne, a été traité dans le rapport sur le CCUS en Europe. Pour rappel, le *Steel Action Concept* (« Pour une industrie sidérurgique forte en Allemagne et en Europe »), présenté par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi), propose des mesures afin de conduire à la fois la décarbonation du secteur et assurer le maintien d'industries performantes, compétitives, innovantes et attractives¹³. Il vise une transformation fondamentale du secteur pour produire de l'acier sans CO₂ d'ici 2050, impliquant l'utilisation d'hydrogène renouvelable dans le procédé de réduction directe du minerai de fer (DRI). Dans une phase de transition, l'utilisation du CCS, de la CCU et de l'hydrogène bas carbone est prévue, avant que l'hydrogène renouvelable ainsi que la production d'électricité renouvelable ne soient disponibles en quantités suffisantes à des prix compétitifs. Un autre exemple est celui de l'industrie allemande du ciment regroupée au sein de l'association VDZ. VDZ a présenté sa feuille de route pour décarboner la production de ciment afin d'atteindre son objectif volontaire de neutralité climatique d'ici 2050¹⁴. Au-delà de l'amélioration de l'efficacité énergétique et du remplacement des combustibles fossiles, l'industrie est dépendante des technologies de CCU et CCS pour réduire les émissions inévitables.

Scénario de neutralité climatique de l'industrie allemande du ciment

Le scénario de neutralité climatique à l'horizon 2050, développé par VDZ en novembre 2020, inclut toutes les options de réduction de CO₂ disponibles le long de la chaîne de valeur, y compris l'utilisation de technologies de rupture, telles que le lancement sur le marché de ciments CEM VI avec une part de clinker comprise entre 35 et 50 %, l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique, de nouvelles innovations dans la production et l'utilisation du béton, ainsi que l'utilisation des technologies de CCUS pour les quantités de CO₂ résiduelles, principalement liées aux procédés, qui ne peuvent être réduites autrement. Ce scénario permet déjà une réduction des

13. « The Steel Action Concept. For a Strong Steel Industry in Germany and Europe », BMWi, juillet 2020, disponible sur : www.bmwi.de.

14. *Decarbonising Cement and Concrete: A CO₂ Roadmap for the German Cement Industry*, VDZ, novembre 2020, disponible sur : www.vdz-online.de.

émissions d'environ 27 % d'ici 2030. Les premiers démonstrateurs de séparation du CO₂ à l'échelle industrielle jouent un rôle majeur, permettant de capturer environ 1 MtCO₂ en 2030. D'ici 2050, 10,4 MtCO₂/an, soit la moitié des émissions de ce secteur en 2019, sont évitées grâce à l'utilisation généralisée des technologies CCU/CCS. En outre, grâce à l'utilisation de déchets contenant de la biomasse comme combustible avec captage simultané du CO₂ (BECCS), environ 1,6 MtCO₂ peut être retiré de l'atmosphère chaque année. À titre de comparaison, sans l'utilisation de technologies de rupture telles que le CCUS, une réduction des émissions de seulement 36 % par rapport à 2019 est atteinte d'ici 2050.

La stratégie nationale allemande sur l'hydrogène, adoptée en juin 2020, met l'accent sur l'hydrogène renouvelable et ses applications dans les secteurs industriels (en particulier pour les procédés des industries chimiques et sidérurgiques) et de la mobilité¹⁵. L'Allemagne a une politique ambitieuse d'utilisation du CO₂ pour créer de nouveaux marchés et développer une économie du carbone. Cette économie vise à développer les nombreuses synergies entre branches industrielles, celles dont les émissions de procédé ne peuvent être évitées (ciment par exemple), et celles qui ont besoin de CO₂ pour la fabrication de produits (chimie). L'industrie allemande développe de nombreux projets pilotes visant notamment la production de carburants synthétiques ou d'engrais, permettant de réduire la dépendance de l'industrie et du transport vis-à-vis des énergies fossiles.

Mais, avec une production prévue de 14 TWh en 2030, la stratégie hydrogène n'aboutira pas à une réduction élevée des émissions de CO₂ à cet horizon. Le nouvel objectif de réduction des GES à l'horizon 2030 requiert une accélération de la contribution de l'hydrogène, en particulier pour décarboner l'industrie. Une étude de mai 2021 de Stiftung Klimaneutralität estime la demande d'hydrogène à 60 TWh en 2030 afin d'atteindre l'objectif de 2030, mais même avec une expansion très rapide des énergies renouvelables en Allemagne et une augmentation de la capacité d'électrolyse à 10 gigawatts (GW), seul un peu moins d'un tiers de la demande peut être couvert par la production nationale¹⁶. Il est peu probable que les quantités d'hydrogène renouvelable importées suffisent à la décarbonation rapide de l'industrie allemande en raison des temps de construction longs et des coûts élevés de construction d'une grande quantité de production d'électricité renouvelable, de la capacité

15. *The National Hydrogen Strategy*, BMWi, juin 2020, disponible sur : www.bmwi.de.

16. « Wasserstoffstrategie 2.0: Mehr Tempo beim Markthochlauf », Stiftung Klimaneutralität, 26 mai 2021, disponible sur : www.stiftung-klima.de.

d'électrolyse nécessaire et des infrastructures de transport associées. Sans la contribution de l'hydrogène bas carbone, les ambitions climatiques à l'horizon 2030 ont peu de chances d'être atteintes¹⁷. Un soutien neutre des technologies (incluant le reformage du gaz naturel avec CCS) permettrait une accélération plus rapide de la production d'hydrogène et du marché à un coût inférieur. Ce sont également les conclusions d'une étude publiée par VCI, l'Association allemande de l'industrie chimique, en 2019¹⁸, qui met en avant que les options de production d'hydrogène bas carbone (reformage du gaz naturel avec CCS, reformage du biogaz, pyrolyse du méthane à terme, etc.) devraient être considérées, en complément d'une stratégie d'importation d'hydrogène, afin de pouvoir couvrir la demande d'hydrogène pour l'ensemble de l'industrie et en même temps permettre une montée en puissance rapide et rentable d'une économie de l'hydrogène. Elle précise que cette production, par ailleurs, apporterait une contribution significative au développement des infrastructures d'hydrogène et de CO₂.

De même, BDI a publié en avril 2021 sa position sur les technologies de CCUS, qui appelle à un débat ouvert et transparent sur les technologies de CCUS comme moyen le plus efficace de réduire les émissions du secteur industriel¹⁹.

De nouveaux financements pour les technologies CCS/CCU

Le plan climat 2030 de décembre 2019 reconnaissait déjà que l'utilisation des technologies de CCU/CCS serait inévitable et que le CCS constitue une option relativement peu coûteuse pour réduire les émissions incompressibles des procédés industriels à moyen terme. En ce qui concerne le stockage du CO₂, le gouvernement allemand envisageait le stockage transfrontalier sous le plancher de la mer du Nord.

BMW_i, BMU et le ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) ont mis en place un programme de financement pour l'utilisation des technologies CCU dans l'industrie²⁰. Ce

17. Voir par exemple : « The Crucial Role of Low-Carbon Hydrogen Production to Achieve Europe's Climate Ambition: A Technical Assessment », Zero Emissions Platform, 14 janvier 2021, disponible sur : zeroemissionsplatform.eu.

18. « Working Towards a Greenhouse Gas Neutral Chemical Industry in Germany », Verband der Chemischen Industrie, septembre 2019, disponible sur : www.vci.de.

19. J. Wiskow, « CCUS-Technologien wichtig für Klimaneutralität », Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), 15 avril 2021, disponible sur : bdi.eu.

20. « CO₂-Abscheidung und -Nutzung in der Grundstoffindustrie, Förderaufruf innerhalb der Forschungsförderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMW_i) im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung », BMW_i, disponible sur : www.energieforschung.de.

programme vise à développer des technologies innovantes de réduction des émissions dans le secteur industriel, en particulier pour les émissions de procédés, et à faire évoluer les technologies de séparation du CO₂ d'un niveau de préparation technologique 6 (TRL 6, Technology Readiness Level) vers la commercialisation²¹. Le programme de financement est divisé en deux phases :

- Dans la première phase, le gouvernement soutient la recherche et l'innovation (R&I) dans le domaine de la CCU dans le cadre du 7^e programme de recherche énergétique. En décembre 2020, BMWi a lancé un appel à projets visant le financement de travaux de recherche²². Il comporte trois domaines : le captage du CO₂ (mise à l'échelle de technologies industrielles), les circuits CCU/CO₂ (les approches de recyclage/utilisation du CO₂ des sources industrielles) et l'infrastructure de transport du CO₂ (réseaux de CO₂ régionaux, nationaux et européens).
- La deuxième phase, présentée dans une directive de financement en février 2021, effective depuis le 1^{er} mai 2021, est de plus grande envergure et comprend le financement de grands projets de démonstration de CCU/CCS dans l'industrie²³. Les technologies de CCU/CCS considérées comprennent l'infrastructure nécessaire pour transporter et stocker le CO₂ en mer du Nord, le BECCS et le DACCS. Le budget a été fixé à 105 millions€ pour 2021, puis à 120 millions €/an dans un premier temps jusqu'en 2025. L'objectif est de mettre en place l'expertise technologique pour stimuler non seulement une chaîne de procédés CCU/CCS, mais également un « écosystème CCU/CCS » en Allemagne. Le programme doit également chercher à garantir l'acceptabilité du CCU/CCS en tant que « technologie de transition » pour décarboner l'industrie²⁴.

