



RAPPORT

Prospective de la CRE

Le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone

Septembre 2024

Rapport de la Commission de régulation de l'énergie sur le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone

Rapport de la Prospective de la CRE

Co-présidé par :

Manoelle LEPOUTRE SAINT M'LEUX, Vice-Présidente de l'Académie
des technologies

Jean-Michel GLACHANT, Président de l'Association internationale des
économistes de l'énergie (AIEE) et ancien Directeur de la *Florence
School of Regulation*

Assistés de :

Sébastien FERRARI, Maître des requêtes en service extraordinaire au
Conseil d'État

Le mot de la Présidente de la CRE

La prospective de la CRE s'inscrit dans la volonté d'un régulateur qui veut explorer les futurs, anticiper les ruptures technologiques ou d'usage du système énergétique et éclairer le débat. Chaque nouvelle thématique est une aventure au long cours. Celle du CCUS, le captage, transport, stockage et valorisation du dioxyde de carbone, a été conduite sous la houlette vigilante de ses deux coprésidents, Manoelle LEPOUTRE SAINT M'LEUX et Jean-Michel GLACHANT, s'appuyant sur une équipe cœur et un rapporteur, Sébastien FERRARI, et bien entendu plus de quatre-vingt-dix participants aux groupes de travail qui se sont succédé depuis son lancement en septembre 2023. Je souhaitais tout d'abord remercier tous ceux qui ont participé à ces échanges et y ont apporté leur vision et leur engagement. Le rapport qui en est issu couvre le large champ des enjeux d'acceptation généraux aux questions du financement, indispensable au développement de cette filière.

Jusqu'à un passé récent, le CCUS n'a pas eu l'opportunité de faire la démonstration de sa contribution à la décarbonation. A titre d'exemple, les technologies de CCUS, envisagées pour décarboner les unités de production d'électricité, face à des technologies décarbonées plus classiques, n'ont pas trouvé leur espace économique.

Aujourd'hui, cette technologie a sans doute rendez-vous avec sa mission dans la décarbonation en permettant d'adresser les applications pour lesquelles il n'y a pas de solution alternative qui s'impose (dites « *hard to abate* »). Cette « *poche* » de légitimité est cependant loin d'être négligeable, car l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime les besoins mondiaux de CCUS à plus de 5 GtCO₂ captées annuellement à horizon 2050 (soit près de 10 % de l'effort de réduction de CO₂), contre seulement 40 MtCO₂ en 2020, ce qui implique de multiplier les capacités actuelles de CCUS par un facteur supérieur à 100.

Ni solution universelle, ni niche trop étroite, le CCUS interpelle en Europe et en France à trois titres :

- il pose la question de notre capacité à planifier et organiser des biens communs que sont les infrastructures de transport et sans doute de stockage à une échelle européenne ; la récente lettre de mission du Commissaire européen à l'énergie et au logement y fait explicitement référence ;
- il interfère avec une politique de compétitivité où le maintien sur le sol européen d'unités industrielles de ces secteurs « *hard to abate* » n'est plus un tabou, mais un enjeu d'emploi et de souveraineté ;
- enfin, il s'inscrit dans une perspective de partage de risques avec les acteurs privés dans un modèle économique encore non stabilisé. Les propositions du groupe de travail, très largement convergentes avec les recommandations de la CRE publiées le 19 septembre en matière de régulation des infrastructures de transport du CO₂ suite à la saisine du Gouvernement, ont cherché un équilibre entre assurances à donner aux acteurs privés pour se lancer et la nécessité de leur laisser une part de responsabilités et de risques pour éviter des effets d'aubaine massifs.

Des sujets demeurent encore à creuser, analyser et ne pas écarter, car potentiellement susceptibles de modifier encore ce secteur : la valorisation du CO₂ capté, qui reste encore dans des équations économiques où la R&D est nécessaire pour réduire les coûts, d'une part, et la question des possibles extensions de cette technologie sur d'autres solutions plus radicales, d'autre part, si la situation le nécessitait. Ni rêve, ni réalité, ce sont des champs d'applications sur lesquels il faut garder une veille active, car le futur de notre décarbonation n'est pas écrit.

Je souhaite que ce rapport permette à ses lecteurs de mieux comprendre la réalité technique et économique de ces solutions et éclaire l'ensemble des décideurs qu'ils soient politiques ou économiques sur les enjeux de leur mise en œuvre rapide.

Emmanuelle WARGON

Le mot des co-présidents

Captage, transport, stockage et valorisation du dioxyde de carbone forment une filière dont la finalité première est la décarbonation de certains procédés industriels. Elle implique à la fois une famille de technologies et une option des politiques de décarbonation. Des projets sont étudiés, analysés, voire lancés en France, en Europe, aux États-Unis d'Amérique, mais aussi au Moyen-Orient (Qatar) et en Asie. Notre intérêt national est double. Cette filière est une option de décarbonation, incontournable pour atteindre les objectifs de Net Zéro en 2050 de la France, et de l'Europe, tout en permettant de conserver et de développer notre industrie et sa compétitivité. En cohérence avec ce cri d'alarme bien net sur la compétitivité européenne, lancé lundi 9 septembre 2024 dans le rapport de Mario DRAGHI (ancien Premier Ministre, ancien Président de la Banque Centrale européenne) et qui appelle à investir massivement pour l'innovation et l'industrie ...

Que faudrait-il faire en France, volontairement, pour faciliter ou même pour garantir la décarbonation future de nos industries et favoriser leur compétitivité intra ou extra-européenne ?

Ces nouvelles chaînes industrielles et chaînes de valeur à quatre maillons clefs (captage, transport, stockage et/ou valorisation) ne fonctionneront utilement et efficacement que si chacun des maillons a bien été conçu pour fonctionner avec les autres.

Une part très significative des choix techniques et industriels à faire sont ou seront de nature privée, du ressort direct des acteurs économiques impliqués. Une autre part est, ou peut être publique, relevant de la politique publique de soutien à la décarbonation, à la compétitivité industrielle, et à la ré-industrialisation de notre pays.

Notre groupe de travail a ainsi rassemblé les principaux acteurs, publics ou privés, parties prenantes de cette filière, visité de nombreux sites, et organisé maints échanges et dialogues. Ce rapport final est de la responsabilité de l'autorité de régulation, conseillée par deux co-Présidents et un rapporteur. Mais le travail qui a permis ce rapport, a été ouvert et collaboratif.

Nous relevons cinq domaines critiques pour le succès de ces nouvelles chaînes industrielles et techniques, pour le succès de nos politiques nationales de décarbonation, et pour notre compétitivité et notre objectif de ré-industrialisation. Ces cinq domaines sont interdépendants. Nous les retraçons ici, volontairement, dans l'ordre inverse du plan de notre rapport, pour bien montrer au lecteur ces fortes interdépendances. 1° anticiper les risques économiques et techniques de chacun des maillons et de toutes les chaînes. 2° soutenir les investissements nécessaires au déploiement de ces chaînes. 3° construire un cadre national de régulation souple de ces chaînes industrielles et techniques. 4° planifier et veiller à coordonner le déploiement de ces chaînes sur le territoire national. 5° Et tout ceci ne suffira pas, et ne réussira pas, si l'acceptabilité sociale de ces nombreux projets n'est pas sérieusement considérée, promue et prise en compte.

Cependant nous devons aussi garder à l'esprit que : 1° des pays voisins bâtissent en ce moment même leurs propres approches (par exemple l'Italie, l'Allemagne, le Danemark et les Pays-Bas) ; 2° certains pays européens extérieurs à l'Union y jouent un rôle clef, décisif (Norvège et Grande-Bretagne) ; 3° la Commission européenne a déjà sélectionné ces chaînes industrielles et techniques parmi les politiques stratégiques de l'Union aux horizons 2030-2050, et s'y préparera activement avec la nouvelle Commission 2024-2029 ; 4° Enfin, la France accueille, à Pau, en octobre 2024, tous les acteurs du « *Forum européen du CCS-V* » de la Commission européenne, aux bons soins de la DGEC.

Nous avons été, en France, dans les premiers en 2009/2011 à investir grâce à un partenariat privé/public dans un démonstrateur intégré (le pilote de Rousset dans le Sud-Ouest) ; d'autres pays se sont lancés depuis et cette filière est devenue réalité industrielle. Ne trainons plus : nous recommandons d'intégrer

ces nouvelles chaînes industrielles et techniques à nos plans d'investissements, car elles répondent à des enjeux très importants de notre futur en décarbonation, en industrie et technologie, et en compétitivité. C'est un enjeu d'intérêt général auquel nous devrions tous contribuer dans le respect de nos intérêts réciproques et de nos diversités.

Nous tenons à remercier Madame la Présidente de la CRE, Emmanuelle WARGON, qui nous a fait confiance en nous confiant cette mission de co-Présidence du Groupe de travail sur le CCUS. Nous souhaitons exprimer notre sincère gratitude à tous les membres du Groupe de travail pour leur collaboration, leur engagement tout au long d'une année riche en échanges et en débats. Leurs expertises, leurs idées, de même que leur écoute, leur soutien et respect mutuel ont été essentiels dans l'élaboration des éléments constitutifs de ce rapport, sur un sujet dont les enjeux sont essentiels, mais complexes et multifacettes.

Nos remerciements vont également au personnel de la prospective et de l'innovation de la CRE, notamment Didier LAFFAILLE, Directeur délégué assisté de Joséphine DUMOUTIER, qui ont fourni un appui efficace pour structurer et organiser nos travaux et nos visites de terrain. Nous souhaitons remercier tous les acteurs et professionnels, motivés par la décarbonation de nos industries, qui nous ont reçu sur les sites visités ou ceux qui ont accepté d'être interviewés lors de nos séances de travail ou de fournir des notes d'expertise, dans le cadre de cette étude. Leurs apports variés, éclairants ont enrichi nos travaux, nous ont permis de nous questionner, d'acquérir une vision globale et d'orienter nos travaux collectifs.

Merci également aux membres de l'équipe cœur, Olivier APPERT, Patrice GEOFFRON, François KALAYDJIAN et Nadia MAÏZI, ainsi qu'au Commissaire Ivan FAUCHEUX pour leur soutien continu et leurs apports précieux qui ont permis d'améliorer la qualité de nos travaux.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos félicitations au rapporteur de ce rapport, Sébastien FERRARI, pour son excellent travail de rédaction. Sa capacité de synthèse a été remarquable, ainsi que l'articulation cohérente et claire qui en ressort. Son engagement et son attention à tous les échanges ont permis que ce produit reflète les efforts de l'ensemble du Groupe de travail, et les principales conclusions et recommandations qui en sont issues.

Manoelle LEPOUTRE SAINT M'LEUX

Jean-Michel GLACHANT

Le résumé et les principales recommandations du rapport

Le résumé du rapport

Le Pacte vert européen vise à rendre l'Europe neutre pour le climat d'ici à 2050. Sa déclinaison nationale, la Stratégie nationale bas-carbone (SNCB), propose une feuille de route fondée sur la sobriété et l'efficacité énergétiques, le développement des sources renouvelables d'énergie et l'électrification des usages. Ces solutions sont les piliers de la stratégie nationale et européenne de décarbonation.

Le **captage**, le **transport**, le **stockage** et la **valorisation** du dioxyde de **carbone** (CSVC en français, CCUS en anglais¹) constituent également une solution, mais qui ne s'impose pas avec la force de l'évidence, à raison des précautions qu'ils impliquent, des risques qu'ils présentent, mais aussi en ce que ce procédé ne permet pas toujours l'élimination directe ou définitive des émissions de gaz à effet de serre. Complémentaire aux politiques d'efficacité et de décarbonation des usages énergétiques et industriels, le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone occupe dorénavant une place importante dans tous les scénarios de décarbonation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et sa mise en œuvre rapide devient un enjeu de la crédibilité des trajectoires de décarbonation face à l'urgence climatique.

Solution *a priori* de seul ou de dernier recours face aux autres moyens technologiques permettant de réduire ou d'éliminer les émissions de GES, le CCUS constitue cependant une opportunité de décarbonation importante, voire déterminante, pour le maintien de la compétitivité industrielle et plus largement pour la réussite de la transition énergétique. Il est ainsi primordial d'en accélérer la progression pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, ce qui passe par un renforcement des moyens mis en œuvre à cette fin. **Le CCUS trouve donc toute sa place dans la transition écologique.**

L'enjeu du déploiement des chaînes de valeur du CCUS n'est pas seulement sa contribution à la décarbonation de l'économie, mais tout autant son concours à la réindustrialisation profonde de la France et à la consolidation de sa souveraineté. Enfin, le CCUS se situe à la croisée de coûts décroissants des technologies qui la composent à mesure qu'elles se déploient, et d'une courbe de prix du CO₂ qui, structurellement, est croissante.

Le groupe de travail propose de renforcer les moyens au soutien du CCUS en construisant l'acceptabilité sociale des projets (1), en organisant la planification et la coordination de leur réalisation (2), en instaurant une régulation souple des chaînes de valeur (3), en soutenant les investissements qui sont indispensables à leur développement (4) et, en anticipant les risques économiques et techniques liés à leur déploiement (5). Il estime que ces moyens sont nécessaires pour garantir le développement rapide et sans tarder des projets de chaînes de CCUS et ainsi assurer, en temps utile, leur pleine contribution à la transition énergétique comme à la réindustrialisation profonde et durable de la France.

(1) L'une des conditions essentielles à la réalisation des projets de chaînes de CCUS tient à la nécessité de construire leur acceptation sociale. Ce besoin qui s'exprime d'abord au niveau local, s'inscrit également dans un contexte national qui doit être plus généralement pris en compte par les autorités publiques. L'organisation d'un débat national sur la transition énergétique, incluant le CCUS, peut permettre de sensibiliser le public sur les enjeux auxquels il entend répondre dans le cadre de la décarbonation et son utilité pour la transition énergétique, en sorte de la « *déconfiner* ». Une meilleure connaissance de cette technologie contribue à ce que, dans un second temps, les projets de chaînes de CCUS menés localement puissent être mieux acceptés par les populations.

(2) L'un des enjeux majeurs du déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national tient à sa planification et à sa coordination. Le facteur temporel, pour des projets nécessitant plusieurs années

¹ Captage et Stockage du Carbone (**CSC**) ou *Carbon, Capture and Storage* (**CCS** en anglais). Captage, Stockage et Valorisation du Carbone (**CSVC**) ou *Carbon Capture, Utilization and Storage* (**CCUS** en anglais). Ce sont les appellations françaises et anglaises, dont l'usage est plus fréquent dans les documents et stratégies internationales et françaises. Dans ce rapport, c'est le terme de **CCUS** qui sera employé.

pour se développer, commande de planifier les investissements et les opérations nécessaires de sorte d'en assurer la bonne réalisation, en particulier la mise en service coordonnée de ses différents maillons. La reconversion d'infrastructures existantes peut contribuer à un déploiement plus rapide des chaînes de CCUS. De même, le facteur spatial, s'agissant de configurations géographiques variables qui doivent être prises en compte par les projets, oblige à rechercher une cohérence dans le développement des réseaux à la maille territoriale pertinente, dans une perspective d'optimisation d'infrastructures qui sont difficilement reproductibles.

(3) L'instauration d'une régulation des chaînes de CCUS est tout à la fois indispensable et pertinente pour accélérer le développement d'un marché ouvert, en sorte de créer les conditions leur permettant de contribuer pleinement et en temps utile à la transition énergétique. Cette régulation doit être suffisamment flexible pour appréhender les différentes configurations possibles dans lesquelles les chaînes de CCUS sont susceptibles d'être constituées. L'intensité de la régulation doit ainsi varier en fonction des conditions géographiques, techniques et économiques dans lesquelles les chaînes de CCUS se déploient.