L'Allemagne est partenaire du projet européen ERA-NET ACT²⁵, dont l'objectif est de soutenir des projets de R&D afin d'accélérer le développement puis le déploiement du CCUS. Le gouvernement allemand a engagé 3 millions € dans l'appel à projets de 2020 (ACT3). Les projets seront financés pour trois ans à partir de septembre 2021.

21. Cette échelle évalue le niveau de maturité d'une technologie. Le niveau 1, le plus bas, porte sur les principes de base, tandis que le niveau 9 est le plus avancé (application réelle de la technologie). Le degré 6 est la démonstration par un prototype dans un environnement représentatif.

22. « New Call for Funding for CO₂ Capture and Utilisation in the Primary Industry », Strom-Forschung, 15 décembre 2020, disponible sur : www.strom-forschung.de.

23. « CO₂-Abscheidung und -Nutzung in der Grundstoffindustrie », BMWi, *op. cit.*

24. C. Jardine, « Germany Launches CCUS Support », *Argus*, 8 février 2021, disponible sur : www.argusmedia.com.

25. « ACT – Accelerating CCS Technologies », disponible sur : www.act-ccs.eu.

Si l'Allemagne a maintenant intégré les technologies de CCUS, y compris le CCS, pour atteindre ses objectifs climatiques, le stockage du CO₂ en Allemagne reste problématique.

Le défi du stockage du CO₂

La loi sur le stockage permanent du CO₂ (KSpG) de 2012 garantit le stockage permanent du CO₂ dans les couches rocheuses souterraines de manière à protéger l'environnement et la santé humaine. La loi, résultant d'un compromis, prévoyait un stockage annuel ne dépassant pas 1,3 Mt/an de CO₂ et une capacité de stockage maximale de 4 Mt/an. Elle stipulait également que les permis ne pouvaient être accordés que si une demande d'installation de stockage de CO₂ avait été déposée avant le 31 décembre 2016. Les *Länders* pouvaient empêcher le stockage de CO₂ sur leur territoire (clause *opt out*). Plusieurs *Länders* ont utilisé cette possibilité : Basse-Saxe, Schleswig-Holstein, Mecklembourg-Poméranie occidentale, y compris les eaux côtières de la mer du Nord et de la Baltique. Le Brandebourg a également prohibé le stockage du CO₂ sur son territoire par décision parlementaire²⁶. Comme aucun projet de CCS n'a été déposé avant la date limite, il est actuellement impossible de démarrer un projet de stockage de CO₂ en Allemagne à terre ou en mer. Il faudrait pour cela que la date limite stipulée dans la loi de 2012 soit revue. La loi de 2012, en revanche, autorise la construction de pipelines de CO₂, ce qui signifie que le captage et le transport ultérieur par pipeline, bateau ou camion ne sont pas limités par la situation juridique actuelle en Allemagne (mais elles le sont encore par la législation européenne). La mise en place de projets de stockage transfrontaliers nécessite, par ailleurs, la signature d'accords bilatéraux avec les pays cibles pour stocker le CO₂ en mer du Nord.

L'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles (BGR) avait déterminé en 2010 le potentiel de stockage des gisements de gaz et des aquifères salins profonds en Allemagne. La capacité de stockage des 39 champs de gaz naturel connus, presque tous situés dans le nord-ouest de l'Allemagne est estimée à 2,75 Gt²⁷. Celle des aquifères salins des trois principaux bassins (Bassin du nord de l'Allemagne, y compris offshore, Bassin du Rhin supérieur et Bassin de l'avant-pays alpin du Nord) est évaluée à 9,3 Gt (à 50 % de probabilité), dont 2,9 Gt offshore. Dans l'ensemble, la capacité de stockage est suffisante pendant plusieurs décennies pour stocker les émissions industrielles prévues et même pour obtenir des émissions

26. « CCU and CCS – Contributing to Climate Protection in Industry », Acatech, disponible sur : en.acatech.de.

27. *Ibid.*

négatives. Les sites potentiels de stockage du CO₂ sont majoritairement situés dans le nord de l'Allemagne, alors que les grands sites d'émissions de CO₂ sont plus dispersés (en particulier pour les émissions dispersées et décentralisées des cimenteries²⁸). Toutefois, certaines régions à forte concentration industrielle peuvent être identifiées, comme la Rhénanie du Nord-Westphalie. Ces *clusters* pourraient permettre le développement initial de l'infrastructure, de manière similaire (et en synergie) à l'approche *cluster* retenue pour le développement de l'hydrogène²⁹.

Mais tant que la question de l'acceptation du stockage de CO₂ en Allemagne n'a pas été résolue, le stockage transfrontalier, bien que plus coûteux, semble plus réalisable dans un avenir proche. Comme la majorité des sites industriels allemands ne se trouvent pas sur la côte, un soutien public fort sera nécessaire pour construire l'infrastructure de transport du CO₂ dans le pays. De tels projets existent déjà (cf. ci-après).

Les projets CCUS en Allemagne se multiplient

Dans les années 2000, l'Allemagne a construit des pilotes pour tester les technologies CCUS. Les technologies de captage du CO₂ ont été testées sur des unités pilotes (Shwarze Pumpe, Wilhemshaven, Niederaussem). Sur le site pilote de Ketzin, à 40 kilomètres (km) à l'ouest de Berlin, 67 000 tonnes de CO₂ ont été injectées dans des formations rocheuses à 650 mètres de profondeur de 2008 à 2013. Mais à l'instar de la situation dans l'UE, les projets CCS n'ont pas abouti. Le seul projet CCS à l'échelle commerciale du pays – une installation de démonstration sur la centrale au lignite de Janschwalde de Vattenfall – a été abandonné en 2011.

Aujourd'hui, le nouvel élan pour les technologies CCUS a permis le lancement, à différents stades de développement (le plus souvent au stade d'études de faisabilité), de plusieurs projets CCUS, dont certains sont candidats au premier appel à candidature du Fonds européen pour l'innovation (les résultats indiqués ne sont pas détaillés par projet, mais classés par activité et pays³⁰). Les projets CCS visent la production d'hydrogène bas carbone en Allemagne et la création de l'infrastructure nécessaire au transport du CO₂ et à son stockage transfrontalier, avec deux projets candidats en vue de la

28. J. Simböck, « CCU and CCS – Building Blocks for Climate Protection in Industry. Analysis, Options and Recommendations », *Acatech Position Paper*, Acatech, 6 mars 2019, disponible sur : <https://en.acatech.de>.

29. J. Wiskow, « CCUS-Technologien wichtig für Klimaneutralität », *op. cit.*

30. « Statistics of the Proposals Received for the First Large-Scale Call of the Innovation Fund in October 2020 », Commission européenne, disponible sur : ec.europa.eu.

préparation de la 5^e liste PCI (Projects of Common Interest) des réseaux de transport transfrontaliers de CO₂ (TEN-E)³¹.

H2morrow

Le projet H2morrow (Equinor et Open Grid Europe – OGE), a démontré qu'il était possible de fournir rapidement de grandes quantités d'hydrogène bas carbone de manière économique. Thyssenkrupp en sera le client principal³².

Dans une première phase, le projet a étudié la faisabilité technique de la production à grande échelle en Allemagne d'hydrogène bas carbone à des coûts compétitifs en reformant du gaz naturel importé de Norvège. Le CO₂ produit lors du processus de reformage serait capturé et stocké sous le fond marin de la mer du Nord norvégienne. Une infrastructure réglementée d'hydrogène serait créée en convertissant les gazoducs existants pour transporter l'hydrogène pur. L'étude a montré qu'il serait possible de fournir 8,6 térawattheures par an (TWh/an) d'hydrogène d'ici 2030 à l'industrie et aux autres utilisateurs finaux en Rhénanie du Nord-Westphalie. Cela permettrait de réduire l'empreinte carbone de 95 % et d'éviter jusqu'à 1,9 Mt/an de CO₂³³. La deuxième phase du projet, dont les premiers résultats ont été annoncés début 2021, comprenait une étude technique plus approfondie, ainsi que la sélection du site de reformage³⁴. L'étude conjointe entre les trois partenaires a permis de valider la faisabilité technique d'approvisionner en hydrogène bas carbone le site de Duisburg de Thyssenkrupp (la plus grande usine sidérurgique d'Allemagne). Cette solution permettrait des réductions significatives de CO₂ dès 2030 via une production d'acier bas carbone à court et moyen terme, en attendant que des quantités suffisantes d'hydrogène renouvelable soient disponibles pour répondre à la demande du site. L'étude a évalué plusieurs options pour l'approvisionnement et le transport de l'hydrogène vers le site de Duisburg, ainsi que des options pour le transport (bateaux, canalisations) et le stockage du CO₂ (Northern Lights, Porthos). En ce qui concerne la capacité de production, deux scénarios ont été évalués : 1,4 GW et 2,7 GW. Le reformeur (autothermique, ATR) pourrait produire 800 000 normo mètres cubes par heure (Nm³/h). Le prix de l'hydrogène (H₂) est estimé à environ 2,1 €/kgH₂ (correspondant à 58 €/MWh) sur la base d'un prix moyen du

31. « Candidate PCI Projects in Cross Border Carbon Dioxide (CO₂) Transport Networks in View of Preparing the 5th PCI List », Commission européenne, disponible sur : ec.europa.eu.