Là où l'initiative privée est suffisante et la configuration des lieux favorable, la régulation peut se limiter à rationaliser le comportement des opérateurs et à garantir un Accès des tiers au réseau (ATR) négocié aux infrastructures difficilement reproductibles au sein de la chaîne. Là où les contraintes sont importantes et les conditions de concurrence défavorables, la régulation doit être renforcée par des actions incitatives et un ATR régulé ce qui permet de soutenir la constitution et le développement des chaînes de CCUS, sous réserve qu'il existe un intérêt économique et des perspectives identifiables par la puissance publique.

En tout état de cause, le cadre national de régulation doit être défini, sans attendre, en vue d'encourager le lancement rapide des projets de CCUS et ainsi créer les conditions permettant leur réalisation en temps utile pour atteindre les objectifs intermédiaires de réduction des émissions des GES.

(4) Le constat d'une insuffisance des soutiens publics existants au déploiement des chaînes de CCUS, voire l'absence de dispositif qui lui est spécifiquement dédié. La constitution d'une chaîne de CCUS requiert des investissements importants, en particulier dans le secteur industriel. La mise en place d'un dispositif d'aide ciblé à l'investissement, dans le cadre de la mise en place d'une politique publique dédiée, venant en complément de ces dispositifs, ainsi que de ceux mis en place par l'Union européenne, tels que le Fonds d'innovation ou les PIC, produirait un effet d'accélérateur pour la réalisation des projets de chaîne de CCUS.

(5) La couverture des risques économiques et techniques liés aux chaînes de CCUS doit être anticipée dès la conception des projets afin de la répartir de manière équilibrée entre ses acteurs. Il existe plusieurs modèles possibles d'allocation, l'un passant par un faisceau de contrats conclus entre les acteurs de la chaîne du CCUS et d'autres faisant intervenir une garantie de l'État ou impliquant une propriété publique, le cas échéant conjointe, de certains actifs afin de réduire les risques supportés par les opérateurs des infrastructures de transport et de stockage. Quelle que soit la solution retenue, l'allocation des risques entre les différents acteurs de la chaîne et leur couverture doivent être clairement déterminées et réparties à due proportion de la charge qu'ils représentent, en tenant compte notamment du facteur temporel et/ou de la dimension collective de leur gestion.

Les principales recommandations du rapport sur le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone

1. Promouvoir l'acceptabilité sociale des projets de CCUS

- ✓ Organiser une information au niveau national sur les technologies du CCUS.
- ✓ Promouvoir les actions de dialogue à l'échelle locale sur les projets de chaîne de CCUS.

2. Planifier et coordonner le déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national

- ✓ Planifier le déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national.
- ✓ Planifier et coordonner les investissements dans les projets de chaînes de CCUS.
- ✓ Encourager la mutualisation des maillons de la chaîne de CCUS.

3. Instaurer une régulation souple des chaînes de CCUS

- ✓ Instaurer un cadre national de régulation souple des chaînes de CCUS pour accélérer leur déploiement.
- ✓ Renforcer la régulation des chaînes de CCUS en présence d'externalités particulières.

4. Soutenir les investissements nécessaires au déploiement des chaînes de CCUS

- ✓ Développer des contrats carbone pour la différence, afin de garantir le financement de long-terme des chaînes de CCUS.
- ✓ Cibler les dispositifs d'aide publique à l'investissement sur les infrastructures de transport et de stockage souterrain, notamment pour assurer dès le premier investissement le dimensionnement optimal à terme.
- ✓ Instaurer des dispositifs d'aide publique au développement des nouvelles technologies de CCUS.

5. Anticiper les risques économiques et techniques liés au CCUS

- ✓ Anticiper les risques économiques et techniques en procédant à leur allocation de manière juste et équilibrée entre les acteurs de la chaîne de CCUS.

Sommaire

Mot de la Présidente de la CRE

Mot des co-présidents

Résumé et principales recommandations

Table des matières

Préambule et méthodologie

Liste des participants et intervenants

Table des matières

1. Le CCUS au service de la transition énergétique	23
1.1. Le CCUS : les préliminaires	23
1.1.1. Le CCUS, une chaîne de valeur à déployer.....	23
1.1.2. Une industrie européenne en développement.....	28
1.2. Les enjeux du développement des chaînes de CCUS.....	31
1.2.1. Un instrument à la légitimité renouvelée	31
1.2.2. Une politique publique à développer	34
1.2.2.1. Des objectifs clarifiés	34
1.2.2.2. Un cadre réglementaire plus favorable.....	37
1.3. Une acceptation sociale à conquérir	37
1.3.1. Les défis de l'acceptabilité du CCUS	37
1.3.2. Les déterminants de l'acceptabilité sociale des projets.....	38
2. Mieux cerner la chaîne de valeur de CCUS pour mieux la réguler.....	40
2.1. Une physionomie à géométrie variable	40
2.1.1. La diversité des acteurs de la chaîne.....	41
2.1.2. La structuration complexe de la chaîne.....	44
2.1.3. Les coûts et les risques associés à la chaîne	46
2.1.4. Le développement graduel de la chaîne	48
2.2. Une efficience conditionnelle	49
2.2.1. Concilier les contraintes des acteurs de la chaîne	49
2.2.2. Garantir la coordination du déploiement de la chaîne.....	50
2.2.3. Concevoir l'allocation des risques	51
2.2.4. Favoriser la maîtrise des coûts	51

3. Réguler les réseaux de CCUS pour les développer efficacement	56
3.1. Les composantes de la régulation	56
3.1.1. Contribuer à la construction de tarifs compétitifs	56
3.1.2. Garantir l'accès des tiers aux infrastructures de transport et de stockage	57
3.1.3. Encadrer les procédures de contractualisation et de soutien à la filière	58
3.1.4. Les autres composantes éventuelles de la régulation.....	59
3.2. Les modèles possibles de régulation	62
3.2.1. Une régulation souple des chaînes de CCUS « <i>ouvertes</i> »	62
3.2.2. Une régulation renforcée des chaînes de CCUS « <i>enclavées</i> »	64
4. Renforcer les moyens au soutien de la filière du CCUS pour permettre son plein succès	66
4.1. Promouvoir l'acceptabilité sociale des projets de CCUS	66
4.2. Planifier et coordonner le déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national	67
4.3. Instaurer une régulation souple des chaînes de CCUS	67
4.4. Soutenir les investissements nécessaires au déploiement des chaînes de CCUS.....	68
4.5. Anticiper les risques économiques et techniques liés au CCUS	69
5. Conclusion	71

Remarque : ce rapport a été collectivement revu et commenté par tous les membres du groupe de travail. Sa rédaction a été confiée au rapporteur qu'il convient de remercier.

Préambule et méthodologie

Le contexte lors du lancement du groupe de travail

Le captage, le transport, le stockage et la valorisation du dioxyde de carbone (CSVC en français, CCUS en anglais), désigne le captage du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère ou dans des fumées industrielles et son stockage pérenne, ainsi que, le cas échéant, sa valorisation, avec ou sans transformation, chimique ou biologique².

Pour atteindre la neutralité carbone, il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en produisant des « *émissions négatives* » pour compenser celles résiduelles et obtenir, *in fine* « *zéro émissions nettes* ». Les émissions négatives peuvent résulter du stockage du dioxyde de carbone *via* des puits de carbone « *naturels* », telle que la séquestration du carbone par la biomasse des systèmes agroforestiers³, ou « *artificiels* » grâce à des procédés de captage et stockage géologique du dioxyde de carbone de l'atmosphère ou des émissions de fumées industrielles.

Complémentaire aux politiques d'efficacité et de décarbonation des usages énergétiques et industriels, le CCUS occupe dorénavant une place importante dans les scénarios de décarbonation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans ses rapports réguliers, le GIEC montre que toutes les trajectoires, permettant de limiter l'élévation de température à 2°C d'ici 2100 par rapport à l'ère préindustrielle⁴, reposent sur des techniques d'élimination du dioxyde de carbone, ou d'émissions négatives. Pour répondre au même objectif, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime les besoins mondiaux de CCUS à plus de 5 GtCO₂ captées annuellement à horizon 2050 (soit près de 10 % de l'effort de réduction de CO₂), contre seulement 40 MtCO₂ en 2020, ce qui implique de multiplier les capacités actuelles de CCUS par un facteur supérieur à 100. La Commission européenne, dans sa dernière communication du 6 février 2024 sur les objectifs climatiques de l'UE⁵, indique de son côté qu'il faudra capter environ 280 MtCO₂ d'ici à 2040 et environ 450 MtCO₂ d'ici à 2050.

Au lancement du groupe de travail, 45 installations étaient déjà opérationnelles dans le monde, principalement aux États-Unis dans le secteur du charbon. Toutefois, sur les 245 autres projets d'installations de CCUS en développement ou en construction recensés par le Global CCS Institute, près de la moitié se situaient en Europe (110 installations), notamment en Mer du Nord (Royaume-Uni, Norvège, Danemark et Pays-Bas). En France, les projets en étaient encore au stade du démonstrateur. Un projet pilote a été mené par TotalEnergies sur le site de Lacq (en 2010) et un deuxième était en cours à Dunkerque (lancé en 2019), mené par un consortium de 12 acteurs européens. De plus, des projets de *hubs* territoriaux étaient en cours d'études dans le Grand-Ouest (Saint-Nazaire), dans le Sud-Ouest (Lacq-Meillon), en PACA (Fos-sur-Mer) et dans la vallée rhodanienne.

Cette dynamique nationale repose notamment sur les objectifs de neutralité carbone à horizon 2050, explicités par le scénario de référence de la 2^{ème} Stratégie nationale bas-carbone publiée en mars 2020 (SNBC 2). Ce dernier estime que les technologies de CCUS permettront d'éviter, de manière prudente, 6 MtCO₂/an dans l'industrie (et de réaliser 10 MtCO₂/an « *d'émissions négatives* » sur des installations de production d'énergie à partir de biomasse⁶). Ces différentes prévisions n'occulent pas le coût des technologies de CCUS encore très élevé et les incertitudes persistantes sur leur potentiel réel. Comme le résume l'annexe 5 de la SNBC, « *les incertitudes sur ces technologies, leur acceptabilité, ainsi que sur la disponibilité et la fiabilité du stockage conduisent à envisager avec prudence le développement*

² Plusieurs méthodes de valorisation du CO₂ ont déjà atteint un niveau industriel : récupération assistée des hydrocarbures, synthèse de produits chimiques, culture de micro-algues pour des produits à haute valeur ajoutée, etc. Source : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/3-voies-valorisation-co2>.

³ Voir, à ce sujet, le rapport du groupe de travail n°1 de la saison 4 du Comité de prospective de la CRE sur « *la biomasse et la neutralité carbone* », publié en mars 2023.

⁴ Début de l'ère préindustrielle : 1850.

⁵ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions : « *Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'UE* », 6 février 2024, COM(2024) 62.

⁶ À partir de la Biomasse énergie avec captage et stockage du carbone (BECCS). Le CO₂ capté par la biomasse n'étant pas relâché dans l'atmosphère mais stocké, les émissions sont donc considérées comme « *négatives* ».

de ces technologies, conditionné à la définition d'un modèle économique viable joint à une bonne maîtrise des risques sur le long terme ».

Dans sa nouvelle stratégie CCUS publiée en juillet 2024⁷, l'État français estimait que la décarbonation profonde de l'industrie et l'atteinte de la neutralité climatique devraient nécessiter, à l'horizon 2040-2050, le captage de 50 à 200 MtCO₂/an. Ces volumes impliquent de capter l'ensemble des émissions résiduelles des sites industriels très émissifs, et de développer de nouveaux usages de dioxyde de carbone, tels que le bioraffinage, ou si nécessaire le captage du dioxyde de carbone atmosphérique (DAC).

Les enjeux du groupe de travail

Considérant les stratégies des différentes études de décarbonation mentionnant le CCUS et le développement actuel de la filière, la Prospective de la CRE a décidé de lancer un groupe de travail sur le sujet. Le projet de rapport a alors permis d'étudier différents enjeux rencontrés par le secteur.

Le CCUS soulève des questions technico-économiques

Le déploiement de la filière du CCUS repose sur sa viabilité technico-économique. En effet, si les technologies de transport et de stockage souterrain de dioxyde de carbone sont parfaitement maîtrisées par l'industrie pétrolière, les technologies de captage du dioxyde de carbone sont très coûteuses et nécessitent des développements technologiques pour s'adapter à certains procédés industriels.

En particulier pour les industries aux émissions dites « *hard-to-abate* » (comme les cimenteries ou les aciéries), et pour le parc installé d'unités de production fonctionnant au charbon, au pétrole ou au gaz naturel, le CCUS apparaît comme un moyen de décarbonation capable d'adapter les infrastructures industrielles et énergétiques existantes tout en maîtrisant les investissements et les éventuels coûts échoués.

Cependant, son déploiement massif ne sera possible qu'à condition de présenter une opportunité économique pour les émetteurs, c'est-à-dire si l'unité de coût du CCUS (en €/tonne de CO₂ stocké) est plus faible que le coût de l'émission d'une tonne de carbone déterminé par la réglementation ou le marché européen du carbone. Autrement dit, investir dans le CCUS doit être économiquement plus intéressant qu'acheter des *quotas* d'émissions de CO₂.

Les estimations actuelles de coût global de la chaîne CSC se situent entre 70 et 150 €/tCO₂⁸ pour du dioxyde de carbone provenant de grands émetteurs industriels, soit un niveau relativement proche des prix européens du marché du carbone (entre 80 et 100 €/tCO₂ depuis deux ans). Des estimations qui ne comptent pas les différentes subventions (notamment européennes) qui existent pour compenser l'écart avec le prix du carbone sur le marché et soutenir l'essor de la filière.

La réduction des coûts de captage (qui représentent plus de deux tiers du coût total de la chaîne de CCUS) passe essentiellement par des améliorations technologiques. L'effet volume induit par le déploiement de la filière, pour des applications industrielles, par nature très diverses et sur des sites limités (sidérurgie, cimenterie, etc.) sera favorable à la baisse des coûts de la filière.

De plus, les coûts de transports diminuent à mesure que le territoire est maillé d'installations de CCUS et de carboducs. Tant pour des motifs d'efficacité économique que d'accès non discriminatoire, à une infrastructure en monopole naturel, il peut être envisagé de confier à un seul acteur économique la responsabilité du transport et du stockage du dioxyde de carbone émis par plusieurs installations. C'est la tendance actuelle, comme le montre le projet à l'étude dans le port de Rotterdam, et c'est un schéma possible pour la Basse Seine ou le Nord de la France.

⁷ Direction générale des entreprises : « *État des lieux et perspective de déploiement du CCUS en France* », juillet 2024. L'État envisage plusieurs phases de déploiement pour le captage du CO₂ : 4 à 8 MtCO₂/an dans l'industrie, à l'horizon 2025-2030, 12 à 20 MtCO₂/an, à l'horizon 2030-2040 et 30 à 50 MtCO₂/an, à l'horizon 2040-2050.

⁸ L'Ademe, dans son analyse de 2020 donne des estimations sur le coût des différents maillons de la chaîne CCS : entre 10 €/tCO₂ (cas du CO₂ en forte concentration et très petit volume issu par exemple d'unité de méthanisation après purification du biogaz) et 100 €/tCO₂ pour le coût de captage du CO₂, entre 10 et 25 €/tCO₂ pour le coût du transport en fonction du type de transport (canalisation ou bateau), et entre 1 et 20 €/tCO₂ pour le coût du stockage en fonction de la typologie (*onshore* ou *off-shore*). Avant l'étape du transport, il est nécessaire d'ajouter un coût de 9 €/tCO₂ pour la liquéfaction (déshydratation et compression).

La valorisation de la chaleur contenue dans les gaz captés, apparaît également comme une piste pour une meilleure rentabilité grâce à l'optimisation des procédés et à la réduction des coûts. De plus, l'amélioration des procédés de captage du dioxyde de carbone pourrait être utile à d'autres filières, telles que son utilisation qui vise la conversion du dioxyde de carbone vers d'autres usages, par exemple en carburants de synthèse.

Enfin, la qualité du carbone stocké fait partie des enjeux et impératifs pour le déploiement de la filière. Les sites de stockage identifiés n'autoriseront le dépotage du dioxyde de carbone (son déchargement) qu'au respect de certaines spécifications telles que son niveau de pureté, actuellement discutées, et qui constitueront certainement de futures normes européennes voire internationales. Le niveau de pureté du dioxyde de carbone imposé aux émetteurs par les transporteurs/stockeurs représente cependant un enjeu important pour le coût global de la chaîne de valeur de CCUS : trop contraignant, il pourrait entraîner des surcoûts de captage/purification mettant à mal la viabilité économique des solutions de CCUS. Il est donc primordial que les normes soient établies sur la base de résultats scientifiques communs à toute la chaîne de valeur de CCUS, afin de garantir l'intégrité des moyens de transport et stockage tout en n'imposant pas des contraintes excessives économiquement.

Le CCUS soulève des questions environnementales et d'acceptabilité

Le stockage du dioxyde de carbone sur une longue période devrait se réaliser dans des aquifères salins et des champs déplétés. Cependant, des incertitudes persistent sur la capacité de stockage (liée à la porosité accessible de la couche géologique cible, l'injectivité au sein de celle-ci et la pression maximale de stockage), ainsi que sur la possibilité de fuites diffuses au niveau des puits d'injection ou d'observation (perte d'étanchéité en cas de vieillissement des matériaux au contact du dioxyde de carbone, de remaniements géomécaniques dans le sous-sol accompagnés ou pas d'évènements sismiques, etc.).

Des incertitudes persistent également quant au bilan carbone total du CCUS. Selon certaines études, ce dernier laisserait échapper entre 5 et 10 % de dioxyde de carbone au moment du captage et la chaîne logistique associée au CCUS émettrait entre 10 et 20 % du dioxyde de carbone stocké, dégradant son bilan carbone final⁹.

Ces différents points sont de nature à susciter des oppositions aux projets de CCUS et à complexifier son développement, principalement à des échelons locaux. Néanmoins, les sites existants, par exemple Sleipner (Norvège)¹⁰ et Weyburn (Canada), ont eu un effet favorable pour la filière, notamment lorsque l'implantation s'est accompagnée d'une concertation locale nourrie. D'autant que les projets européens de stockage *off-shore*, principalement en Mer du Nord rencontrent de moindres difficultés d'acceptabilité.

Le CCUS peut trouver une place dans le modèle énergétique français

Une des spécificités du CCUS réside dans sa chaîne de valeur, dans laquelle se rencontrent de nombreux acteurs, interdépendants, mais conservant leur autonomie. La France dispose d'excellentes capacités de recherche dans ce domaine (BRGM et IFPEN), de spécialistes de la liquéfaction et du stockage du gaz (Dunkerque LNG, Elengy et Storengy), de grands opérateurs d'hydrocarbures (TotalEnergies, Petroineos et Esso), de leaders mondiaux des gaz industriels (Air Liquide) et de grandes entreprises de délégation de service public (GRTgaz et Teréga), qui pourraient assurer le CCUS.

Même si la production d'électricité y est fortement décarbonée, et sous réserve d'atteindre un optimum économique, le CCUS pourrait trouver sa place en France auprès des secteurs les plus émetteurs et difficiles à décarboner. D'une part, la cimenterie, la sidérurgie ou le raffinage font partie des plus hauts postes d'émissions en France, car très énergivores. D'autre part, certaines filières telles que la cimenterie, génèrent du dioxyde de carbone lié à leur procédé, dont l'émission est indissociable de la fabrication du produit.

Pour ces premières industries fortement émettrices de dioxyde de carbone, l'existence d'alternatives technologiques de type électrification des procédés permet de réduire drastiquement une partie de leurs émissions (comme pour la sidérurgie) : il peut se poser alors la question de l'intérêt, pour les procédés

⁹ Source : Institut Open Diplomacy, Sacha Courtial, 10 septembre 2021.

¹⁰ Une étude scientifique approfondie a été menée pour suivre l'évolution du dioxyde de carbone dans l'aquifère : elle a montré que la bulle de dioxyde de carbone descendait, puis se minéralisait progressivement.

qui peuvent être électrifiés, d'investir massivement dans des installations de captage, de transport et de stockage de dioxyde de carbone, notamment en termes de compétitivité relative¹¹.

Au-delà de l'aspect économique, la filière du CCUS devra s'appuyer sur un cadre juridique et réglementaire afin de se déployer sereinement et attirer les investisseurs. À ce titre, la directive 2009/31/CE du 23 avril 2009¹², transposée en droit national en octobre 2011 (dans les codes de l'environnement et minier) fixe d'ores et déjà des normes de sécurité pour un stockage permanent et sûr, ainsi que des mesures exigeantes de prévention et de surveillance pendant l'exploitation des sites de stockage.

Le stockage du dioxyde de carbone en France

La France dispose de 3 principaux bassins sédimentaires dans lesquels le stockage terrestre (*onshore*) serait possible dans les aquifères salins (Bassin parisien, Bassin aquitain, Bassin du Sud-Est et Provence) ou bien dans les champs de production d'hydrocarbures épuisés (Bassin parisien et Bassin aquitain).

Cependant, le potentiel de stockage géologique du dioxyde de carbone en France est encore mal connu à terre et inconnu en mer (plateaux continentaux)¹³. Ce dernier présente pourtant une faisabilité et une acceptabilité sociale supérieure au stockage terrestre au regard notamment de sa localisation, du suivi de la permanence du stockage, etc.

Le périmètre de la mission du groupe de travail

Concernant la technologie

La Prospective de la CRE s'intéresse à la thématique du CCUS notamment au regard de ses relations avec les alternatives possibles à l'effort de décarbonation, afin d'identifier ses caractéristiques, opportunités et inconvénients dans le cadre de son déploiement futur.

La réflexion se concentre sur le captage du dioxyde de carbone à des fins industrielles et, à ce titre, exclut les dispositifs de BECSC (Bioénergie avec Captage et Stockage du Carbone¹⁴) qui permettent d'extraire l'énergie absorbée par la biomasse et de capter puis stocker le dioxyde de carbone (« *CO₂ biogénique* ») dans des formations géologiques. Ces dispositifs de BECSC reposent certes la plupart du temps sur des infrastructures de CCUS, mais leur objectif s'éloigne de celui d'accompagner les industriels à réduire leurs émissions. De plus, les enjeux autour de l'usage de la biomasse ont par ailleurs été étudiés par un précédent groupe de travail du Comité de prospective de la CRE intitulé « *La biomasse et la neutralité carbone* »¹⁵.

S'il est pertinent d'étudier les avantages ou inconvénients des différentes technologies de captage et de transport du dioxyde de carbone, le traitement en profondeur des procédés de valorisation semble moins pertinent dans le cadre de cette mission. Les usages possibles tels que la production d'e-carburant sont des sujets qui ont déjà été traités dans le cadre des groupes de travail du Comité de prospective de la CRE, sur « *Le vecteur hydrogène* »¹⁶ et sur « *Le verdissement du gaz* »¹⁷. Toutefois, la thématique n'a pas été totalement occultée et a été traitée sous l'angle des débouchés industriels et de ses intérêts économiques et environnementaux.

¹¹ Dans le cas de la sidérurgie, il s'agirait d'un changement complet des moyens de production existants (qui se chiffre en milliards d'euros par usine), ce qui serait impossible rapidement à grande échelle et qui, dans tous les cas, n'abat pas l'intégralité des émissions. Il resterait donc, dans tous les cas, un CO₂ résiduel à abattre par le CCUS

¹² Directive 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone.

¹³ La Direction générale des entreprises a lancé le 29 avril 2024 un Appel à manifestation d'intérêt (AMI) qui s'adresse à tous les acteurs de la filière et vise à développer des tests de captage, valorisation et séquestration du CO₂ en France dès 2025.

¹⁴ Ou BECCS pour *Bionergy with Carbon Capture and Storage*, en anglais.

¹⁵ Source : disponible sur le site Internet de la [CRE](#).

¹⁶ Source : disponible sur le site Internet de la [CRE](#).

¹⁷ Source : disponible sur le site Internet de la [CRE](#).

Les objectifs du groupe de travail

Ces réflexions donnent lieu à un rapport public, dont l'ambition première est de faire preuve de pédagogie sur les enjeux associés au captage, au transport et au stockage, et secondairement à la valorisation et l'usage du dioxyde de carbone. Il étudie notamment le potentiel de développement, la faisabilité et la pertinence technique, économique, industrielle et environnementale du CCUS au regard des alternatives existantes.

Il s'agit, également, de prendre en compte les perspectives d'innovation pour réduire les coûts, le cadre réglementaire, la traçabilité des différents types de dioxyde de carbone, *etc.* Toutefois, le rapport n'a pas pour objectif de réaliser un exercice académique sur le niveau du prix du carbone pour rendre le CCUS économiquement avantageux. Il s'agit plutôt d'évaluer les conditions de réussite du déploiement de la filière afin d'évaluer au regard des coûts et des investissements, le cadre de développement économique et réglementaire le plus favorable pour inciter au recours à la technologie tout en évitant les surinvestissements et prises de risques démesurées.

La gouvernance et le cadre général des travaux

Chaque groupe de travail mené par la Prospective de la CRE est gouverné par une co-présidence paritaire, composée de deux personnalités qualifiées, externes à la CRE, gages d'indépendance, comme ce qui a été fait et salué lors des quatre premières saisons du Comité de prospective. Le rapport final est à la signature des co-présidents qui se sont efforcés de considérer la diversité des approches et des sensibilités au sein du groupe de travail.

C'est dans ce contexte, que la Présidente de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) **Madame Emmanuelle WARGON** a demandé début 2023 à **Madame Manoelle LEPOUTRE SAINT M'LEUX**, Vice-Présidente de l'Académie des technologies, et à **Monsieur Jean-Michel GLACHANT**, Président de l'Association internationale des économistes de l'énergie (AIEE) et ancien Directeur de la *Florence School of Regulation*, de co-présider ce groupe de travail sur « *le captage et le stockage du dioxyde de carbone* ».

Aux côtés des deux co-présidents, une « *équipe cœur* » composée de membres du groupe de travail particulièrement investis sur les sujets du CCUS, représentatifs de l'ensemble de la chaîne de valeur, a été chargée de contribuer au pilotage du groupe de travail : elle a été consultée pour l'organisation des travaux (auditions, visites de terrain) et a contribué aux réflexions et arbitrages importants sur les orientations générales du rapport.

Les deux co-présidents étaient accompagnés d'un rapporteur indépendant du Conseil d'État qui assurait une fonction de Secrétaire général, responsable de la rédaction des comptes-rendus des séances et des différents rapports (intermédiaire et final). C'est **Monsieur Sébastien FERRARI** du Conseil d'État qui a été nommé comme rapporteur du groupe de travail sur le CCUS.

Les membres du Collège, les services de la CRE et une centaine de membres provenant du secteur de l'énergie et de la filière concernée ont participé aux travaux de la Prospective de la CRE. Dans le cadre de ce groupe de travail sur le CCUS, des industriels, acteurs publics, entreprises privées, académiques, associations, se sont réunis pour échanger sur le sujet (*cf.* liste des participants, voir ci-dessous).

Le lancement officiel du groupe de travail, le 30 juin 2023, a donné suite à une année complète de travaux et de rencontres (à hauteur d'environ une session plénière par mois à la CRE et/ou en visioconférence), de septembre 2023 à septembre 2024, jour de la restitution publique. Le projet de rapport a fait l'objet d'une présentation au Conseil scientifique de la CRE, le 20 septembre 2024, qui l'a approuvé.

La liste des participants et intervenants

Plusieurs participants ont pu changer de fonctions ou d'entités entre le lancement des travaux et la restitution publique du rapport¹⁸.

La liste des participants de l'équipe cœur¹⁹

Olivier	APPERT	Académie des technologies	Didier	LAFFAILLE	CRE
Manoelle	LEPOUTRE SAINT M'LEUX	Académie des technologies	Guillaume	MOINE	CRE
Sébastien	FERRARI	Conseil d'État	Jean-Michel	GLACHANT	IAEE
Natalia	BAUDRY	CRE	François	KALAYDJIAN	Ex. IFPEN
Arnaud	DIETRICH	CRE	Nadia	MAÏZI	Mines Paris-PSL
Patrice	GEOFFRON	Université Paris Dauphine-PSL			

Les membres du Collège de la CRE (Anthony CELLIER, Ivan FAUCHEUX, Valérie PLAGNOL et Lova RINEL) ont assisté également aux travaux de l'équipe cœur.

La liste des membres invités à participer au groupe de travail

Yves	BRÉCHET	Académie des sciences	Nicolas	MOUCHNINO	France Ciment
Sylvie	PADILLA	Ademe	François	BERTHÉLEMY	France Gaz
Oksana	TOMA	Ademe	Thierry	CHAPUIS	France Gaz
Anne	VARET	Ademe	Stéphane	ANDRIEU	Gaz et Territoires
Nicolas	DUHAMEL	AFIEG	Isabelle	ACHIN	GE Vernova
Géry	LECERF	AFIEG	Cecilia	TERUGGI	GE Vernova
Stéphane	RADUREAU	AFIEG	Pascal	BAYLOCQ	Geostock
Fabrice	DeI CORSO	Air Liquide	Yann	LEGALLO	Geostock
Marianne	VIART	ArcelorMittal	Stéphane	BOYVAL	GPMD
Alice	L'HOSTIS	ATEE	Sami	GHARDADDOU	GRDF
Michel	DAIGNEY	Bpifrance	Hugues	MALINAUD	GRDF
Sophie	RÉMONT	Bpifrance	Geoffroy	ANGER	GRTgaz

¹⁸ Par convention, c'est l'entité en début des travaux de la Prospective qui est retenue.

¹⁹ Deux stagiaires ont également participé à l'animation et au fonctionnement du groupe de travail de la Prospective de la CRE : **Luke PILACHE**, élève ingénieur à CentraleSupélec (septembre 2023 – février 2024) et **Joséphine DUMOUTIER**, élève en Master École des Affaires européennes à Sciences Po Paris (mars 2024 – août 2024).