32. « H2morrow – Act Today to be Greenhouse Gas Neutral by 2050 », OGE, disponible sur : oge.net.

33. « Equinor und Open Grid Europe stellen gemeinsames Projekt „H2morrow“ zur Dekarbonisierung der deutschen Industrie vor », Equinor, disponible sur : www.equinor.de.

34. « H2morrow Steel Concludes Feasibility Study, Project Partners to Continue Cooperation: Supply of Duisburg Steel Mill with Blue Hydrogen Technically Possible, but Clarification of Political and Regulatory Framework Required », Thyssenkrupp, 12 janvier 2021, disponible sur : www.thyssenkrupp.com.

gaz naturel attendu de 23 €/MWh. L'ensemble de la chaîne de valeur du projet pourrait être établi d'ici 2027 au plus tôt. Le projet permettrait à terme la production de 7 Mt/an d'acier bas carbone et d'éviter 11 Mt/an de CO₂. Les partenaires continuent à affiner leurs études en vue d'une prise de décision d'investissement, en attendant la mise en place d'un cadre politique et réglementaire approprié.

Liquéfaction du CO₂ et stockage tampon à Wilhelmshaven

L'objectif de ce projet est d'étudier une infrastructure de liquéfaction de CO₂ et de stockage tampon dans le parc énergétique de Wilhelmshaven, point d'ancrage d'une économie circulaire du carbone. Ce projet servirait de démonstrateur initial d'un *hub* du réseau H₂/CO₂ européen. Le réseau serait étendu aux autres pays de l'UE et en Allemagne. Dans une première phase, environ 4,3 MtCO₂/an, provenant d'installations de capture liées au projet et à la connexion d'une centrale électrique tierce, seraient exportés. L'installation de liquéfaction et de stockage tampon d'une capacité pouvant aller jusqu'à 1 MtCO₂/an permettrait le transport du CO₂ par *pipeline* ou bateaux. Le CO₂ serait destiné à la production de gaz renouvelables ou à un stockage permanent en sites géologiques (par exemple, Northern Lights). Le projet pourrait être opérationnel fin 2026.

Transport aval du CO₂ par canalisation Hastedt-Brême

En liaison avec le projet précédent, ce projet prévoit la construction d'un pipeline pour transporter le CO₂ du pôle industriel de Brême jusqu'au parc énergétique de Wilhelmshaven.

Les projets pilotes visant la CCU sont nombreux en Allemagne et sont intrinsèquement liés à la stratégie hydrogène du pays qui, entre autres, encourage l'utilisation du CO₂ combinée à l'hydrogène renouvelable pour la fabrication de nouveaux produits (par exemple pour la synthèse chimique) ou la méthanation pour créer des gaz renouvelables. L'Allemagne a joué un rôle de pionnier dans les tests et le développement des technologies Power-to-X (PtX) et est aujourd'hui le pays le plus avancé. Un budget de 600 millions € a été prévu entre 2020 et 2023 pour favoriser la construction de projets testant différents procédés et permettre d'accélérer le transfert de technologies et d'innovations du laboratoire vers le marché (« véritables laboratoires de la transition énergétique »). Parmi ces projets, trois projets (LEILAC-2, Carbo2Chem et Westküste 100), impliquant directement la CCU et les industries à forte intensité carbone, sont décrits ci-après.

LEILAC-2 : Le projet **LEILAC-2** (Low Emissions Intensity Lime & Cement) prévoit la démonstration de la technologie de captage du CO₂ de Calix dans la cimenterie de Heidelberg Cement à Hanovre³⁵. Le projet est la suite d'un test pilote réalisé avec succès *via* le projet LEILAC-1 en Belgique. LEILAC-2 vise à séparer 20 % des émissions de procédé sur une cimenterie opérationnelle (environ 100 000 tCO₂/an) et à démontrer plusieurs objectifs technologiques. Le projet comprend également une analyse approfondie de la destination future du CO₂ capturé (CCU ou CCS). LEILAC-2 a reçu un financement de 16 millions € du programme européen Horizon 2020 et est soutenu par des contributions supplémentaires de l'industrie. L'unité devrait entrer en service début 2024.

Carbon2Chem : Le projet Carbon2Chem vise à démontrer que les émissions des industries à forte intensité carbone (production d'acier dans ce cas) peuvent être utilisées comme matière première par l'industrie chimique et que les chaînes de valeur intersectorielles peuvent être liées les unes aux autres. Un pilote sur le site de Thyssenkrupp à Duisbourg est en service depuis 2018. Le projet Carbon2Chem implique la réalisation d'un démonstrateur, qui explorera l'utilisation des gaz de fonderie et de l'hydrogène produit à partir d'un surplus d'électricité provenant de sources d'énergie renouvelable (électrolyseur de 2 MW) pour produire de l'ammoniac et du méthanol³⁶. L'une des particularités du projet, et son enjeu technologique majeur, est l'utilisation d'énergie renouvelable intermittente. En utilisant le surplus d'électricité renouvelable, Carbon2Chem contribue ainsi à maintenir l'équilibre de l'approvisionnement électrique. Le projet vise ainsi à démontrer la possibilité d'utiliser des installations industrielles à grande échelle pour la gestion de la demande d'électricité. Le défi majeur du projet est de trouver des catalyseurs capables de faire face aux fluctuations de fonctionnement sans impact sur les performances. Le projet est financé par BMBF à hauteur de plus de 60 millions € et par les partenaires concernés à hauteur de plus de 100 millions € d'ici 2025. Dans une deuxième phase du projet, la réalisation d'installations à l'échelle industrielle est prévue. Le transfert de la technologie vers une solution industrielle à grande échelle pourrait commencer dans environ 15 ans. Carbon2Chem a le potentiel de réduire d'environ 20 Mt/an les émissions de CO₂ de l'industrie sidérurgique allemande. La technologie peut aussi être transférée à d'autres industries à forte intensité en CO₂.

Westküste 100 : Dans le Schleswig-Holstein, Raffinerie Heide et plusieurs partenaires, dont Edf Allemagne et Ørsted, développent le projet Westküste 100 (ou ReWest100), un projet du programme allemand

35. « The LEILAC2 project », LEILAC, disponible sur : www.project-leilac.eu.

36. « Carbon2Chem », Thyssenkrupp, disponible sur : www.thyssenkrupp.com.

« véritable laboratoire de la transition énergétique », qui a commencé en 2020³⁷. Dans un premier temps, les partenaires convertiront l'électricité éolienne en hydrogène à l'aide d'un électrolyseur de 30 MW. Le projet pourrait être étendu à 700 MW d'ici 2030. L'hydrogène remplacera le gaz naturel pour alimenter les opérations de la raffinerie et servira à fabriquer du carburant pour l'aviation et sera également injecté dans les réseaux de gaz. Outre l'hydrogène dérivé de l'électrolyse, la production de carburants utilisera le CO₂ d'une cimenterie voisine. Le projet a un budget total de 89 millions €, dont 30 millions € financés par le gouvernement. En liaison avec le projet, un projet innovant pour la production de ciment à faibles émissions a également été testé (OXYFUEL100) et s'est achevé en avril 2021³⁸. À la cimenterie d'Holcim à Lägerdorf, deux études approfondies ont été menées pour préparer les investissements pour la conversion à un procédé de captage oxyfuel (en partenariat avec ThyssenKrupp Industrial Solutions et Linde). En plus du procédé oxyfuel, la faisabilité technique et économique de la séparation, du traitement et de l'acheminement du CO₂ en aval a été examinée. Le CO₂ capturé serait utilisé comme matière première pour la production de base chimique à l'échelle industrielle.

Des verrous spécifiques à lever

Le gouvernement fédéral reconnaît que le CCS sera indispensable pour assurer la décarbonation industrielle tout en maintenant la compétitivité des industries. Le nouveau programme de financement des technologies CCS/CCU montre l'engagement de l'Allemagne dans cette direction. Les industriels des secteurs à forte intensité énergétique désireux de réduire leurs émissions dès 2030 sont prêts à lancer des projets CCS dès que les conditions le permettront. Mais comme le reconnaissent l'ensemble des acteurs de la chaîne CCS, l'Allemagne doit rouvrir le débat sur l'acceptabilité du CCS, revoir sa législation en matière de stockage du CO₂ et mettre en place un cadre réglementaire approprié.

L'adhésion du public sera essentielle pour que le CCS soit mis en œuvre en Allemagne dans les années à venir. Le rôle du CCS a changé depuis dix ans lorsque les projets de CCS étaient liés aux centrales thermiques au charbon. Aujourd'hui, les projets se concentrent sur la décarbonation industrielle et la création d'émissions négatives. Dans ce nouveau contexte, expliquer le rôle du CCS dans la transition énergétique, et plus spécifiquement, les enjeux de la décarbonation

37. « Complete Sector Coupling: Green Hydrogen and Decarbonisation on an Industrial Scale », Westküste, disponible sur : www.westkueste100.de.

38. « Reallabor WESTKÜSTE100: Teilprojekt OXYFUEL100 erfolgreich abgeschlossen », Holcim, disponible sur : www.holcim.de.

industrielle, est une condition essentielle à l'acceptation sociétale des projets CCS en cours (visant le stockage transfrontalier) et, à terme, d'un potentiel stockage du CO₂ en Allemagne (qui requiert que la loi KSpG soit revue). Dans un premier temps, les projets de CCS allemands envisagent le stockage transfrontalier du CO₂ en mer du Nord, ce qui devrait faciliter leur acceptation. Mais dépendre des autres pays pour stocker le CO₂ généré en Allemagne n'est pas une solution idéale dans un pays qui possède des structures géologiques aptes au stockage du CO₂ et une expérience pointue du stockage (l'Allemagne est le premier pays stockeur de gaz naturel en Europe).

Un cadre réglementaire et des incitations au CCS doivent également être mis en place pour permettre l'investissement dans les projets initiaux. Le financement de grands projets de démonstration, comme l'indique la directive financement de février 2021, sera crucial pour la construction des projets initiaux. Par ailleurs, des mécanismes rémunérant les réductions d'émissions, tels que les contrats carbone pour la différence (CCfD), seront nécessaires pour compenser la différence entre les coûts des projets et le prix du CO₂ sur le marché européen.

Parallèlement, un réseau de transport du CO₂ doit être créé. Cette question sera plutôt résolue à l'échelle européenne, *via* la révision du TEN-E (en particulier pour l'inclusion d'autres modes de transport que les canalisations), mais elle requiert également que le gouvernement fédéral clarifie la procédure d'approbation des pipelines pour le CCS. Les aides prévues dans la directive financement permettront d'identifier les modèles d'affaires pour le transport du CO₂ et d'apporter un soutien pour l'identification des réseaux de transport de CO₂ locaux et régionaux, avant que des cadres réglementaires plus complets ne soient mis en œuvre pour la création des réseaux régionaux de CO₂.

Si l'Allemagne parvient à surmonter ces défis, elle pourrait être force d'innovation sur le marché mondial du CCUS, grâce aux partenariats forts établis entre le secteur privé et les universités allemandes, à ses industriels comme Heidelberg Cement et Linde notamment, déjà présents dans les technologies de captage du CO₂, et à l'engagement d'une multitude d'industriels dans les nombreux projets de démonstration CCU visant le couplage des industries et la création d'une économie circulaire du carbone.

Le CCUS en France : un potentiel encore sous-valorisé

Le CCUS dans le cadre de la politique climatique française

Les émissions de GES de la France s'élèvent à 441 MtCO₂eq en 2019³⁹. Le secteur industriel est responsable de 18 % des émissions (78 MtCO₂eq en 2019). Selon la SNBC2, le secteur doit réduire ses émissions de 35 % par rapport à 2015 à 53 MtCO₂eq en 2030 et de 81 % à l'horizon 2050 (15 MtCO₂eq d'émissions résiduelles, jugées incompressibles selon l'état des connaissances actuelles et les technologies disponibles). Pour le CO₂ seulement (328 Mt en 2019), les émissions industrielles représentent un total de 72 MtCO₂, dont 23 MtCO₂ sont des émissions liées aux procédés industriels (environ 75 % des émissions de l'industrie française sont soumises à l'ETS).

Bien que la SNBC2 ait intégré le CCS dans ses scénarios de décarbonation, l'ambition reste limitée en volume et dans le temps puisque le CCS n'est envisagé que pour le moyen/long terme (« dès que les conditions environnementales et économiques sont réunies pour le permettre »). Tout en reconnaissant qu'il s'agit d'une option essentielle pour l'avenir, la SNBC2 met en avant les « incertitudes sur ces technologies, leur acceptabilité, ainsi que sur la disponibilité et la fiabilité du stockage, qui conduisent à envisager avec prudence le développement de ces technologies, conditionné à la définition d'un modèle économique viable joint à une bonne maîtrise des risques sur le long terme ». Ce jugement semble trop négatif aux vues des développements récents, aussi bien sur les technologies de captage, que de la définition d'un modèle économique pour le CCS, et surtout des enjeux de la décarbonation industrielle à court terme.

Dans le cadre de la SNBC2, les énergies fossiles à des fins énergétiques ne sont utilisées qu'à la marge en 2050. Dans ce contexte, la SNBC2 n'envisage pas l'installation de technologies CCS

39. « Secten – le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France », Citepa, disponible sur : www.citepa.org ; « Les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'industrie manufacturière », Ministère de la transition écologique, 18 février 2021, disponible sur : ree.developpement-durable.gouv.fr.

sur des centrales à combustibles fossiles. Elle considère toutefois le potentiel à l'export de cette technologie. La production d'hydrogène bas carbone issue du reformage du gaz naturel avec CCS est incluse dans les politiques de décarbonation des industries (mais pas dans les mécanismes de soutien prévus par les pouvoirs publics pour la production d'hydrogène bas carbone). L'ordonnance du 17 février 2021 définit clairement les différents types d'hydrogène et précise ceux qui seront soutenus par les pouvoirs publics : la production d'hydrogène renouvelable, d'une part, ou d'hydrogène bas carbone produit par électrolyse de l'eau, d'autre part⁴⁰.

Toutefois, les stratégies de décarbonation d'un certain nombre d'industriels grands émetteurs en France et en Europe combinent à la fois l'hydrogène et le CCS, afin de décarboner leurs activités au moindre coût d'ici 2030, ce que l'hydrogène renouvelable ne peut faire, pour des raisons de coût de production et de disponibilités en électricité renouvelable (il faudrait entre 40 TWh et 50 TWh/an, soit de 8 à 10 % de la consommation électrique française pour substituer l'hydrogène carboné consommé par l'industrie chimique en France et environ 35 TWh/an si la totalité de l'acier produit en France utilisait de l'hydrogène renouvelable)⁴¹. L'utilisation de l'électricité d'origine nucléaire pour produire de l'hydrogène bas carbone requiert que l'électricité nucléaire soit reconnue au niveau européen comme intrant de l'électrolyse pour produire de l'hydrogène bas carbone. Ce n'est pas encore le cas aujourd'hui, bien que le mix électrique français très peu carboné permette de respecter le seuil d'émissions de GES de 3 grammes de CO₂ équivalent par kilogramme d'hydrogène (gCO₂eq/kgH₂), défini par la Communauté européenne en avril 2021 (Taxonomie). Cette alternative requiert également une réduction du coût de production (estimé à un peu moins de 3 €/kgH₂)⁴², et donc celui des électrolyseurs. Tout comme en Allemagne, développer des stratégies de production industrielle décarbonée combinant l'hydrogène décarboné et le CCS permet une décarbonation plus rapide et moins coûteuse.

Les industriels français souhaitent lancer des projets CCS avant 2030 pour décarboner leurs émissions dans différentes parties du territoire français. Ils préparent actuellement un contrat avec l'État français pour des actions concrètes en 2021-2023, dans le cadre d'une feuille de route pour le développement du CCUS en France. Cette

40. « Que faut-il retenir de l'ordonnance sur l'hydrogène ? », France Hydrogène, 18 février 2021, disponible sur : www.afhyac.org.

41. « La décarbonation des entreprises en France », Conseil général de l'économie, février 2021, disponible sur : www.economie.gouv.fr.

42. « Les modes de production de l'hydrogène », Assemblée nationale, Note n° 25, avril 2021, disponible sur : www.senat.fr.

feuille de route est en cours d'élaboration dans le cadre du Conseil national de l'industrie, au sein du Comité stratégique « Industries des nouveaux systèmes énergétiques⁴³ ». La signature du contrat devrait intervenir prochainement (elle ne l'est pas encore au moment de la rédaction de ce rapport). Les feuilles de route de décarbonation des industries des mines et métallurgie, de la chimie et du ciment ont été révisées au cours du second trimestre 2021 et permettent déjà d'évaluer le rôle du CCS dans ces industries clé. Elles précisent les trajectoires de décarbonation à l'horizon 2030 et les leviers technologiques de réduction des émissions. Elles envisagent des technologies de rupture au-delà des mesures de décarbonation traditionnelles, telles que l'efficacité énergétique, le recyclage, le remplacement de combustibles fossiles par des énergies renouvelables. Le CCUS figure comme levier de décarbonation des trois filières industrielles. Dans le secteur de l'acier, il s'agit dans un premier temps de la capture et du stockage du CO₂ émis par les procédés traditionnels (projet 3D, cf. ci-après), et à l'horizon 2030 du déploiement de la filière DRI (réduction du minerai de fer), utilisant de l'hydrogène bas carbone initialement (projet d'ArcelorMittal et Air Liquide à Dunkerque, cf. ci-après⁴⁴). Par ailleurs, un Plan Sidérurgie, à l'image du plan allemand *Steel Action Concept*, est en cours d'élaboration. Dans le cas du ciment, le CCUS est envisagé après 2035 seulement et permettrait de réduire les émissions de la filière de 5 Mt/an d'ici 2050⁴⁵. Bien qu'il s'agisse d'un levier essentiel pour décarboner la production de ciment, des efforts d'innovation sont encore nécessaires. Dans le cas de la chimie, la feuille de route de mai 2021 (qui doit être complétée en 2021 pour approfondir le déploiement de technologies de rupture) estime que le CCS pourrait permettre d'abattre les émissions de GES de la chimie à hauteur de 600 000 tCO₂eq/an en 2030 et propose d'établir un projet d'envergure sur un site industriel duplicable à d'autres sites⁴⁶. Ces feuilles de route, complétées par des avenants aux contrats stratégiques de filière, précisent les mesures à mettre en place, telles que le soutien à l'investissement aux projets de décarbonation et à la mise en place de démonstrateurs, à la R&D et à l'industrialisation des

43. « La Filière Industries des Nouveaux systèmes énergétiques », Comité stratégique de filière nouveaux systèmes énergétiques, disponible sur : systemesenergetiques.org ; « Le contrat de la filière industries des nouveaux systèmes énergétiques », Conseil national de l'industrie, 10 juillet 2019, disponible sur : www.conseil-national-industrie.gouv.fr.