Rapport de la Prospective de la CRE sur le CCUS

Septembre 2024

Sylvie	GENTIER	BRGM	Adeline	DUTERQUE	GRTgaz
Laurence	PIKETTY	CEA	Nicolas	PEUGNIEZ	GRTgaz
Hervé	QUATRELIVE	CFE Énergies	Nicolas	BERGHMANS	IDDRI
Richard	LAVERGNE	Ex. CGE	Sébastien	TREYER	IDDRI
Didier	PILLET	CGE	Raphaël	HUYGHE	IFPEN
Marie-Solange	TISSIER	Ex. CGE	Kateryna	VORONETSKA	IFPEN
Florence	DELPRAT-JANNAUD	Club CO ₂	Caterina	de MATTEIS	IOGP
Arthur	CALVAT	DGE	François-Régis	MOUTON	IOGP
Julien	AGIER	DGEC	Jean-Luc	FUGIT	OPECST
Marc	LÖNING	DGEC	Carine	STAROPOLI	Paris-Sorbonne
Carol	PAQUIER	DGEC	Bruno	BARTHELEMY	Petroineos
Marine	PLASSIER	DGEC	Hugues	de MONTESSUS	Petroineos
Julien	VIAU	DGEC	Olivier	HOUVENAGEL	RTE
Isabelle	SENGHOR	EDF	Fabien	POURE	SPSE
Claude	ARNAUD	Efficacity	Patrick	EGERMANN	Storengy
Philippe	GENILLON	Elengy	Charlotte	ROULE	Storengy
Joachim	LABAUGE	Elengy	Gauthier	PERDU	Technip Énergies
Matthieu	BOURGADE	Enedis	Bruno	VIBERT	Technip Énergies
Christophe	GROS	Enedis	Antoine	CHARBONNIER	Teréga
Pierre	MALLET	Enedis	Youssef	CHEKLI	Teréga
Corinne	THEVENIAU	Enedis	Dominique	MOCKLY	Teréga
Rémy	CARBONNIER	Engie Research	Didier	BOUGEARD	TotalEnergies
Samuel	SAYSSET	Engie Research	Pauline	BOURGUIGNON	TotalEnergies
Valeria	Di FRANCESCO	Eni	Nicolas	de WARREN	UNIDEN
Hoi Yu	TO	Eni	Bertrand	WALLE	UNIDEN
Jean-Pierre	DEFLANDRE	Evolen	Clément	LE ROY	Wavestone
Mélisande	COUESPEL	France Ciment			

La liste des intervenants

Jérémy	MAST	Ambassade de France à Londres	Nicolas	PEUGNIEZ	GRTgaz
--------	-------------	-------------------------------	---------	-----------------	--------

Rapport de la Prospective de la CRE sur le CCUS

Septembre 2024

Pierre-Marie	ABADIE	ANDRA	Jean-Baptiste	BOUTILLIER	GTT
Fabrice	DELCORSO	Air Liquide	Mathilde	FAJARDY	IEA
Emmanuel	RODRIGUEZ	ArcelorMittal	Antonio	PIRES Da CRUZ	IFPEN
Hanna	BIRO	Bellona	Thierry	CAQUET	INRAE
Thibault	CANTAT	CEA	Caterina	de MATTEIS	IOGP
Chantal	JOUANNO	Ex. CNDP	François-Régis	MOUTON	IOGP
Xavier	ARNAULD de SARTRE	CNRS	Lucas	DESPORT	Doctorant (Mines Paris-Tech)
Arthur	CALVAT	DGE	Aurélié	BRUNSTEIN	Réseau Action Climat
Marine	PLASSIER	DGEC	Antoine	CHARBONNIER	Teréga
Yann	Le TOURNEUR	DG Trésor	Pauline	BOURGUIGNON	TotalEnergies
Philippe	GENILLON	Elengy	Éric	BERGÉ	The Shift Project
Lucile	PIERRE-LAURENT	Engie Groupe	Bertrand	WALLE	UNIDEN
Mélisande	COUESPEL	France Ciment	Arnaud	GILLES	WWF
Christopher	JONES	FSR			

La liste des personnes rencontrées lors des déplacements sur sites

Le groupe de travail s'est rendu :

- le 12 janvier 2024 à la cimenterie Lafarge de Martres-Tolosane, puis à la station de compression de gaz Teréga de Pau ;
- le 26 janvier 2024 à la cimenterie Equiom de Lumbres ;
- le 19 avril 2024 à l'usine sidérurgique ArcelorMittal de Grande-Synthe, puis au terminal méthanier Dunkerque LNG de Loon-Plage.

Thierry	FLAMENT	ArcelorMittal	David	COULON	Equiom
Matthieu	JEHL	ArcelorMittal	Luc	COUSIN	Equiom
Vincent	PUDYS	ArcelorMittal	Thomas	de CHARETTE	Lafarge
Marianne	VIART	ArcelorMittal	Christophe	LANDAIS	Lafarge
Michel	GERMOND-PIERROUX	CRH	Xavier	BRULÉ	Lafarge Ciments
Alec	BAGUÉ	Dunkerque LNG	Stephano	MORA	Repsol
Juan	CRESPO	Dunkerque LNG	Antoine	CHARBONNIER	Teréga
Olivier	HEURTIN	Dunkerque LNG	Youssef	CHEKLI	Teréga
Chris	VANDECASTEELE	Dunkerque LNG	Giacomo	MATARAZO	Teréga
Pierre	BERNARD	Equiom			

Introduction

Atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 est un exercice d'équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les absorptions de carbone.

Pour y parvenir, plusieurs moyens technologiques permettent de réduire ou d'éliminer ces émissions, qu'il s'agisse d'améliorer la sobriété et l'efficacité énergétiques, de développer des sources renouvelables d'énergie, de changer un usage ou encore de l'électrifier. Le **captage**, le **transport**, le **stockage** et la **valorisation** du dioxyde de **carbone** (CCUS) constituent également une solution mais qui ne s'impose pas avec la force de l'évidence, à raison des précautions qu'ils impliquent, des risques qu'ils présentent mais aussi en ce que ce procédé ne permet pas toujours l'élimination directe ou définitive des émissions de GES.

Selon l'AIE, 45 entreprises commerciales dans le monde pratiquaient le CCUS fin 2023 pour 45 millions de tonnes de dioxyde de carbone, soit environ 0,1 % des émissions annuelles mondiales. Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, ce sont 1,3 milliard de tonnes d'émissions par an d'ici 2030 qui devraient être évitées²⁰. Or, en France, malgré un besoin de stocker ou de valoriser qui s'élève à plus de 8 millions de tonnes de carbone d'ici à 2030 et 20 millions d'ici à 2050, le développement de la filière du CCUS est longtemps demeuré incertain et lent.

Le renforcement des objectifs de réduction des émissions de GES pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 a constitué un changement de paradigme pour les projets de CCUS. Le Conseil européen, en modifiant la loi européenne sur le climat, a fixé en décembre 2020 un objectif contraignant de réduction nette des émissions de GES, incluant les absorptions, dans l'Union européenne d'au moins 55 % d'ici 2030 puis d'au moins 90 % d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 1990²¹. Au plan international, la poursuite de ces objectifs ne concerne pas uniquement la décarbonation de l'industrie, mais aussi celle de la production d'électricité.

En Europe, la mise en place des marchés carbone *ETS-EU* (*Emissions Trading System in the European Union*, en anglais), qui s'appuient sur un système d'échange de *quotas* d'émissions de GES dans l'Union européenne (SEQE-UE)²² et sur un plafonnement de leur volume physique (*cap and trade*), dégressif avec le temps, pour les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'aviation et du transport maritime, responsables d'environ 40 % des émissions totales de l'Union européenne, constitue un des principaux leviers de la politique publique climatique, mais aussi une incitation forte pour les entreprises de ces secteurs à réduire leurs émissions, notamment en recourant à tous moyens permettant la décarbonation de leurs activités. Depuis son lancement en 2005, le SEQE-UE a contribué, au sein de son périmètre, à réduire les émissions de GES à hauteur de 46 %.

²⁰ Source : <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

²¹ Règlement n° 2021/1119/UE du Parlement européen et du Conseil du 30 juin 2021 établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique et modifiant les règlements (CE) n° 401/2009 et 2018/1999/UE, disponible sur eur-lex.europa.eu.

²² Directive n° 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003, établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, disponible sur eur-lex.europa.eu.

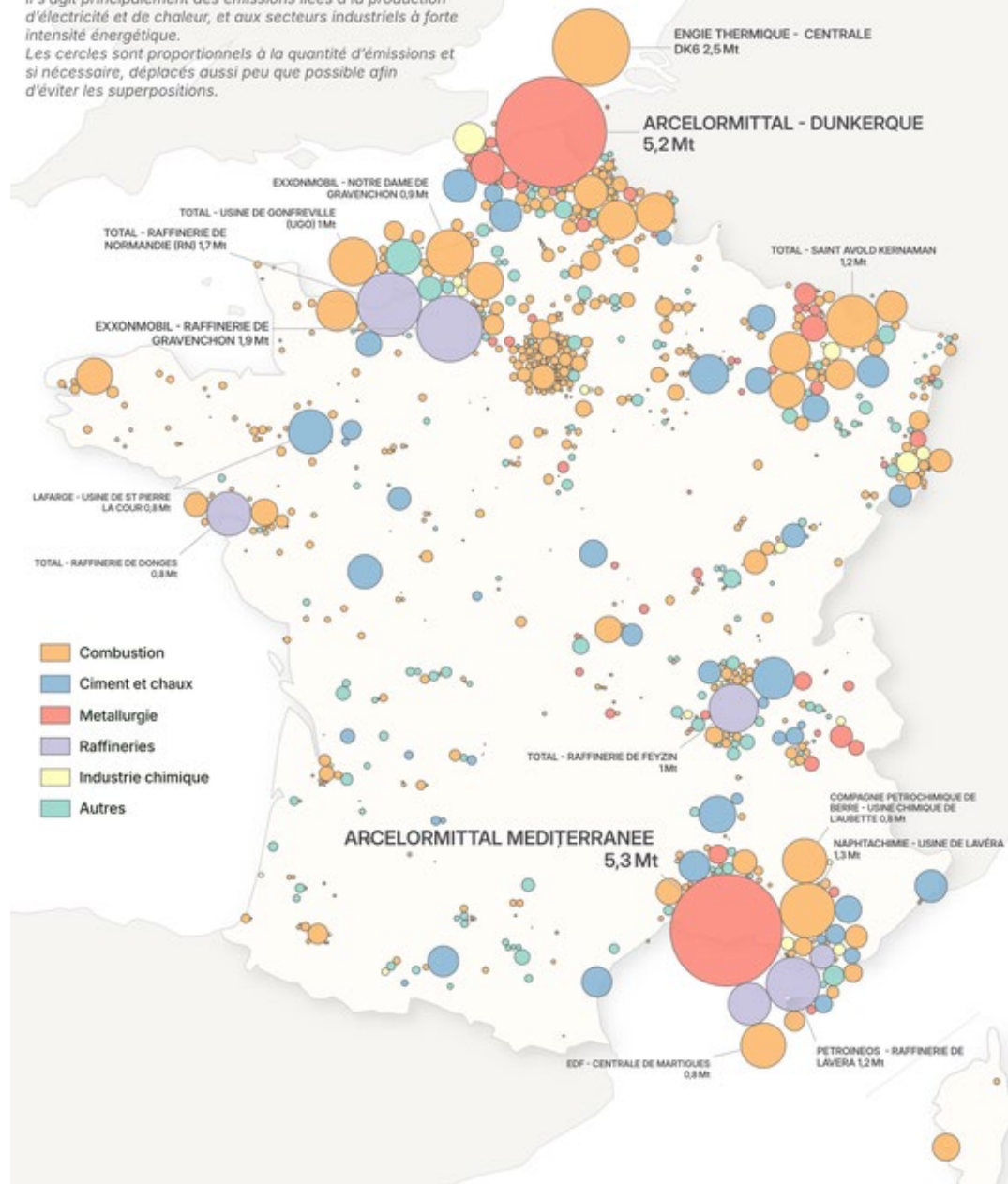
La carte des émissions métropolitaines de gaz à effet de serre des installations soumises à quota SEQUE-UE 2023

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE SEQUE-UE 2023

Émissions vérifiées de GES des installations de France métropolitaine soumises au système d'échange de quotas d'émission de l'UE.

Il s'agit principalement des émissions liées à la production d'électricité et de chaleur, et aux secteurs industriels à forte intensité énergétique.

Les cercles sont proportionnels à la quantité d'émissions et si nécessaire, déplacés aussi peu que possible afin d'éviter les superpositions.



Source : données EUTL, analyse Open data.gouv.fr²³

²³ Source : <https://www.data.gouv.fr/en/reuses/les-emissions-industrielles-de-gaz-a-effet-de-serre-en-france-metropolitaine/>

Dans le cadre ainsi défini, les textes nationaux, notamment la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)²⁴ et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)²⁵, assignent une **trajectoire** pour chaque secteur de l'économie française, l'industrie devant ainsi **réduire** ses **émissions** de 35 % d'ici 2030 puis de 81 % d'ici 2050 par rapport à 2015.

Or, ces différents objectifs excèdent les capacités existantes, d'origine naturelle ou technologique, d'absorption du carbone et leur poursuite commande, par voie de conséquence, d'en développer de nouvelles. Les **technologies de CCUS** peuvent alors contribuer, au même titre que d'autres leviers et dans un contexte d'urgence croissante face au changement climatique, à la **décarbonation** des filières pour lesquelles il n'existe pas d'alternative pour réduire les émissions de GES résiduelles ou incompressibles dans la période considérée. Sur les 50 premiers sites émetteurs en France²⁶, 20 sont des cimenteries émettant du dioxyde de carbone fatal, dit « de *procédés* » et pour lesquelles, en l'état actuel de la technique, il sera nécessaire de recourir durablement à son stockage ou sa valorisation, ce qui représente 1,2 million de tonnes à abattre à l'horizon 2030.

Dans cette perspective, le développement des projets a connu, dans la période récente, une accélération qu'est venue renforcer une première définition des contours d'une **stratégie nationale** de déploiement du **CCUS** en France à hauteur de 4 à 8,5 millions de tonnes de dioxyde de carbone en 2030, ce qui représente entre 5 et 10 % des émissions de GES de l'industrie en 2019. Ces quantités pourraient s'élever à 15 à 20 millions de tonnes en 2050²⁷. La construction de cette stratégie concourt au positionnement de la France tant au niveau européen qu'international en matière de décarbonation.

La croissance de la filière est susceptible d'être plus largement stimulée par l'évolution programmée des marchés carbone. En effet, le **SEQUE-UE** ne permettra plus, à terme, les allocations gratuites dans certains secteurs, notamment en conséquence de l'instauration du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) ou *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM)²⁸, ce qui pourrait déboucher sur une augmentation du prix de marché du carbone. Cette évolution sera de nature, en toute hypothèse, à inciter fortement les industriels concernés à diminuer leurs émissions de GES en vue de limiter les charges financières qui leur seront attachées.

Il demeure que, même dans ce contexte plus favorable au déploiement du CCUS, le développement d'une filière dédiée comme sa contribution effective à la transition énergétique sont soumis à de nombreuses **conditions**, parmi lesquelles deux paraissent d'emblée dirimantes. D'une part, les **capacités de stockage**, actuellement identifiées et disponibles, en France sont insuffisantes pour permettre à l'ensemble des projets de se développer, de sorte que l'**exportation** du dioxyde de carbone vers des sites de stockage en Europe, notamment en Mer du Nord ou en Méditerranée, constitue une étape incontournable pour assurer la croissance du secteur. D'autre part, la **durée** nécessaire au lancement et à la réalisation des projets, qui est de l'ordre de six ans en moyenne, mais qui peut atteindre dix ans, est un élément essentiel à la contribution en temps utile du CCUS à la décarbonation de l'économie. Compte tenu du rythme imprimé par les réglementations européenne et française à cette décarbonation, les décisions d'investissement doivent être prises sans tarder.

Dans le prolongement des constats qui viennent d'être faits, le présent rapport propose d'évaluer la manière dont le déploiement du CCUS peut être encouragé en vue de garantir ainsi sa meilleure contribution à la transition énergétique en temps utile. Il ressort des travaux du groupe de travail que, compte tenu des mouvements déjà engagés et des nombreuses études déjà menées, le groupe de travail a estimé devoir se concentrer sur l'approfondissement des enjeux liés à la **régulation** de ce secteur naissant.

En premier lieu, le secteur naissant du CCUS présente des caractéristiques particulières qui déterminent les enjeux de sa régulation possible afin d'accélérer son développement sous la forme de chaînes et par-là lui permettre de jouer pleinement un rôle au service de la transition énergétique (I).

²⁴ Cette stratégie est explicitée sur le site Internet du [ministère de la transition énergétique](#).

²⁵ Sur les Programmes pluriannuels de l'énergie (PPE), cf. la présentation qui en est faite sur le site Internet du [ministère de la transition énergétique](#).

²⁶ Source : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/publication-contrats-transition-ecologique-50-sites-industriels>.

²⁷ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/etat-des-lieux-et-perspectives-de-deploiement-du-ccus-en-france.pdf>.

²⁸ Règlement n° 2023/956/UE du Parlement européen et du Conseil du 10 mai 2023, établissant un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, disponible sur eur-lex.europa.eu.

En deuxième lieu, la définition d'un cadre de régulation souple est à privilégier compte tenu de la pluralité des configurations dans lesquelles les chaînes de CCUS sont susceptibles d'être constituées, de manière à encadrer efficacement leur déploiement en temps utile pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES (II).

En dernier lieu et dans cette perspective, le groupe de travail estime que, de manière plus transversale, il faut redimensionner les moyens mis en œuvre pour développer les chaînes de CCUS et permettre le plein succès de la filière naissante (III).

1. Le CCUS au service de la transition énergétique

L'appréhension du rôle que les chaînes de CCUS sont appelées à jouer au service de la transition énergétique comme des enjeux de leur régulation passe par la meilleure compréhension de leur composition (1) et de leur degré de développement en Europe (2).

1.1. Le CCUS : les préliminaires

Le CCUS consiste à combiner un ensemble de technologies destinées à abattre les émissions de dioxyde dans l'atmosphère, qu'il s'agisse de le stocker durablement dans des formations géologiques adaptées ou de le valoriser comme ressource dans des procédés industriels. Ces opérations impliquent une succession d'étapes faisant intervenir divers opérateurs dont les actions sont interdépendantes, formant ainsi une « chaîne » de valeurs (1). Certaines technologies employées parvenant à maturité, les projets de chaîne de CCUS commencent à être déployés à l'échelle mondiale, faisant ainsi naître une nouvelle filière industrielle (2).

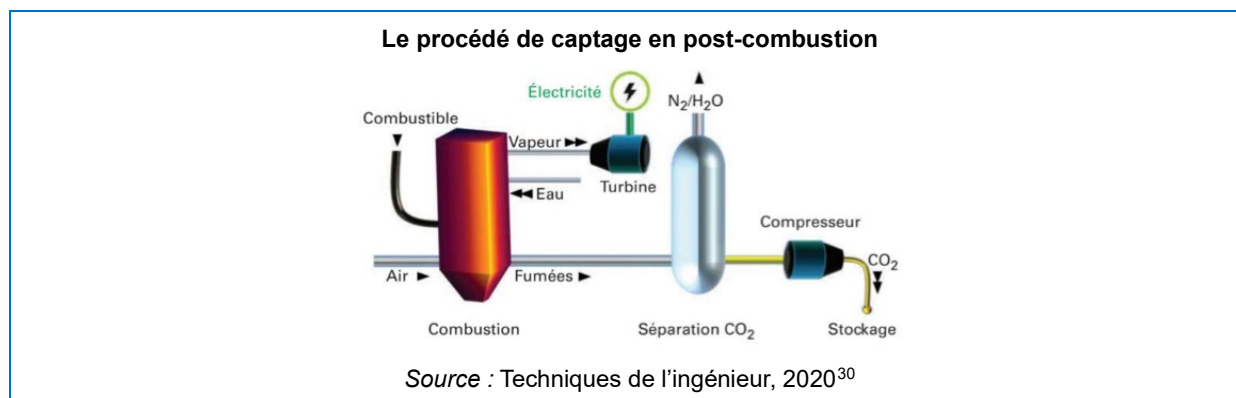
1.1.1. Le CCUS, une chaîne de valeur à déployer

La chaîne de CCUS est constituée de plusieurs « maillons » correspondant aux différentes étapes du chemin parcouru par le dioxyde de carbone entre le lieu de son émission et celui de son stockage ou, le cas échéant, de sa valorisation.

a) Le **captage** consiste à prélever le dioxyde de carbone soit à partir d'émanations industrielles avant son émission dans l'atmosphère, soit directement dans l'atmosphère une fois émis. Plusieurs technologies de captage existent et leur choix dépend de la nature et de la concentration en gaz de sa source. Le captage constitue l'étape qui requiert la consommation énergétique la plus élevée de la chaîne de CCUS, notamment pour séparer le dioxyde de carbone des fumées. En effet, plus la concentration en gaz sera faible, plus cette consommation sera importante.

À l'heure actuelle, en Europe, le captage est déjà déployé au sein de nombreuses industries où le dioxyde de carbone est très concentré, notamment la production d'ammoniaque, le raffinage ou encore le traitement des gaz issus de l'exploitation de gaz fossiles²⁹, suivant trois procédés principaux.

La **post-combustion** consiste à retirer le dioxyde de carbone à la sortie des fumées émises par la combustion en les lavant par solvant. Le procédé consomme néanmoins d'importantes quantités d'énergie mais il s'agit de la technique de captage la plus communément utilisée à l'heure actuelle.

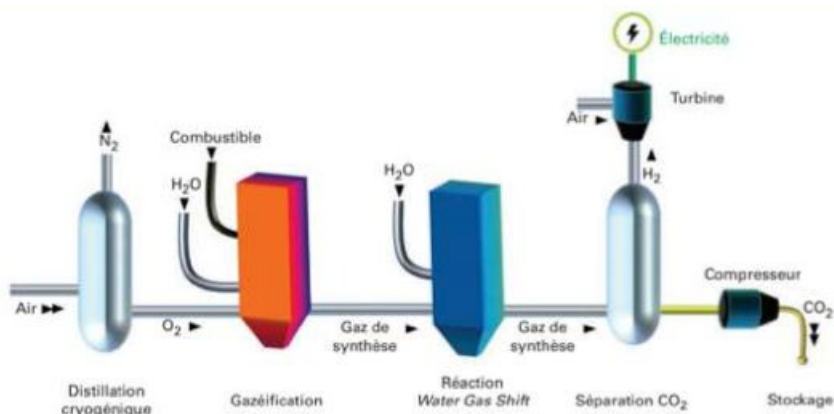


La **pré-combustion** consiste à partiellement oxyder le combustible avant sa combustion. Il est d'abord transformé en un gaz de synthèse composé d'hydrogène, d'eau et de monoxyde de carbone, puis il est (re)formé par introduction de vapeur d'eau. Le monoxyde de carbone se convertit alors en dioxyde de carbone, avec production additionnelle d'hydrogène. Ces gaz sont ensuite séparés grâce à un solvant ou par pression et concentration. Le dioxyde de carbone peut alors être capté à ce stade.

²⁹ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/etat-des-lieux-et-perspectives-de-deploiement-du-ccus-en-france.pdf>.

³⁰ Source : Mines ParisTech-PSL, MIG 2020-CO2, *Le CO2 : son captage, son stockage et sa valorisation*, p. 8, disponible sur le site Internet https://mig.minesparis.psl.eu/wp-content/uploads/2022/01/Rapport_MIG_CO2.pdf.

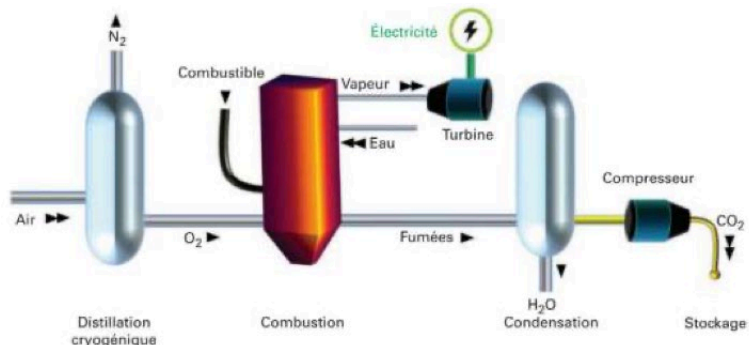
Le procédé de captage en pré-combustion



Source : Techniques de l'ingénieur, 2020³¹

L'**oxy-combustion** consiste à réaliser une combustion en présence d'oxygène pur au lieu d'air, ce qui permet d'obtenir des fumées plus concentrées en dioxyde de carbone, à hauteur de 90 %. Le flux produit est alors sans azote, uniquement composé de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau qui sont ensuite séparés plus aisément par condensation. La production de l'oxygène pur est réalisée par divers procédés, notamment la distillation cryogénique de l'air, l'absorption, etc. Mais son coût demeure élevé.

Le procédé de captage en oxy-combustion



Source : Techniques de l'ingénieur, 2020³²

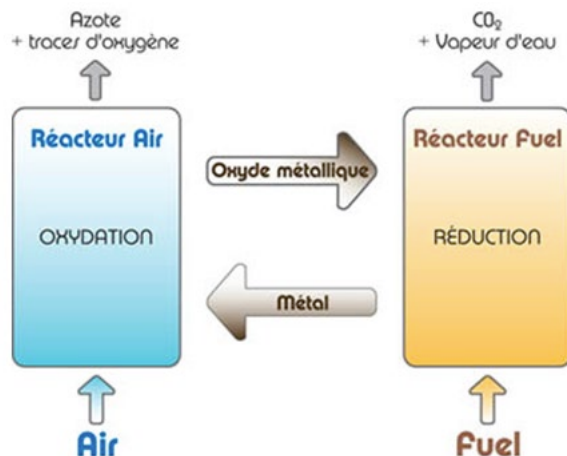
D'autres procédés sont étudiés dans une perspective de réduction des coûts, parmi lesquels le *Chemical Looping Combustion*.

³¹ Source : Mines ParisTech-PSL, MIG 2020-CO2, loc. cit.

³² Source : Mines ParisTech-PSL, MIG 2020-CO2, rapp. préc., p. 9.

Le procédé du Chemical Looping Combustion (CLC)

Dans le cadre de ce projet développé par l'IFPEN en collaboration avec TotalEnergies, des oxydes métalliques sont utilisés pour réaliser une combustion en l'absence d'azote de l'air. Les particules métalliques en s'oxydant permettent le transfert de l'oxygène dans la zone de combustion, séparant ainsi l'oxygène de l'azote.



Ce procédé devrait permettre de réduire fortement les coûts de captage si les verrous technologiques associés sont levés.

Il est également possible de capter le dioxyde de carbone directement dans l'**atmosphère** où il est néanmoins plus dilué. Ce captage direct dans l'air ou **DAC** (*Direct Air Capture*, en anglais)³³ peut être effectué selon deux procédés principaux. Un système **liquide** fait passer l'air à travers une solution chimique, telle qu'une solution d'hydroxyde, qui élimine le dioxyde de carbone tout en libérant l'air résiduel dans l'atmosphère. Un système **solide** utilise des filtres absorbants qui se lient chimiquement au dioxyde de carbone. Une fois chauffés, ils restituent un dioxyde de carbone concentré qui est alors capté.

Il existe, à l'heure actuelle, une quinzaine d'installations en fonctionnement dans le monde ce qui représente 9 000 tonnes par an de dioxyde de carbone captées mais les coûts demeurent très élevés.

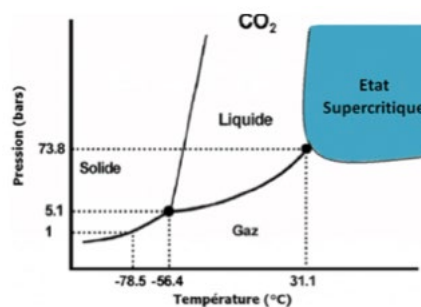
b) Le transport intervient ensuite, une fois le dioxyde de carbone capté. Il est alors **acheminé** parfois sur plusieurs centaines de kilomètres vers un lieu de stockage ou de valorisation qui peut être situé selon les cas, sur ou sous terre, ou en mer mais toujours sous terre. Cette étape présente des points communs avec le transport déjà ancien et maîtrisé technologiquement, des hydrocarbures ou du gaz naturel.

Les modes de transport du dioxyde de carbone sont variés : routier, ferroviaire, fluvial, maritime ou encore par canalisations.

Aux conditions de pression et de température normales, le dioxyde de carbone se trouve sous forme gazeuse. Lorsque le transport est réalisé par canalisations, il est fréquemment placé à l'état supercritique : sous haute pression (80 à 150 bars) et à une température d'environ 40 °C, ce qui nécessite des installations de compression et d'injection adaptées.

³³ Source : AIE, *Direct Air Capture*, avril 2022, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>.

Le diagramme de phases du dioxyde de carbone (CO₂)



Source : MIG 2020-CO₂³⁴

Le transport par bateau est réalisé à partir de terminaux portuaires, et est plus flexible que le transport par canalisations. Le dioxyde de carbone est liquéfié, sous une pression de 14 à 17 bars pour une température de - 25 à - 30 °C, méthode qui demeure encore coûteuse.

c) Une fois parvenu à un lieu de **stockage**, le dioxyde de carbone est injecté sous forme dense dans des formations géologiques étanches où il sera confiné de manière permanente. Ces sites de stockage peuvent être *onshore* (sous terre continentale) ou *off-shore* (sous terre sous-marine).

Pour pouvoir le stocker efficacement, il faut pouvoir l'injecter dans les formations géologiques par des puits spécifiquement équipés pour ces opérations. En pratique, le dioxyde de carbone fait l'objet d'une **condensation**, le plaçant le plus souvent en l'état dense ou supercritique.

Selon un rapport spécial de l'AIE de 2020³⁵, la capacité mondiale de stockage de dioxyde de carbone serait comprise entre 8 000 et 55 000 gigatonnes. Le potentiel de stockage terrestre, estimé entre 6 000 et 42 000 gigatonnes est, selon cette autorité, plus important que le potentiel *off-shore* qui représenterait entre 2 000 et 13 000 gigatonnes³⁶.

De manière générale, le stockage de dioxyde de carbone est soumis à plusieurs conditions. La couche destinée à servir au stockage doit être suffisamment poreuse, perméable et en capacité de contenir une quantité relativement importante (apte à contenir une pression de stockage significative). Une profondeur d'au moins 800 mètres est nécessaire pour que les conditions de température et de pression soient adaptées au stockage du dioxyde de carbone à l'état supercritique. Le réservoir doit être recouvert d'une couche de roche imperméable (couverture ou *caprock*). Les conflits d'usages avec d'autres activités, comme la géothermie, l'exploitation de gisements d'hydrocarbure ou les espaces protégés sont exclus³⁷. Il existe deux principaux types de formation géologique qui répondent *a priori* à ces conditions.

Les **aquifères salins profonds** constituent des réservoirs d'eau salée non potable, situés à de grandes profondeurs. La capacité mondiale de stockage estimée est de l'ordre de 400 à 10 000 gigatonnes, mais un effort important de recherche préalable est nécessaire pour apprécier les capacités réelles de stockage et leur aptitude à séquestrer efficacement le dioxyde de carbone pour de longues durées.

Les aquifères utilisés pour leur eau potable ou l'agriculture sont, en revanche, exclus afin d'éviter tout risque de pollution par le dioxyde de carbone lorsqu'il remonte par densité, ou qu'il s'écoule.

Les **gisements** d'hydrocarbures (pétrole et gaz) **déplétés**, dont l'intérêt réside dans l'antériorité de leur fonction de « *pièges étanches* » parfois pendant plusieurs millions d'années, présentent quant à eux une capacité mondiale de stockage plus limitée, mais leur disponibilité permet d'ores et déjà de mener des projets de captage, de transport et de stockage de dioxyde de carbone d'envergure.

³⁴ Source : Mines ParisTech-PSL, MIG 2020-CO₂, rapp. préc., p. 12.

³⁵ Source : AIE, *CCUS in Clean Energy Transitions*, septembre 2020, disponible sur le site Internet <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.