44. « France Relance : Signature de l'avenant au contrat de filière du Comité stratégique de filière "Mines & métallurgie" et publication de la feuille de route de décarbonation de la filière », Conseil national de l'industrie, 20 mai 2021, disponible sur : www.conseil-national-industrie.gouv.fr.

45. « Décarbonation : la feuille de route de la filière ciment à horizon 2030 et 2050 », Conseil national de l'industrie, 19 mai 2019, disponible sur : www.conseil-national-industrie.gouv.fr.

46. « France Relance : publication de la feuille de route de décarbonation de la filière Chimie », MTE, 7 mai 2021, disponible sur : www.ecologie.gouv.fr.

nouveaux procédés. La mise en place de mécanismes tels que des CCfD est également prévue, ainsi que des mesures pour garantir l'accès compétitif et prévisible à l'électricité bas carbone et, au niveau européen, des mécanismes efficaces de protection contre les fuites de carbone.

Des financements encore limités, mais de nouveaux moyens sont mis en place

Deux agences nationales financent des projets CCS et CCU en France : l'Agence nationale de la recherche (ANR) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Aujourd'hui, il n'y a pas de financement national ciblé sur le CCUS, les appels nationaux de l'ADEME et de l'ANR étant de nature plus générique. Cependant, la France a rejoint en 2018 le projet européen ERA-NET ACT. Lors de l'appel de 2018, la France a engagé 0,5 million € à travers l'ADEME. Le financement est réservé aux entités nationales. Pour l'appel d'offres de 2020 (ACT3), la France a augmenté sa participation à 2 millions € et l'ADEME et l'ANR s'impliquent ensemble. Les projets seront financés pour trois ans à partir de septembre 2021⁴⁷. Par ailleurs, trois projets de capture du CO₂ ont obtenu un soutien financier dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA) (CRYOCAP H₂, IGAR et DINAMX, cf. ci-après).

Alors que jusqu'à présent, les financements aux technologies de CCUS étaient limités, des financements plus ambitieux sont mis en place, au travers du plan de relance et des PIA. Le plan de relance français mobilise plus de 35 milliards € en faveur de l'industrie, avec une feuille de route structurée autour de quatre axes : décarboner, (re)localiser, moderniser et innover. Certains projets de CCUS sont éligibles aux appels à projets de l'ADEME sur la décarbonation de l'industrie dans le cadre de France Relance (une seconde vague d'appels à projets a été lancée en mars 2021). La recherche est également financée via des appels à projets de recherche (APR). Les soutiens du 4^e PIA (20 milliards € sur quatre ans⁴⁸) doivent permettre l'émergence de solutions de décarbonation créant de la valeur sur le territoire mais également de promouvoir leur déploiement au sein de l'industrie pour assurer la pérennité des entreprises implantées en France. Sont en particulier ciblés : l'amélioration de l'efficacité

47. « Calls », ACT, disponible sur : www.act-ccs.eu.

48. « 4^e programme d'investissement d'avenir (PIA) : dotation de 20 md€ », Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance, 8 janvier 2021, disponible sur : www.entreprises.gouv.fr.

énergétique des procédés ; la décarbonation du mix énergétique des industriels en particulier en matière de chaleur ; le déploiement de procédés décarbonés et le CCS ou la CCU.

Le stockage du CO₂

Le cadre législatif pour le stockage du CO₂ dans le sous-sol français est en place. La France a transposé la directive européenne sur le CCS dès 2010 (loi « Grenelle 2 » de 2010 et décret relatif au stockage géologique de CO₂ du 31 octobre 2011). L'objectif de ce cadre juridique est d'assurer que le stockage sera permanent et sûr pour l'environnement et la santé humaine.

Selon le BRGM, la France dispose de trois principaux bassins sédimentaires dans lesquels le stockage terrestre serait possible dans les aquifères salins profonds (Bassin parisien, Bassin aquitain, Bassin du Sud-Est) ou dans les champs de production d'hydrocarbures épuisés (Bassin parisien, Bassin aquitain). Les capacités théoriques de stockage dans les aquifères salins profonds du Bassin parisien ont été estimées à 26 GtCO₂, à partir de calculs volumétriques. Celles de 69 gisements déplétés ont été estimées à 1 GtCO₂. Les estimations prudentes du projet européen GeoCapacity donnent une capacité de stockage de 8 GtCO₂ pour les aquifères salins et de 770 Mt pour les gisements déplétés⁴⁹. Le projet France Nord (2009-2011) a permis de mieux cerner le potentiel de stockage dans deux zones de l'aquifère le plus profond du Bassin parisien, à partir d'une modélisation dynamique de réservoir simulant l'injection de CO₂ dans le temps. Un total de 222 MtCO₂ de capacité de stockage a été estimé pour ces deux zones. Le projet VASCO a réalisé une première recherche d'identification de sites potentiels autour de Fos-sur-Mer. Les résultats n'ont pas abouti à l'identification d'un site de stockage avec les capacités requises (de 10 à 20 MtCO₂ stockées/an), mais ils ont permis d'identifier quatre structures géologiques propices au stockage du CO₂ d'une capacité potentielle de stockage de 57 Mt au total. Le bassin géologique d'Aquitaine contient de nombreux gisements d'hydrocarbures épuisés, dont l'immense champ gazier de Lacq et le champ de Parentis, qui offrent des possibilités de stockage de CO₂. Le potentiel de stockage de CO₂ de l'ensemble des réservoirs épuisés a été estimé à 560 MtCO₂ dans le cadre du projet METSTOR financé par l'ADEME. Au cours de la dernière décennie, TotalEnergies a démontré la faisabilité d'une exploitation industrielle intégrée de CCS à échelle réduite dans cette région, où le stockage géologique du CO₂

49. « Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide », EU GeoCapacity Consortium, disponible sur : www.geology.cz.

est mieux accepté que dans d'autres régions, vu l'historique de production et de stockage du gaz naturel dans la région.

D'une manière générale, le potentiel de stockage géologique de CO₂ en France est encore mal caractérisé à terre et inconnu en mer (plateaux continentaux). Des études sont nécessaires pour estimer les capacités de stockage de CO₂ des aquifères salins profonds du Bassin aquitain, tant à terre qu'en mer dans l'Atlantique, et celles du Bassin du Sud-Est. Des sites de stockage pourraient notamment être localisés sur la côte Atlantique et en Méditerranée. Comme chaque site est un cas particulier, des reconnaissances par forage et la réalisation d'installations pilotes d'injection seront nécessaires pour mieux caractériser les aquifères salins profonds.

En complément de la méthode classique de stockage du CO₂ sous forme supercritique, un concept innovant de stockage de CO₂ sous forme dissoute, tout en extrayant la chaleur géothermique, est étudié par le BRGM (CO₂-DISSOLVED). Il est bien adapté aux petits émetteurs industriels de CO₂ et aux solutions locales. Ce concept était l'objet du projet GEOCO₂ (2019-2020), co-financé par la région Centre-Val de Loire et coordonné par le BRGM⁵⁰. La France étudie ainsi trois approches complémentaires : le grand stockage offshore en mer du Nord ou en Méditerranée (environ 10 Mt/an), le stockage moyen à terre (environ 1 Mt/an) et le petit stockage décentralisé combiné à la récupération de chaleur (environ 80 à 150 kt/an). Initialement, les projets de CCS envisagent le stockage en mer du Nord (Northern Lights, Porthos par exemple), ce qui requiert que la France signe des accords bilatéraux avec les pays cibles.

Selon le BRGM et la SNBC₂, la localisation des sources fixes d'émissions et des zones potentielles de stockage est plutôt satisfaisante sur le territoire métropolitain. À l'inverse, l'avis technique de l'ADEME sur le CCS en France, publié en 2020, évalue la localisation des zones favorables de stockage comme une limite importante⁵¹. L'ADEME évalue le volume stockable de CO₂ à 43 Mt/an, dans un calcul « sans contrainte » (i.e. proximité entre sites identifiés de stockage géologique de CO₂ et sites émetteurs) et à 24 MtCO₂/an dans un calcul « avec contrainte » (notamment en considérant les risques d'opposition sociétale). L'étude porte sur les sites industriels émettant plus de 0,1 MtCO₂/an, soit 120 sites classés ETS qui ont émis 65 MtCO₂ en 2017 (dont 16,5 Mt liées aux procédés). Avec ces hypothèses, l'ADEME conclut que le CCS n'est applicable en France qu'à un nombre limité de sites industriels dans trois zones

50. « CO₂-Dissolved: GEOCO₂ », BRGM, disponible sur : co2-dissolved.brgm.fr.