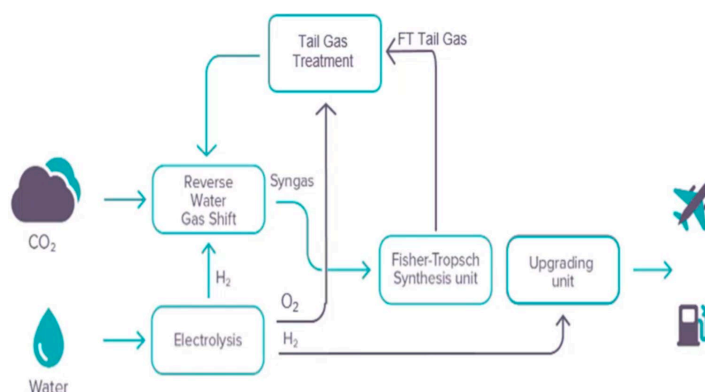
³⁶ Ces estimations prennent en compte les sites situés à moins de 300 kilomètres de la côte, à des profondeurs d'eau inférieures à 300 mètres et excluent les régions de l'Arctique et de l'Antarctique.

³⁷ Source : Mines ParisTech-PSL, MIG 2020-CO₂, rapp. préc., p. 13.

d) Une alternative au stockage permanent du dioxyde carbone réside dans sa **valorisation**. Il est historiquement utilisé dans plusieurs applications, dont les principales sont la fabrication de produits chimiques, comme l'urée et les carbonates. D'autres applications ont été développées notamment le traitement des eaux, la croissance accélérée en serre des végétaux, la réfrigération, etc. Elles représentent l'essentiel du dioxyde de carbone capté dans le monde, de l'ordre de 20 à 300 millions de tonnes par an. De nouvelles applications continuent d'apparaître, en particulier la fabrication de carburants de synthèse ou de méthanol et d'autres utilisations comme **matière première**, ou par voie **chimique**, par différentes industries pour la fabrication de produits, ainsi que par voie **biologique**. Elles pourraient concerner, à terme, des volumes significatifs de dioxyde de carbone.

Les carburants de synthèse

Les carburants de synthèse ou électro-carburants (*e-fuels*) reposent sur une technologie permettant de réduire les émissions de certains modes de transport, notamment le transport longue-distance aérien ou maritime³⁸. Ces carburants sont obtenus en combinant du dioxyde de carbone capté avec de l'hydrogène décarboné (*Reverse Water Gas Shift*³⁹), en tant qu'il est lui-même produit à partir d'électricité provenant de sources renouvelables (éolien, solaire, hydraulique) ou, plus généralement, décarbonées (nucléaire) par électrolyse de l'eau, et en ayant recours à des procédés chimiques (*Fischer-Tropsch*⁴⁰).



Source : IFPEN

Si le dioxyde de carbone utilisé est produit à partir de la biomasse, il s'agira alors d'un biocarburant avancé (*e-biofuel*).

La **valorisation chimique** du dioxyde de carbone peut être envisagée, notamment pour produire des engrais ou certaines matières plastiques (polycarbonates ; polyméthanés) ou encore pour la minéralisation et la carbonatation, en vue par exemple de durcir le béton.

La **valorisation biologique** du dioxyde de carbone peut être réalisée de différentes manières, soit à travers la production de biocarburants soit par injection directe dans le sous-sol sans transformation.

Le stockage de carbone dans le sol

Les matières organiques des sols sont constituées pour 50 % de carbone et sont le support de leur fertilité chimique et physique, de leur activité biologique, ainsi que de leur stabilité. Le stock de carbone à l'échelle nationale est de l'ordre de 3,6 gigatonnes dans les trente premiers centimètres de sol, mais l'agriculture intensive et des configurations géographiques variables conduisent à une décroissance progressive de la teneur en carbone des sols.

Le stockage de carbone dans les sols (*carbon farming*) consiste à injecter le dioxyde de carbone dans des sols agricoles, ce qui permet de répondre à un enjeu agronomique, par augmentation de la biomasse, et contribue à l'atténuation du changement climatique, à travers la réduction des émissions dans l'atmosphère.

³⁸ Depuis juillet 2021, la proposition de réglementation de la Commission européenne du package *Fit for 55* dite « *ReFuelEU Aviation* » propose une incorporation minimum de 5 % d'*e-fuel* dans les carburants d'aviation en 2035 et de 28 % en 2050.

³⁹ La réaction du gaz à l'eau est une réaction chimique convertissant un mélange de monoxyde de carbone et de vapeur d'eau en un mélange de dioxyde de carbone et d'hydrogène. Cette réaction est obtenue notamment lors du vaporeformage du méthane ou d'autres hydrocarbures.

⁴⁰ Cette synthèse est un procédé permettant, à travers un ensemble de réactions, la réduction par catalyse d'un mélange gazeux de monoxyde de carbone et de dihydrogène en vue d'obtenir un hydrocarbure.

Le potentiel de stockage additionnel maximal par ce procédé est de l'ordre de 8,15 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an.

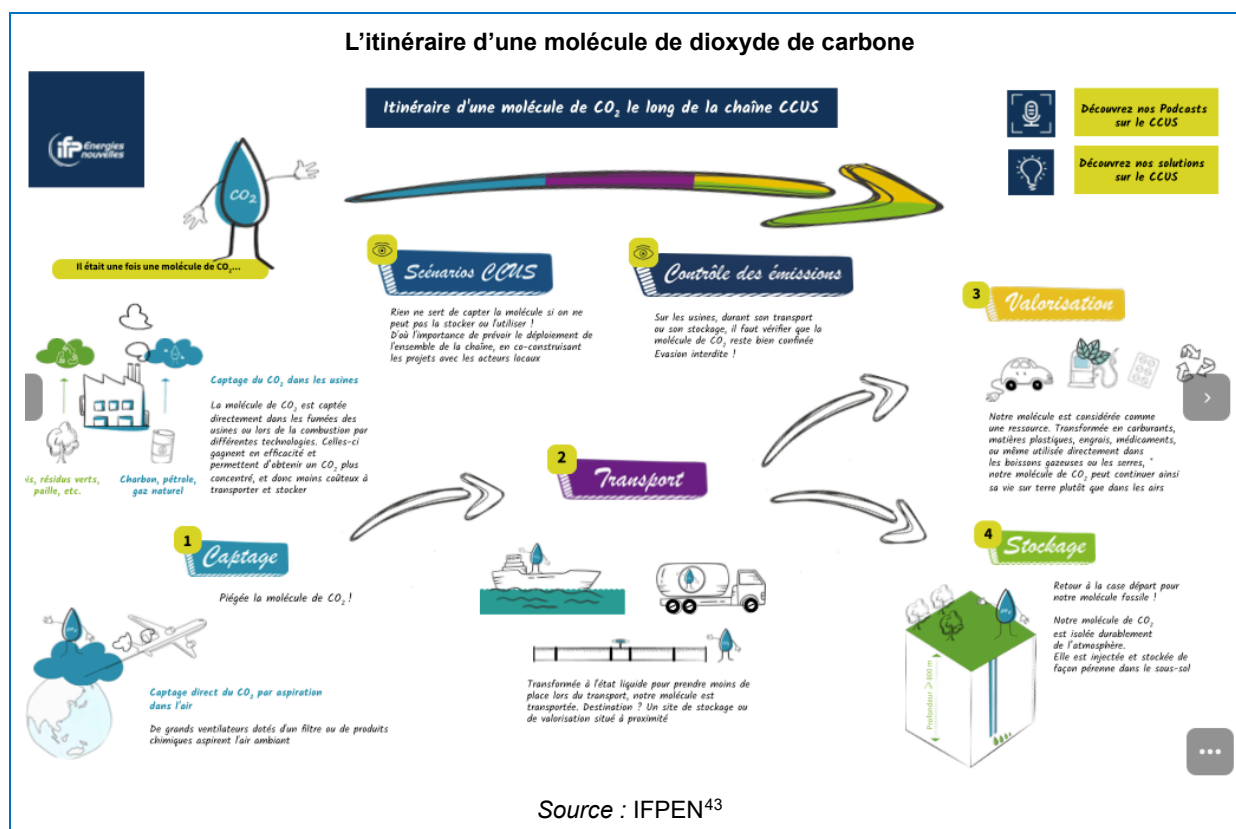
Sa mise en œuvre suppose néanmoins d'éviter un déstockage du dioxyde de carbone.

Toutefois, le groupe de travail constate que la plupart des procédés de valorisation du dioxyde de carbone ne sont pas encore matures techniquement, que leur rentabilité n'est pas encore garantie et que leur bilan environnemental suscite encore des interrogations, en particulier au regard de l'analyse du cycle de vie des produits concernés. Leur consommation restituée, en effet, le dioxyde de carbone à l'atmosphère, ce dernier n'ayant été *in fine* que temporairement stocké⁴¹. L'effet positif qu'ils entraînent sur le climat demeure limité à leur substitution à des produits utilisant du carbone fossile.

Au total, selon l'AIE⁴², la valorisation du dioxyde de carbone ne représenterait que 8 % du potentiel de réduction des émissions attribué au CCUS sur la période 2020 à 2070.

*

L'ensemble des « *maillons* » ainsi identifiés forment une chaîne industrielle interdépendante, mais à physionomie variable, qui permet, par l'intervention de multiples acteurs du CCUS de jouer un rôle dans la transition énergétique.



1.1.2. Une industrie européenne en développement

Appuyés, au cours de la période récente, par la réglementation européenne et les stratégies nationales, les projets se développent à l'échelle industrielle en Europe. Les projets les plus avancés sont, à l'heure actuelle, situés en Mer du Nord.

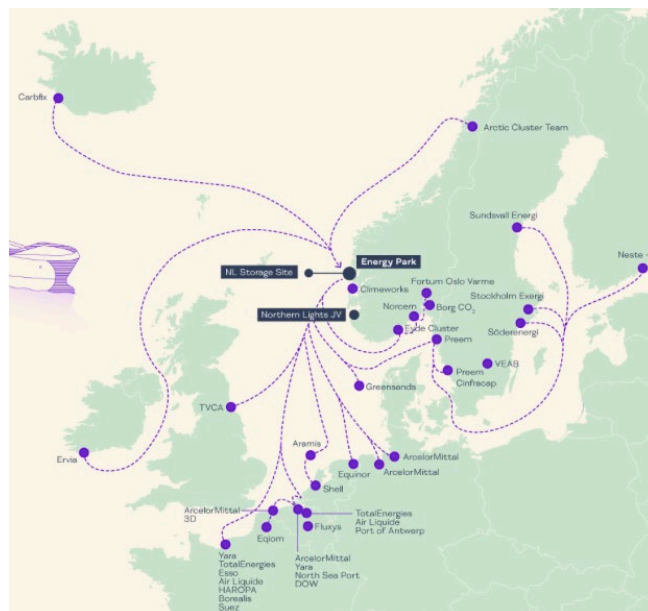
⁴¹ La durée de stockage est susceptible de varier selon la nature du produit. Cf. Avis, *Valorisation du CO₂ : quels bénéfices ? sous quelles conditions ?* 2021, disponible sur le site Internet de l'Ademe.

⁴² Source : AIE, *CCUS in Clean Energy Transitions*, préc.

⁴³ Source : <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr>.

Le projet Northern Lights en Norvège

Lancé en 2014, ce projet industriel combine un transport du dioxyde de carbone par bateau jusqu'au terminal d'Øygarden et son stockage sous-marin en mer du Nord, à une profondeur de 2 600 mètres, dans le complexe Aurora. Il est mené par le gouvernement norvégien, avec un investissement initial de 1,6 milliard d'euros, en partenariat avec les groupes TotalEnergies, Equinor et Shell et sera mis en service en 2025⁴⁴.



Source : Northern Lights

L'objectif est de stocker 1,5 million de tonnes de dioxyde de carbone par an, puis jusqu'à 5,2 millions par an à partir de 2030. La capacité maximale de stockage a été évaluée à 100 millions de tonnes.

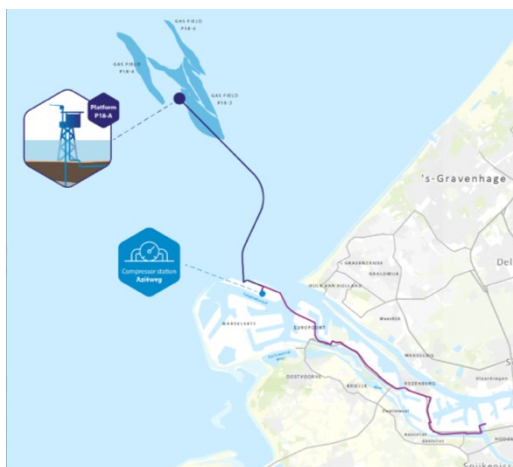
Il s'agit également du premier projet commercial transfrontalier. Les clients sont notamment situés en Allemagne, en France et aux Pays-Bas. Un stockage de dioxyde de carbone biogénique est également prévu.

D'autres projets combinant le transport avec le stockage de dioxyde de carbone ont également été récemment lancés.

⁴⁴ Source : <https://norlights.com>.

Le projet Porthos aux Pays-Bas

Lancé fin 2023, ce projet industriel est un projet de mutualisation d'un gazoduc pour transporter du dioxyde de carbone à partir du port de Rotterdam vers une zone de stockage située à 20 km. de la côte en Mer du Nord et sera mis en service en 2026. Il a été reconnu comme projet d'intérêt commun (PCI) par l'Union européenne.

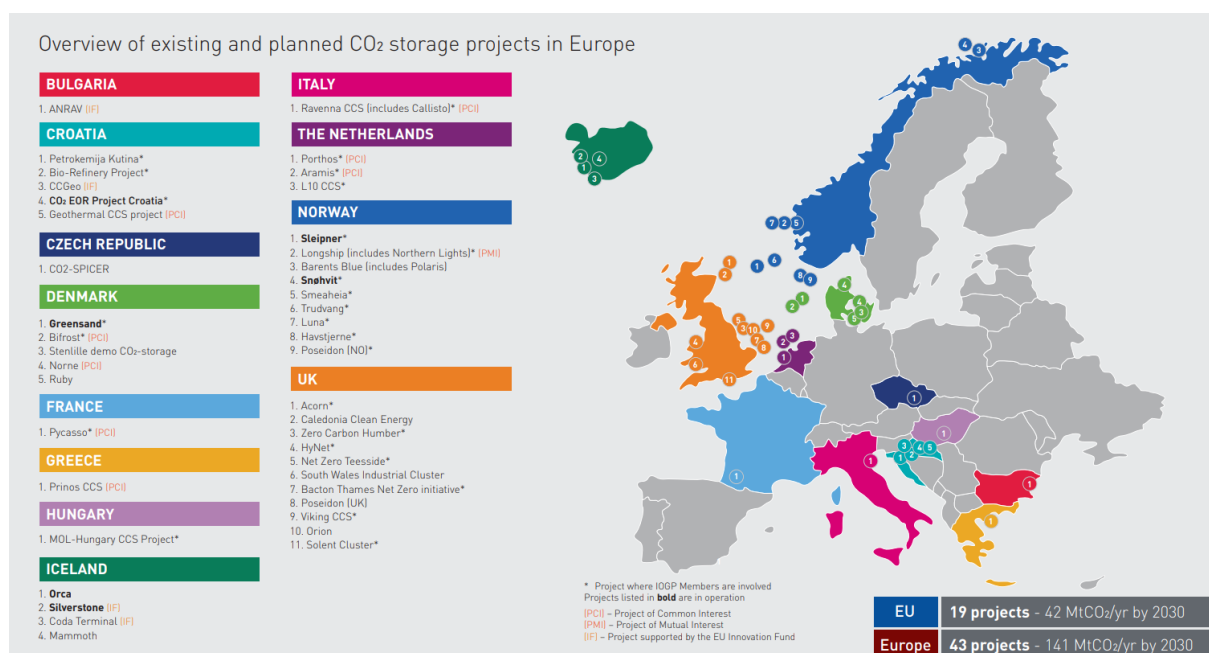


Source : Porthos CO₂

L'objectif est de stocker 2,5 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an sur une période de 15 ans. La capacité maximale de stockage a été évaluée à 37 millions de tonnes.

Ces projets s'insèrent dans un contexte européen dans lequel un nombre croissant de projets de stockage sont en cours de développement ou de programmation⁴⁵.