51. « Le captage et stockage géologique de CO₂ (CSC), un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles », ADEME, 21 juillet 2020, disponible sur : presse.ademe.fr.

spécifiques du territoire : la zone autour de Dunkerque (15 Mt/an de CO₂, coût minimal estimé à 100 €/t CO₂), la zone de Rouen-Le Havre (6 Mt/an de CO₂, coût minimal estimé à 125 €/tCO₂) et la zone de Lacq (3 Mt/an de CO₂, coût minimal estimé à 69 €/tCO₂). Les autres régions ont été exclues, en raison de l'absence de capacités de stockage à proximité, ou en estimant que l'opposition sociale serait trop forte pour stocker le CO₂ sur le territoire. Avec ces hypothèses, l'ADEME conclut que la mise en place du CCS sur des sites industriels présente un potentiel limité et considère que sa difficile mise en œuvre et son coût très élevé en font une solution risquée qui arrive en dernier ressort dans une analyse coûts-bénéfices. Ces conclusions sont contredites par les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ou de l'AIE, qui au contraire mettent en avant le rôle crucial du CCS et montrent que limiter le CCS rendrait la transition énergétique plus difficile et coûteuse. Par ailleurs, les hypothèses retenues sont très restrictives en l'absence d'études plus poussées à la fois sur le potentiel de stockage terrestre et en mer, l'acceptabilité sociale du stockage au niveau local et le coût du CCS par rapport aux alternatives réalistes de décarbonation dans le secteur industriel⁵².

Le dynamisme de la recherche académique et industrielle en France, comme le montre la section suivante, ainsi que les possibilités de stockage en mer du Nord initialement, et à terme sur le territoire français, ainsi que la mutualisation des émissions sur le territoire permettent au contraire de considérer le potentiel du CCS comme une voie importante pour réduire les émissions de clusters industriels rapidement. C'est également une des conclusions du Conseil général de l'économie (CGE) dans son rapport sur la décarbonation des entreprises en France⁵³.

Les projets CCUS en France

Malgré l'ambition limitée de la politique française en matière de CCS jusqu'à présent, la recherche académique et industrielle est très active en France et s'est accélérée depuis 2019. La recherche avait abouti à plusieurs installations pilotes dans les années 2000-2010 pour tester à échelle réduite des technologies de captage, mais aussi l'ensemble de la chaîne. TotalEnergies a testé avec succès une première chaîne industrielle intégrée de captage-transport-stockage de CO₂ à Lacq.

52. I. Czernichowski-Lauriola *et al.*, « The Gradual Integration of CCUS into National and Regional Strategies for Climate Change Mitigation, Energy Transition, Ecological Transition, Research and Innovation: an Overview for France », Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021, SSRN, 8 avril 2021, disponible sur : papers.ssrn.com.

53. « La décarbonation des entreprises en France », Conseil général de l'économie, *op. cit.*

EDF et Alstom, avec le soutien de l'ADEME, ont réalisé en 2014 un démonstrateur de recherche de captage de CO₂ implanté sur la centrale EDF du Havre. Le projet Valorco a étudié les possibilités de valorisation et réduction des émissions de CO₂ dans l'industrie (utilisation de CO₂ issu des cokeries d'ArcelorMittal).

Plus récemment, des projets à plus grande échelle et de nouvelles initiatives industrielles ont vu le jour, portant sur la démonstration de procédés innovants de captage du CO₂, la décarbonation de la production d'acier et la création de clusters industriels CCS avec transport et stockage du CO₂ en mer du Nord, mais également dans le sous-sol français. Les projets d'infrastructure nécessaires au transport et stockage du CO₂ en mer du Nord commencent à se mettre en place : deux projets de transport, l'un depuis Dunkerque, l'autre depuis Le Havre, ont été déposés auprès de la CE. De grands *clusters* pourraient être établis en France : les deux grandes régions, vallée du Rhône et Bassin parisien, qui offrent le plus grand potentiel pour les technologies CCUS, font partie du projet européen STRATEGY CCUS (2019-2023)⁵⁴, coordonné par le BRGM.

Cryocap : Depuis 2015, Air Liquide capte le CO₂ émis lors de la production d'hydrogène de son unité de Port-Jérôme (Normandie)⁵⁵. Le captage se fait par le procédé cryogénique Cryocap, développé et breveté par Air Liquide. Il a été installé sur l'unité de reformage de gaz naturel d'Air Liquide qui produit de l'hydrogène pour la raffinerie voisine d'ExxonMobil (capacité de captage de 100 000 tCO₂/an). Le procédé Cryocap a été décliné en fonction de ses applications (hydrogène, acier, centrales thermiques). Cryocap H₂ permet des capacités de 300 à 2 000 tonnes par jour, une augmentation de 10 à 20 % de la production d'hydrogène et présente des coûts OPEX et CAPEX de 45 dollars (\$)/tCO₂⁵⁶. Cette innovation s'inscrit dans la stratégie du groupe Air Liquide qui vise à décarboner sa production d'hydrogène dédiée aux applications énergétiques. Air Liquide vient de remporter un contrat avec Zeeland Refinery, *joint-venture* entre TotalEnergies et Lukoil, pour fournir

54. Le projet soutient le déploiement du CCUS dans huit régions jugées prometteuses d'Europe du Sud et de l'Est, dont la vallée du Rhône et le Bassin parisien. Collectivement, ces régions produisent 45 % des émissions de CO₂ de l'Europe dans les secteurs de l'industrie et de l'énergie, voir : www.strategyccus.eu.

55. « Première mondiale : Air Liquide inaugure Cryocap™, une technologie de captage de CO₂ par le froid », Air Liquide, 5 novembre 2015, disponible sur : fr.media.airliquide.com.

56. « Cryocap™ H₂ – Séparation cryogénique du CO₂ », Air Liquide, disponible sur : www.engineering-airliquide.com.

une solution de captage et de liquéfaction du CO₂ aux deux sites de production d'hydrogène de Flessingue (Pays-Bas)⁵⁷. Le procédé Cryocap permettra de capter plus de 90 % des émissions de la production d'hydrogène et contribuera à la décarbonation du site de Flessingue, en captant plus de 0,8 MtCO₂/an, qui seront stockées en mer du Nord.

Projet 3D/DINAMX : Un consortium réunissant 11 acteurs de six pays européens, dont ArcelorMittal, Axens, l'IFPEN et TotalEnergies, travaille depuis 2019 sur un projet de démonstration d'un procédé innovant de captage de CO₂ d'origine industrielle, DMX, développé et breveté par l'IFPEN, et qui sera commercialisé par Axens⁵⁸. Ce projet s'inscrit dans une étude plus globale consacrée au développement du futur pôle européen de captage-stockage de CO₂ de Dunkerque-Mer du Nord. Le projet 3D (pour DMX – *Demonstration in Dunkirk*) fait partie du programme européen Horizon 2020. Il dispose d'un budget de 19,3 millions € sur 4 ans (2019-2022), dont 14,8 millions € de subventions de l'UE. Il est coordonné par l'IFPEN. Le projet 3D vise un triple objectif :

- Démontrer l'efficacité du procédé DMX à l'échelle du pilote industriel. Le pilote, conçu par Axens, construit sur le site sidérurgique ArcelorMittal de Dunkerque, sera capable, dès 2021, de capter 0,5 tCO₂/h issu du gaz sidérurgique. Le procédé DMX utilise un solvant qui réduit de près de 35 % la consommation d'énergie du captage par rapport au procédé de référence. Par ailleurs, en utilisant, en complément, la chaleur produite sur le site, le coût du captage sera réduit de 30 %.
- Préparer la mise en place d'une première unité industrielle sur le site ArcelorMittal de Dunkerque, qui pourrait être opérationnelle à partir de 2025. Elle devrait capter plus de 125 tCO₂/h, soit plus d'1 MtCO₂/an.
- Concevoir le futur pôle européen de Dunkerque-Mer du Nord.

Le projet 3D a l'ambition de valider des solutions techniques répliquables et de permettre le déploiement industriel de la technologie CCS à travers le monde. Le projet a également obtenu un financement des pouvoirs publics français dans le cadre des PIA (DINAMX, 2020-2024). L'objectif est de démontrer le procédé DMXTM et d'étendre son champ d'application à d'autres types d'émetteurs.

DRI et hydrogène bas carbone à Dunkerque : ArcelorMittal a plusieurs projets de DRI utilisant l'hydrogène, combinée à une aciérie

57. M. P. Bailey, « Air Liquide Engineering & Construction to Provide Carbon-Capture Technology for Zeeland Refinery », Chemical Engineering, 3 juin 2021, disponible sur : www.chemengonline.com.

58. DMX Demonstration Dunkirk, disponible sur : 3d-ccus.com ; « Lancement du projet européen innovant "3D" pour capter et stocker le CO₂ à l'échelle industrielle », ArcelorMittal, mai 2019, disponible sur : france.arcelormittal.com.

électrique (EAF), dont le déploiement d'une usine DRI-EAF à grande échelle sur le site de Dunkerque, en partenariat avec Air Liquide⁵⁹. L'installation de DRI utiliserait initialement de l'hydrogène bas carbone (reformage du gaz + CCS) fourni par Air Liquide. Elle contribuerait à réduire les émissions du site de 2,85 MtCO₂/an d'ici 2030.

IGAR : À Dunkerque également, ArcelorMittal développe un procédé hybride de haut-fourneau, qui implique l'utilisation de la technologie d'injection de gaz DRI dans la cuve du haut-fourneau ainsi que de l'injection des gaz sidérurgiques dans les tuyères du haut-fourneau, en utilisant la technologie plasma pour créer un gaz réducteur. Il s'agit de la première mise en œuvre à grande échelle d'une technologie hybride haut-fourneau/DRI.