L'aperçu des projets de stockage de dioxyde de carbone existants et prévus en Europe



Source : IOGP, mars 2024

⁴⁵ Pour un aperçu, cf. également État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France, juillet 2024, disponible sur le site Internet du [ministère de l'écologie](#).

Leur caractère **transfrontalier** donne lieu à la conclusion d'un nombre croissant d'accords de coopération pour l'exportation de dioxyde de carbone vers des sites de stockage situés en Mer du Nord, conférant une dimension transnationale à la filière.

Alors qu'elle tarde à ratifier l'amendement au Protocole de Londres permettant cette exportation au plan international⁴⁶, la France a aussi signé plusieurs accords bilatéraux, avec la Norvège et le Danemark, en 2024 de façon à permettre d'organiser à compter de 2027 le transport et le stockage de dioxyde de carbone par bateau et par canalisation pour les premiers projets français.

L'émergence progressive d'une filière industrielle à l'échelle de l'Europe conduit à prendre la mesure des enjeux du déploiement des chaînes de CCUS en France.

1.2. Les enjeux du développement des chaînes de CCUS

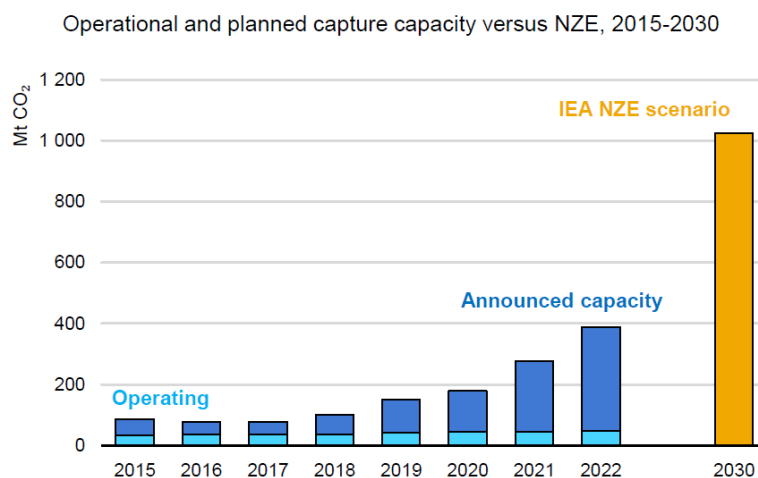
Le déploiement des chaînes de CCUS répond à un enjeu de légitimation de la technologie à servir la transition énergétique (1). Pour y contribuer pleinement, le CCUS doit s'intégrer aux politiques publiques menées en la matière (2) et relever le défi de son acceptabilité sociale (3).

1.2.1. Un instrument à la légitimité renouvelée

Le captage, le transport et le stockage de gaz sont des technologies qui sont maîtrisées de longue date, notamment par l'industrie pétrolière. Ce n'est pourtant que dans la période récente, dans le cadre de la transition énergétique, que la filière du CCUS connaît un regain d'intérêt.

a) Dans les années 2000, le développement du captage et du stockage de carbone visait très majoritairement la décarbonation de la production d'électricité. En dépit d'améliorations en particulier sur les technologies de captage et d'une réduction des coûts, à environ 100 euros par tonne de dioxyde de carbone, la filière n'a pas connu une croissance permettant la création d'un véritable marché.

La capacité de captage opérationnelle et planifiée de dioxyde de carbone par rapport à l'objectif de neutralité carbone



Source : AIE⁴⁷

Les raisons en sont multiples et tiennent notamment à un prix de marché du dioxyde de carbone particulièrement bas jusqu'en 2020 (moins de 20 euros la tonne de 2013 à 2019 sur le marché SEQUE-EU), à l'absence de soutien des pouvoirs publics ou encore à l'absence de réglementation européenne dédiée, à l'exception du stockage qui a fait l'objet d'une directive en 2009⁴⁸ comme à la

⁴⁶ Projet de loi autorisant la ratification de la résolution LP.3(4) portant amendement de l'article 6 du Protocole de Londres de 1996 à la Convention de 1972 sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières, disponible sur le site Internet du [Sénat](#).

⁴⁷ Source : AIE, *Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)*, 2023, disponible sur le site Internet <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>.

⁴⁸ Directive n° 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative au stockage géologique du dioxyde de carbone et modifiant la directive 85/337/CEE du Conseil, les directives 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE et 2008/1/CE et le règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil, disponible sur eur-lex.europa.eu.

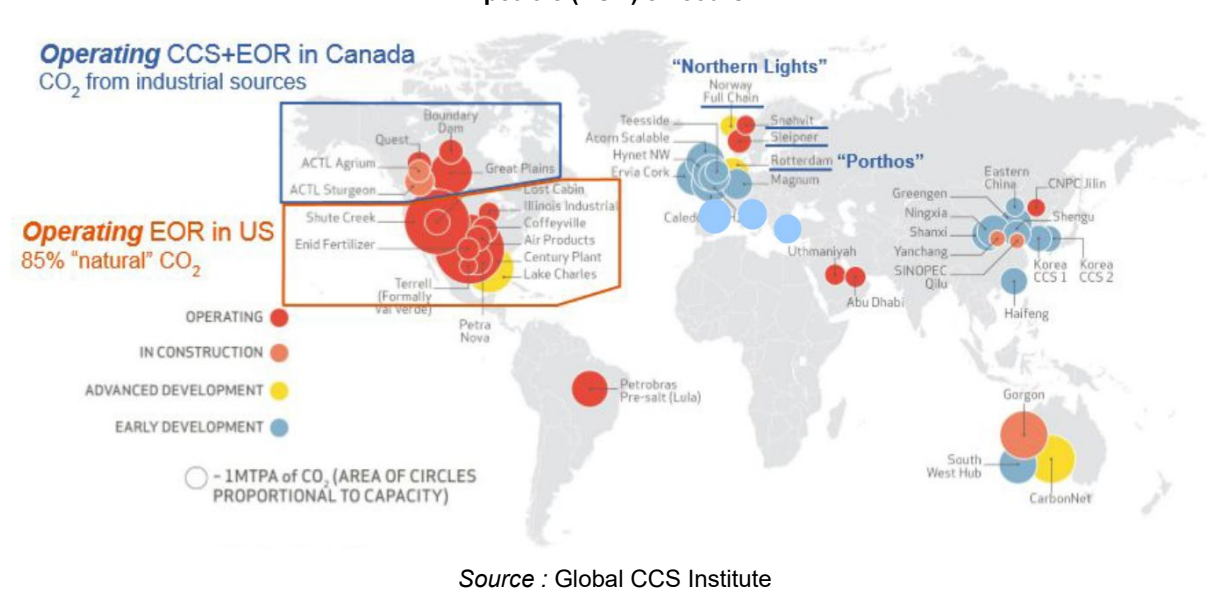
priorité donnée au développement des sources renouvelables d'énergie dans les politiques publiques européennes.

Le captage, le transport et le stockage de dioxyde de carbone ne bénéficiaient pas, par ailleurs, d'une image valorisante du point de vue de la décarbonation, étant perçus davantage comme une forme d'évitement que comme une contribution réelle à l'abattement des émissions de GES.

b) Un changement de paradigme s'est opéré dans les dernières années, principalement lié aux enjeux de la décarbonation de l'industrie qui sont devenus plus pressants compte tenu des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. L'élaboration par les pouvoirs publics de stratégies nationales et de réglementation en la matière (la SNBC et la PPE) a conduit à une augmentation de la demande des émetteurs de GES, parmi lesquels les 50 plus importants en France, dans un contexte où d'autres technologies concurrentes, comme l'hydrogène décarboné, ne sont pas encore matures et où le CCUS est regardé comme un levier, parmi d'autres, de décarbonation.

Selon l'AIE, au cours des trois dernières années, plus de 400 nouveaux projets de chaîne de CCUS ont été annoncés dans plus de 45 pays. Leur capacité cumulée représente, à ce stade, plus d'un tiers de la quantité de dioxyde de carbone captée en 2030 dans le scénario neutralité carbone qu'elle a établi⁴⁹.

Les grands puits pour les projets de captage et stockage de carbone (CCS) de récupération assistée du pétrole (EOR) en cours



c) Un **consensus** s'est progressivement constitué sur le rôle du CCUS comme option crédible pour contribuer à la réduction des émissions de GES, tant dans les évaluations des trajectoires permettant d'atteindre la neutralité carbone, notamment celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)⁵⁰ et de l'AIE, que dans les premières orientations définies par les pouvoirs publics.

Au niveau **européen**, outre la réglementation déjà mentionnée et le soutien financier aux projets, notamment à travers le Fonds pour l'innovation, la Commission européenne a publié, le 6 février 2024, une **stratégie industrielle du carbone** pour 2030 puis 2050, qui reposera notamment sur le captage et le stockage du dioxyde de carbone, ainsi que sur son utilisation, en vue de la création d'un marché unique. Il a été reconnu, à cette occasion, que ces technologies s'imposent désormais comme des mesures complémentaires aux autres mesures d'atténuation déjà matures contre les émissions difficiles à réduire, en particulier les émissions de procédé des industries difficiles à abattre ou incompressibles,

⁴⁹ Source : AIE, *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*, préc.

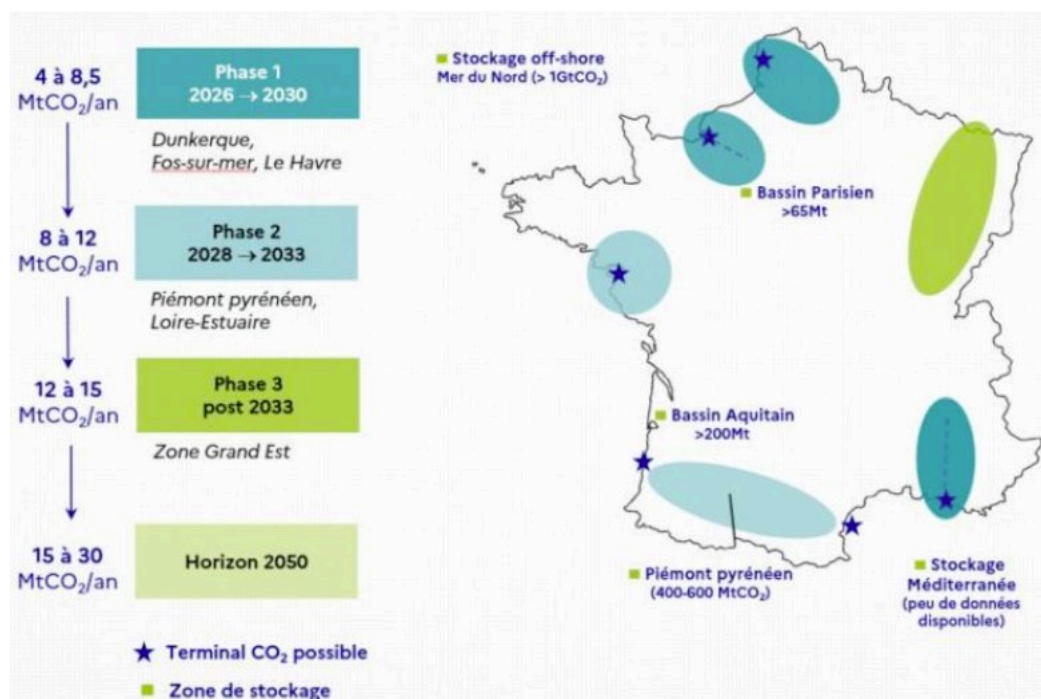
⁵⁰ Source : GIEC, *Changement climatique 2022 : atténuation du changement climatique*, 4 avril 2022, disponible sur le site Internet <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

et pour parvenir à la neutralité climatique⁵¹. Cette option sera reprise par le règlement européen Net-Zero Industry Act (NZIA) en cours d'adoption⁵².

La **France** a, quant à elle, publié ses premières **orientations stratégiques** du déploiement du CCUS en juin 2023⁵³, lesquelles ont fait l'objet d'une consultation publique et d'un avis du Haut conseil pour le climat⁵⁴.

À la suite de ces travaux, un document ministériel faisant un état des lieux et des perspectives a été publié en juillet 2024⁵⁵. Il envisage plusieurs phases de déploiement entre 2026 et au-delà de 2033, le renforcement des dispositifs de soutien existants et la création d'un dispositif de soutien dédié au développement des six zones industrielles les plus émettrices (Dunkerque, le Sud-Ouest, le Piémont pyrénéen, l'axe Rhône/Fos-sur-Mer, la vallée de la Seine/Le Havre et le Grand Est) dont cinq disposent d'une façade maritime (Marseille, Ports de Dunkerque, Le Havre, Port La Nouvelle/Bayonne et Saint-Nazaire).

Le résumé synthétique de la nouvelle stratégie de la France dans le captage et le stockage du dioxyde de carbone



Source : Conseil national de l'industrie⁵⁶

Autant de jalons qui ouvrent la voie à l'élaboration d'une politique publique en faveur du développement de la filière, plus d'une décennie après ses premiers débuts.

⁵¹ Commission européenne, Communication au Parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'Union européenne, 6 février 2024, COM(2024) 62 final, disponible sur eur-lex.europa.eu.

⁵² Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie « zéro net », COM(2023) 161, disponible sur eur-lex.europa.eu.

⁵³ Source : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/actualites/deploiement-capture-stockage-valorisation-carbone-ccus-france>.

⁵⁴ Source : <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/avis-sur-la-strategie-de-capture-du-carbone-son-utilisation-et-son-stockage-ccus/>.

⁵⁵ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/etat-des-lieux-et-perspectives-de-deploiement-du-ccus-en-france.pdf>.

⁵⁶ Source : *Stratégie CCUS, France 2030*, disponible sur le site Internet du [Conseil national de l'industrie](https://www.conseil-national-industrie.fr).

1.2.2. Une politique publique à développer

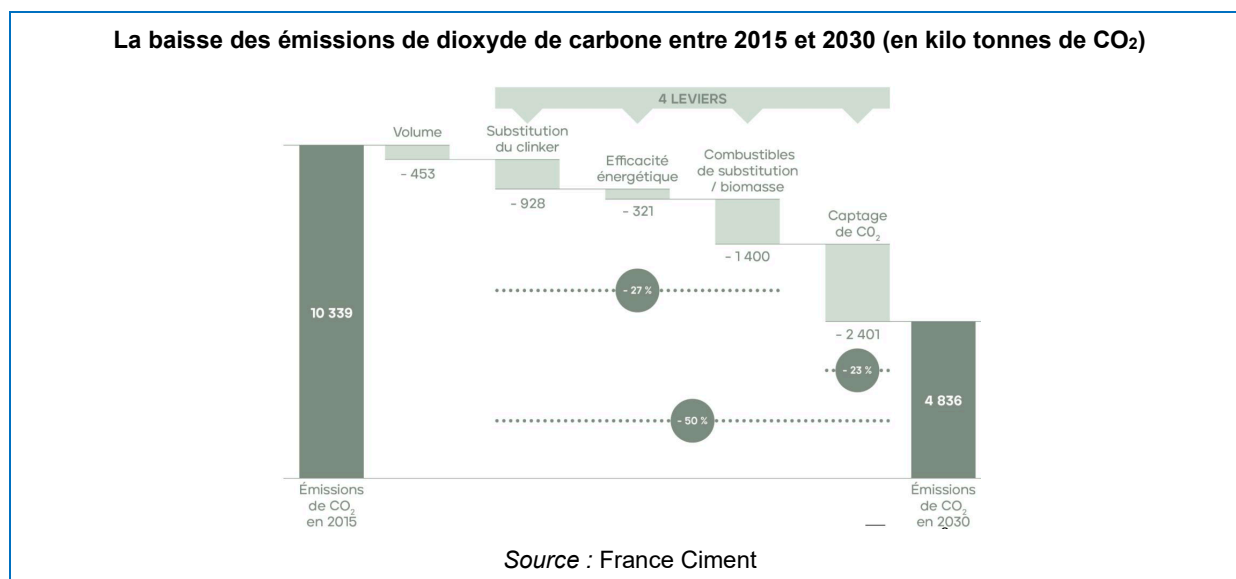
Le groupe de travail constate qu'émerge progressivement une politique publique en faveur du déploiement du CCUS dont les objectifs se clarifient (1) et le cadre réglementaire se précise (2).