Cluster de Dunkerque et projet Dartagnan : Le *hub* de **Dunkerque** (environ 19 MtCO₂/an) est étudié par le projet 3D (cf. ci-après) qui prévoit la création du futur pôle européen de Dunkerque-Mer du Nord. Celui-ci pourrait capter, conditionner, transporter et stocker 10 MtCO₂/an et verrait le jour à l'horizon 2030. Ce pôle s'appuierait sur les infrastructures de transport pour le stockage du CO₂ en mer du Nord mises en place *via* d'autres projets comme celui de Northern Lights.

Un nouveau projet, le **projet Dartagnan**, a été proposé en vue de la préparation de la 5^e liste PCI des réseaux de transport transfrontaliers de CO₂⁶⁰. Il vise à créer un *hub* d'exportation de CO₂ multimodal ouvert aux tiers depuis le port de Dunkerque et permettrait de connecter les principaux émetteurs industriels du port et de son arrière-pays avec les projets phares de CCS en cours de développement en mer du Nord néerlandaise pour le stockage permanent de CO₂. Il prévoit une interconnexion multimodale (route, voies ferrée et fluviale, bateau et *pipeline*) du réseau européen de transport et de stockage de CO₂ pour relier la France aux *hubs* CCS de la mer du Nord. Le transport du CO₂ se ferait sous forme liquide (LCO₂) par bateau depuis le port de Dunkerque. Le projet pourrait démarrer en 2025-2026.

Cluster du Havre : Le *cluster* du Havre (Le Havre, Port-Jérôme, Rouen), environ 10 MtCO₂ émises annuellement, est l'objet d'études par l'ADEME et l'association Synerzip-LH visant la création d'un *cluster* CO₂ dans la région et analysant la contribution des technologies CCU/CCS à la décarbonation des industries locales, y compris les possibilités d'exportation pour un stockage sous la mer du Nord.

Une alliance entre 11 entreprises de la basse vallée de la Seine, soutenue par Haropa et comprenant de grands émetteurs (raffineries et producteurs d'engrais) vient de déposer un projet à Bruxelles pour la mise en place d'une

59. « Air Liquide and ArcelorMittal Join Forces to Accelerate the Decarbonisation of Steel Production in the Dunkirk Industrial Basin », ArcelorMittal, 17 mars 2021, disponible sur : corporate.arcelormittal.com.

60. « Candidate PCI Projects in Cross Border Carbon Dioxide (CO₂) Transport Networks in View of Preparing the 5th PCI List », Commission européenne, disponible sur ec.europa.eu.

infrastructure mutualisée de captage, liquéfaction et transport de CO₂ vers la mer du Nord⁶¹. L'objectif est de capter progressivement d'ici à 2040 quelque 7 MtCO₂/an issus d'une quarantaine d'établissements industriels répartis entre Rouen et Le Havre.

Centre du Bassin parisien : Le centre du Bassin parisien (Paris, Orléans) est étudié dans le cadre du nouveau projet européen **PilotSTRATEGY H2020 (2021-2026)**, coordonné par le BRGM, qui vise à affiner la connaissance des aquifères salins profonds pour le stockage géologique du CO₂ dans 10 régions d'Europe du Sud et de l'Est. Une demande de construction d'une installation de démonstration CCS dans la région a été soumise fin octobre 2020 au premier appel du Fonds européen d'innovation⁶². Le projet **CO2SERRE (2020-2022)**, co-financé par la région Centre-Val de Loire et coordonné par le BRGM, étudie la faisabilité technico-économique d'un pilote de captage du CO₂ émis par une centrale de cogénération biomasse à Orléans, pour l'utiliser dans les serres locales et pour stocker le surplus localement dans un aquifère salin profond, conduisant à des émissions négatives (BECCS)⁶³.

PYCASSO (Bassin aquitain) : Les émissions industrielles annuelles de CO₂ de la région aquitaine sont de l'ordre de 3 MtCO₂/an. La région possède des infrastructures gazières (transport, stockage) qui pourraient être réutilisées pour former un *cluster* CCU/CCS, incluant le stockage géologique du CO₂. C'est l'objet du programme **PYCASSO**, développé par le pôle AVENIA, qui vise à fédérer tous les acteurs (collectivités territoriales, industriels émetteurs de CO₂, transporteurs, opérateurs de valorisation et de stockage du CO₂, organismes de recherche) dans une grande coalition, pour adapter les procédés de captage aux émissions locales, créer un réseau de transport et mettre en place un *hub* de valorisation et de stockage du CO₂ basé sur les capacités des *clusters* industriels et des champs gaziers déplétés du piémont pyrénéen⁶⁴. Le *hub* couvrirait une zone d'environ 200 km autour de la zone Pau-Lacq jusqu'au nord de l'Espagne (projet transfrontalier). Ce projet, au stade de la conception, pourrait voir le jour en 2030.

La Vallée du Rhône et ses clusters : La vallée du Rhône (du complexe industriel de Fos-Berre/Marseille jusqu'à Lyon), ou « Vallée de la chimie », est l'une des régions sélectionnées en juin 2020 dans le cadre du

61. N. Jourdan, « Captage du CO₂ : Le Havre met les gaz ! », *La Tribune*, 30 avril 2021, disponible sur : www.latribune.fr.

62. I. Czernichowski-Lauriol *et al.*, « The Gradual Integration of CCUS into National and Regional Strategies for Climate Change Mitigation, Energy Transition, Ecological Transition, Research and Innovation: An Overview for France », *op. cit.*

63. I. Gravaud *et al.*, « Biomass-Origin Carbon Capture, Storage and Utilization in Greenhouses: The Co2serre Project in Centre-Val De Loire (France) », *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021, SSRN*, 26 mars 2021, disponible sur : ssrn.com.

64. « Le pôle AVENIA lance PYCASSO, un projet de territoire transfrontalier (France-Espagne) visant à décarboner l'industrie locale », Avenia, 31 mai 2021, disponible sur : www.pole-avenia.com.

projet STRATEGY CCUS. Elle va bénéficier d'une feuille de route détaillée sur le CCUS. La région a émis 18,6 MtCO₂ en 2018. Elle regroupe une grande variété d'industries fortement émettrices autour de Fos-Berre/Marseille et la métropole lyonnaise, ainsi que des émetteurs de moyenne et petite échelle⁶⁵. Elle présente la possibilité de développer plusieurs *clusters* CCUS, dont celui de Fos-Berre/Marseille. Des études ont déjà déterminé les opportunités d'utilisation du CO₂, telles que la fabrication de produits chimiques, de matériaux et de carburants. Un *pipeline* pour collecter le CO₂ des sites émetteurs est en cours de planification. En ce qui concerne le CCS, des études sont encore nécessaires pour rechercher des sites de stockage en mer et caractériser les réservoirs identifiés à terre (mais offrant des capacités de stockage limité). Le transport du CO₂ pourrait se faire par voie multimodale vers un stockage dans la mer Méditerranée. Ultérieurement, un corridor de transport de la vallée du Rhône pourrait relier la région et les pays voisins du sud de l'Europe avec les grands sites de stockage en mer du Nord.

Dans le domaine de la CCU, plusieurs projets à différents stades de développement ont vu le jour récemment, portés par des industriels, les régions et co-financés par les PIA et les fonds européens. Certains sont liés à la stratégie hydrogène de la France qui comprend l'utilisation de l'hydrogène et du CO₂ pour fabriquer des produits/matériaux décarbonés et du méthane de synthèse. Quelques exemples de projets CCU, illustrant leur diversité, sont décrits ci-dessous.

MéthyCentre : coordonné par Storengy, premier projet de démonstration de Power to Gas (PtG) en France (à Céré-La-Ronde) couplé à une unité de méthanisation⁶⁶.

Jupiter 1000 : coordonné par GRTgaz et situé à Fos-sur-Mer, premier démonstrateur industriel de PtG en France avec une puissance de 1 MWe pour l'électrolyse et un procédé de méthanation avec captage du CO₂⁶⁷. L'installation a pour but de transformer l'électricité renouvelable en gaz pour pouvoir la stocker. L'hydrogène renouvelable est produit à partir d'énergie renouvelable par deux électrolyseurs impliquant deux technologies différentes. La première injection d'hydrogène a eu lieu en février 2020. Le démonstrateur comprend également une unité de captage de CO₂ et une unité de méthanation pour convertir l'hydrogène produit et le CO₂ en méthane de synthèse. Ce gaz renouvelable sera ensuite injecté sur le réseau de transport de gaz.

65. « Rhône Valley – France », Strategy CCUS, disponible sur : www.strategyccus.eu.

66. Voir : methycentre.eu.

67. Voir : www.jupiter1000.eu.

Carbalyst et CarbHFlex : Ces projets, développés par ArcelorMittal à Fos-sur-Mer visent à capturer et valoriser le CO₂ des gaz de haut-fourneau et produire des carburants ou solvants renouvelables et des produits chimiques de base à partir d'hydrogène

HYBIOL est un projet de reconversion du site de la centrale de Gardanne-Meyreuil suite à l'arrêt des chaudières charbon⁶⁸. Il s'agirait de combiner une partie du CO₂ capté dans les fumées de combustion de la centrale biomasse, avec de l'hydrogène renouvelable produit sur place pour produire du bio-méthanol (150 000 t/an).

Carbon8 Systems : Début 2021, le cimentier Vicat a installé la technologie CCU « CO₂ntainer » de la compagnie britannique Carbon8 Systems sur sa cimenterie de Montalieu-Vercieu en Isère⁶⁹. Dans sa première phase d'exploitation, le CO₂ntainer traitera et convertira jusqu'à 12 000 tonnes de poussières de chlore, issues du procédé de production de la cimenterie, en granulats qui entreront dans la composition du béton.

D'autres projets, au stade de la recherche et du démonstrateur, s'intéressent à la production d'algues à partir du CO₂ industriel (**CimentAlgue, VASCO2**) et aux bétons décarbonés (**FastCarb, Carboval**).

La France est également très engagée dans la coopération internationale⁷⁰. Le BRGM a coordonné le projet **ENOS** (2016-2020)⁷¹, qui s'intéressait aux défis techniques et sociétaux du stockage du CO₂ *onshore*, proche des lieux d'émission. L'IFPEN coordonne le projet **CHEERS** (2018-2022) qui va tester un procédé innovant de captage du CO₂ sur un pilote en Chine. EDF coordonne le projet européen **sCO₂-Flex** (2018-2021), qui vise à rendre la production d'électricité plus flexible et soutenir le réseau d'électricité⁷². ENGIE coordonne le projet **C₂FUEL** (2019-2023), qui vise à développer des technologies de conversion de CO₂ grâce à un concept de symbiose industrielle entre les industries à forte intensité en carbone, la production d'électricité et l'économie locale⁷³. Le concept sera démontré à Dunkerque sur la centrale à cycle combiné DK6 et l'usine sidérurgique d'ArcelorMittal. La France est par ailleurs membre fondateur d'**ECCSEL**, l'infrastructure de recherche européenne sur le CCUS, qui permet aux chercheurs du monde entier d'accéder à des installations de recherche de pointe.

68. « HYBIOL : production à échelle industrielle d'hydrogène vert et de biométhanol sur le site de la centrale biomasse de Meyreuil-Gardanne », Cap energies, mars 2020, disponible sur : www.capenergies.fr.

69. F. Sigot, « Vicat transforme ses poussières de cimenterie en granulats », *Les Échos*, 4 janvier 2021, disponible sur : www.lesechos.fr.

70. I. Czernichowski-Lauriol, « Captage et Stockage du CO₂ : le puits de carbone géologique », *Académie des Sciences*, vol. 352, n° 4-5 (2020), p. 383-399, disponible sur : doi.org.

71. Voir : www.enos-project.eu.

72. Voir : www.sco2-flex.eu.

73. Voir : c2fuel-project.eu.

La France bénéficie d'une communauté structurée au sein du Club CO₂, avec des acteurs industriels et des organismes français à la pointe de la recherche et de l'innovation au niveau international⁷⁴. Ces acteurs couvrent tous les maillons de la chaîne de valeur : captage, transport, stockage, utilisation du CO₂. Créé en 2002 sous la coordination de l'ADEME, avec le soutien du BRGM et de l'IFPEN, le Club est présidé par l'IFPEN depuis 2020. L'intérêt pour les technologies de CCUS est démontré par le nombre croissant de membres du Club CO₂ : 35 en juin 2021, dont des compagnies impliquées dans le développement de procédés innovants de captage du CO₂, comme Air Liquide, l'IFPEN, Axens, des technologies avancées liées au stockage du CO₂, comme TotalEnergies (présent dans les grands projets avancés de transport et stockage du CO₂ en mer du Nord, dont Northern Lights, Endurance et Aramis, et également dans de nombreux projets de captage du CO₂ en France, Europe et dans le monde), le BRGM (qui pilote de nombreux projets européens), Geogreen, l'IFPEN, Schlumberger, mais aussi de grands industriels force d'innovation sur la chaîne CCUS, tels que Alstom, le CEA, Technip, ArcelorMittal, Vicat, EDF, Engie, LafargeHolcim, Ciment Calcia, Teréga, GRDF, GRTgaz, Veolia, Solvay, Suez.

Des atouts à exploiter dès maintenant

Jusqu'à présent, l'attitude des décideurs politiques français vis-à-vis des technologies de CCS a été très prudente. Ainsi, malgré l'étendue de ses structures sédimentaires, un cadre réglementaire sur le stockage du CO₂ en place, une compétence industrielle couvrant l'ensemble de la chaîne et une politique ambitieuse de décarbonation industrielle, la France n'a pas encore lancé de projet de stockage à grande échelle sur son sous-sol. Mais un changement se dessine face aux enjeux de la décarbonation industrielle et sous l'impulsion d'initiatives industrielles. La SNBC2 appelle à soutenir les développements d'unités pilotes et éventuellement commerciales de CCS et CCU. Les feuilles de route portant sur la décarbonation des industries à forte intensité énergétique, révisées au second trimestre 2021, incluent toutes le CCS. Une feuille de route pour le développement du CCUS en France est en cours d'élaboration et de nouveaux financements sont à l'étude. Les industriels de ces secteurs ont initié des projets CCS afin de réduire les émissions de leurs productions dès 2030. Tout comme en Allemagne, les projets initiaux de CCS visent le stockage du CO₂ en mer du Nord. Mais les premières

74. Voir : www.club-co2.fr.

initiatives pour développer des projets de clusters industriels CCS avec un stockage du CO₂ sous le sous-sol français émergent.

Il est nécessaire aujourd'hui de définir clairement l'apport des technologies de CCS dans la décarbonation du secteur industriel, en évaluant le potentiel des filières CCS (et/ou CCU) et en les comparant aux alternatives réalistes de décarbonation. Cela permettra de soutenir les projets entrepris par les industriels français et aux territoires d'appuyer leurs projets face aux parties prenantes. Deux développements sont à mener en parallèle : des *clusters* CCS visant le stockage en mer du Nord (régions de la façade nord atlantique) et des *clusters* visant le stockage en France. Les études des bassins parisiens et aquitains ont montré qu'ils offrent un potentiel de stockage élevé. Il est toutefois nécessaire de mieux caractériser ce potentiel, et notamment d'évaluer celui du domaine maritime, et d'échanger avec les populations locales sur l'enjeu de la décarbonation industrielle et les aspects de sécurité du stockage de CO₂. Il convient également de renforcer l'effort de R&D en matière de captage du CO₂, qui montre déjà des résultats à l'export, et permettra de réduire considérablement le coût de la chaîne CCS. Enfin, la mise en place d'un cadre réglementaire approprié est nécessaire pour soutenir le financement des investissements initiaux.

Les atouts de la France sont nombreux pour créer une filière CCS (et CCU), permettant de développer des *clusters* industriels décarbonés combinant CCS, CCU et hydrogène, créer des marchés à l'export sur un marché mondial promis à une croissance exponentielle, sauvegarder et créer des emplois sur le territoire, notamment en évitant que les activités industrielles ne se délocalisent près des lieux de stockage actuels en mer du Nord. Les acteurs de la recherche et de l'industrie française sont mobilisés et se sont regroupés au sein du Club CO₂, qui compte 35 industriels et organismes de renom international dans la chaîne de valeur CCUS. L'industrie française, grâce à Air Liquide, TotalEnergies, l'FPEN, Axens, le BRGM, notamment, est reconnue au niveau mondial pour son expertise et dispose de compétences couvrant l'ensemble de la chaîne CCS, depuis des procédés de captage innovants jusqu'à une expertise pointue des technologies de stockage du CO₂. La France est le premier pays européen stockeur de gaz naturel en aquifères salins profonds et dispose d'une expertise spécifique que peu de pays possèdent. Les infrastructures de gaz naturel existantes peuvent être réutilisées pour initier un réseau européen de CO₂, en synergie avec l'infrastructure hydrogène. Il faut passer à l'action maintenant : un projet industriel de stockage requiert environ sept ans pour être opérationnel, il est donc impératif de les prévoir et les soutenir dès aujourd'hui pour que ces projets puissent démarrer avant 2030.

Conclusion :

des avancées à conforter

Le CCS apparaît comme la seule option possible à court terme pour décarboner certaines branches industrielles en attendant que les technologies d'électrolyse aient atteint une masse critique. Une vision holistique englobant toutes les options de décarbonation est ainsi nécessaire. Elle permet, par ailleurs, d'accélérer l'avènement d'une économie de l'hydrogène décarboné grâce à la mise en place de l'infrastructure nécessaire et l'exploitation des synergies entre CCS, CCU et hydrogène dans des *clusters* industriels décarbonés.

L'année 2021 est un tournant dans les politiques de décarbonation du secteur industriel en Allemagne et en France. Alors que les politiques de décarbonation allemandes et françaises n'incluaient pas le CCS, l'impératif de décarbonation accélérée du secteur industriel et du maintien de sa compétitivité a changé la donne. Les industriels allemands et français des filières à forte intensité énergétique, conscients de l'enjeu de la décarbonation et du maintien de leur compétitivité vis-à-vis des zones industrielles du nord de l'Europe, ont entrepris des projets CCS, demandé des financements auprès des organismes européens et sont prêts à lancer leurs projets dès que les conditions réglementaires le permettront.

Ce nouvel élan doit être conforté par des politiques au niveau national définissant clairement le rôle du CCS (et de la CCU) dans la décarbonation industrielle et par la mise en place d'un cadre réglementaire permettant les investissements initiaux. Des avancées majeures dans cette direction ont été lancées par le gouvernement fédéral allemand et le gouvernement français au cours des six premiers mois de 2021. Elles doivent maintenant être renforcées en tenant compte, dans le cas de l'Allemagne, des obstacles spécifiques à surmonter et, dans le cas de la France, de ses atouts à exploiter dès maintenant.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org