1.2.2.1. Des objectifs clarifiés

a) La principale raison d'être du stockage de dioxyde de carbone est de contribuer à la SNBC⁵⁷, en particulier à la décarbonation de l'**industrie**.

Dans le cadre des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par les réglementations européenne et nationale pour atteindre la neutralité carbone en 2050, tous les **leviers** de décarbonation disponibles doivent, en effet, être employés, tels que la sobriété et l'efficacité énergétiques, les changements d'usages ou leur électrification et le développement des sources renouvelables d'énergie notamment.

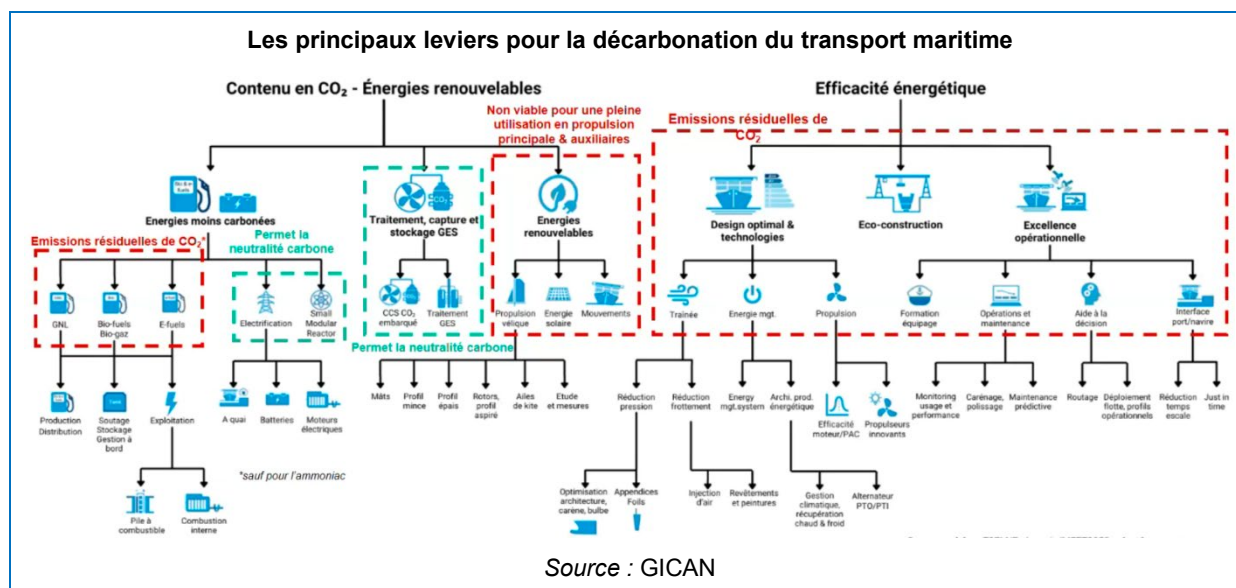
Le CCUS figure, de longue date, parmi ces différents leviers mais y tient une place **modeste** par rapport à d'autres, comme l'illustre, par exemple, la feuille de route de décarbonation de l'industrie cimentière⁵⁸.



De même, dans le secteur du transport maritime, le CCUS concerne les émissions résiduelles qu'il est nécessaire de capter pour atteindre la neutralité carbone.

⁵⁷ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.

⁵⁸ Source : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/publication-contrats-transition-ecologique-50-sites-industriels>.



À la faveur du consensus plus favorable dont le CCUS bénéficie, cette technologie est dorénavant regardée comme constituant un levier **indispensable** pour réduire les émissions de GES difficiles à abattre et atteindre la neutralité carbone, ce que rappelle notamment le rapport d'étape de l'AIE publié en 2023⁵⁹ et la communication de la Commission européenne de 2024⁶⁰. En effet, le CCUS constitue parfois le dernier levier de décarbonation activable pour certains secteurs industriels particulièrement difficiles à décarboner, comme illustré par le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière réalisé par l'Ademe avec la filière⁶¹.

Les contrats de transition écologique conclus entre les 50 sites industriels les plus émetteurs, qui représentent 50 millions de tonnes de dioxyde de carbone soit la moitié des émissions industrielles et 10 % des émissions de la France, et le ministère en charge de l'industrie en 2023 comportent des objectifs liés au développement du CCUS⁶².

b) À ce premier objectif, s'ajoute la contribution utile qu'est susceptible d'apporter l'essor de la filière du CCUS à la **réindustrialisation** de la France, comme au renforcement de sa **compétitivité** internationale. Le déploiement des chaînes de CCUS débouchera sur la création de nouveaux services et de nouvelles expertises tout en favorisant une meilleure compétitivité dans un contexte de durcissement de la réglementation du marché ETS.

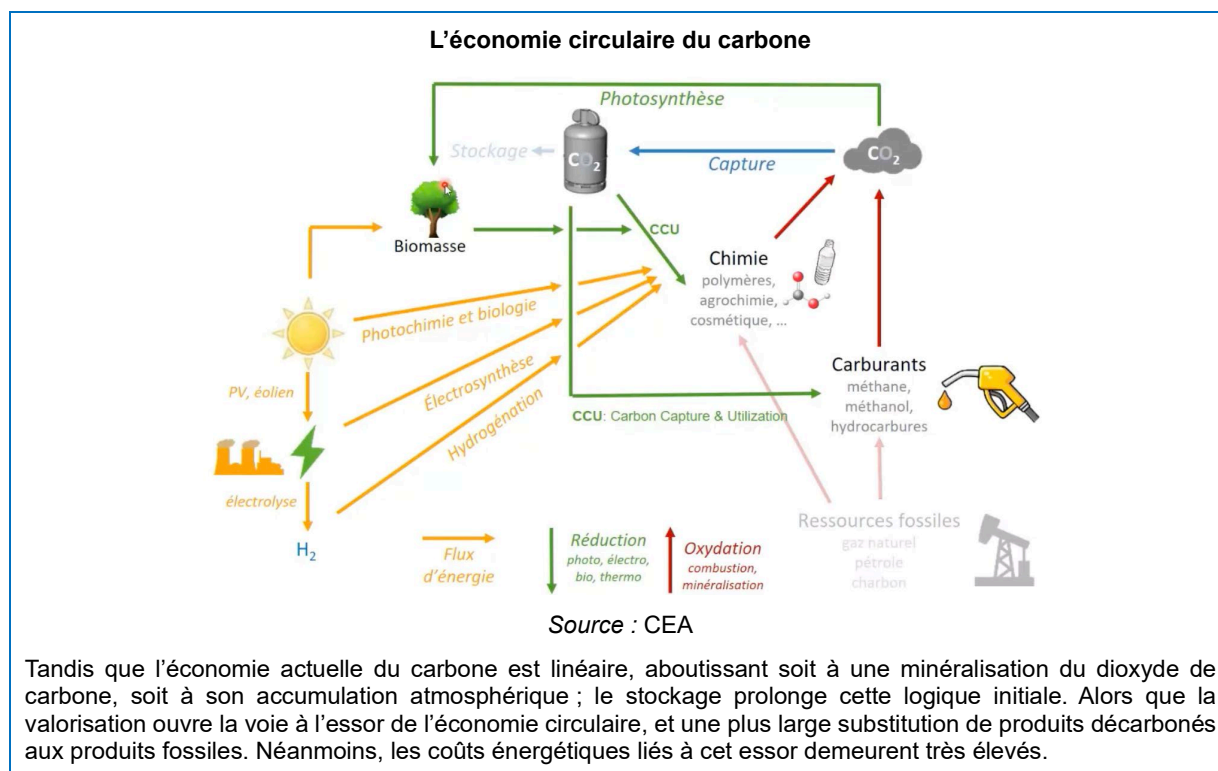
c) En outre, la branche de valorisation du carbone peut participer du développement de nouvelles filières, comme les carburants de synthèse (cf. *supra* point 1.1.1), voire, le cas échéant, de l'émergence d'une **économie circulaire**.

⁵⁹ Source : <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach#overview>.

⁶⁰ Commission européenne, Communication au Parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, *Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'Union européenne*, 6 février 2024, préc.

⁶¹ Source : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5041-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-cimentiere-en-france.html>

⁶² Source : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/publication-contrats-transition-ecologique-50-sites-industriels>.



d) Le groupe de travail considère néanmoins que le recours au CCUS pour atteindre les objectifs poursuivis est subordonné à plusieurs **réserves**.

▫ Dans son rapport de 2022, le GIEC a précisé que le CCUS ne constitue une solution de décarbonation valable qu'une fois épuisées toutes les autres⁶³, ce qui tendrait à considérer que si le CCUS constitue un levier essentiel, il devrait demeurer **subsidaire** par rapport à d'autres solutions disponibles. Cependant, il ne semble pas pertinent de recommander à ce stade une forme de *merit order* en faveur de certaines technologies de décarbonations au détriment des autres.

▫ De même et corrélativement, le **stockage** ne saurait, sauf à de rares exceptions, constituer autre chose qu'une solution **transitoire** de décarbonation, dans la mesure où les capacités de stockage, comme les émissions de GES, ne sont pas infinies.

À titre d'illustration, les capacités de stockage en Mer du Nord n'excèderaient pas quatre décennies d'émissions⁶⁴.

▫ La **valorisation** du carbone suppose, quant à elle, d'adopter une approche systémique et d'analyser le cycle de vie du carbone en vue de déterminer la pertinence de cette solution de substitution par rapport à d'autres, notamment du point de vue des coûts énergétiques nécessaires⁶⁵.

En tout état de cause, le développement d'une politique publique en faveur du déploiement du CCUS serait favorisé par un cadre réglementaire plus favorable.

⁶³ Source : GIEC, *Changement climatique 2022 : atténuation du changement climatique*, préc.

« Des émissions nettes de CO₂ nulles dans le secteur industriel sont possibles mais difficiles à atteindre (confiance élevée). L'efficacité énergétique restera importante. La réduction de la demande de matériaux, l'efficacité des matériaux et les solutions d'économie circulaire peuvent réduire le besoin de production primaire. Les options de production primaire comprennent le passage à de nouveaux procédés qui utilisent des vecteurs énergétiques et des matières premières à émissions de GES faibles à nulles (par exemple, l'électricité, l'hydrogène, les biocarburants et le piégeage et l'utilisation du dioxyde de carbone (PUC) pour fournir des matières premières à base de carbone). Le captage et le stockage du carbone (CSC) seront nécessaires pour atténuer les émissions de CO₂ restantes {11.3} ».

⁶⁴ Source : *Europe's gap between carbon storage development and capture demand*, janvier 2022, disponible sur le site Internet de la [Clean Air Task Force](#).

⁶⁵ La valorisation du dioxyde de carbone n'a pas été étudiée dans le présent rapport et pourrait être approfondie par la suite.

1.2.2.2. Un cadre réglementaire plus favorable

Alors que la directive européenne de 2009 est longtemps restée une base légale isolée pour le stockage géologique du dioxyde de carbone⁶⁶, l'adoption de plusieurs réglementations sectorielles par l'Union européenne et la définition par la Commission européenne d'une stratégie industrielle du carbone pour 2030 puis 2050⁶⁷ concourent à la détermination d'un cadre réglementaire propice au développement des chaînes de CCUS.

Au plan sectoriel, la directive européenne du 18 octobre 2023, relative au développement des énergies renouvelables, dite *RED III*, fixe un objectif d'incorporation de combustibles renouvelables RFNBO à hauteur de 1 % dans le secteur des transports⁶⁸, notamment aérien, de manière à encourager l'utilisation de ces produits et les investissements nécessaires à leur développement.

Plus largement, il ressort de l'exposé des motifs de la proposition de règlement européen NZIA⁶⁹, examinée dans le prolongement de la communication de la Commission européenne du 6 février 2024 (cf. *supra* point 1.2.1), que l'Union européenne entend faciliter et rendre possibles les projets de captage et de stockage du carbone, y compris en accroissant la disponibilité de sites de stockage. Le futur règlement assignera, à cet effet, un objectif de 50 millions de tonnes de capacité opérationnelle annuelle d'injection de dioxyde de carbone d'ici à 2030 à l'échelle de l'Union, de sorte à permettre aux secteurs concernés de coordonner leurs investissements en faveur d'une chaîne de valeur de CCUS que les industries pourront alors utiliser pour décarboner leurs activités.

Néanmoins, le groupe de travail estime que la France doit, sans attendre l'adoption à venir de ce nouveau cadre réglementaire européen, déterminer son propre cadre national, afin de ne pas retarder la mise en œuvre en temps utile des projets de chaîne de CCUS, ce qui implique notamment de relever le défi de leur acceptation sociale.

1.3. Une acceptation sociale à conquérir

À titre liminaire, il convient de rappeler qu'en sciences sociales, la notion d'**acceptabilité sociale** est à géométrie variable. Elle désigne, *a minima*, la relation qui doit se nouer avec les populations locales pour faire en sorte qu'un projet puisse être territorialement accepté. Elle renvoie également au volet « *non-technique* » d'un projet dont il doit être tenu compte pour sa réalisation, qu'il s'agisse de ses implications institutionnelles ou de ses incidences économiques et/ou sociales. Rapportée à une nouvelle technologie, telle que le CCUS, elle signifie la « *rentrée en société* » de celle-ci.

Dans ce cadre, l'acceptation par le public de la mise en place de chaînes de CCUS sur certaines parties du territoire national constitue un enjeu central pour le développement de la filière comme pour la réussite des projets industriels qui lui sont liés.

En la matière, l'acceptabilité du CCUS doit répondre à plusieurs défis spécifiques (1) et satisfaire, pour être acquise, à certains déterminants (2).

1.3.1. Les défis de l'acceptabilité du CCUS

L'acceptabilité sociale du CCUS doit répondre à plusieurs défis, dont il convient de prendre la mesure en vue de prévenir les éventuels risques de blocage lors de la réalisation du projet. Il s'agit principalement de combler le déficit de connaissance de la filière et de ses technologies et de surmonter la perception négative préalable à son égard. En outre, si le stockage géologique du dioxyde de carbone est *a priori* la partie de la chaîne qui est principalement concernée, son captage peut également l'être, dans certaines configurations.

⁶⁶ Directive n° 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, préc.

⁶⁷ Commission européenne, *Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'Union européenne*, 6 février 2024, préc.

⁶⁸ Directive n° 2023/2413/ UE du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil, art. 25, disponible sur eur-lex.europa.eu.

⁶⁹ Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie « *zéro net* », préc.

Selon plusieurs études⁷⁰, le CCUS présente la particularité d'être une **technologie confinée**. Comme il a été rappelé par le groupe de travail au point 1.2.1, elle a connu des phases d'engouement et d'oubli qui ont limité sa diffusion auprès du grand public.

En outre, il convient également de relever qu'elle a peiné à trouver sa place comme technologie de transition jusqu'à encore récemment, comme il a été relevé par le groupe de travail au même point.

Il en découle que l'acceptabilité du CCUS n'est pas uniquement liée aux rapports avec les populations localement concernées, mais plus largement à sa meilleure connaissance par le public au niveau **national**.

De surcroît, parce qu'elle porte sur le dioxyde de carbone, le principe même du recours à cette technologie peut être sujet à débats dans la mesure où elle concerne le traitement d'un gaz à effet de serre, perçu comme un déchet par une partie du grand public, ce qui colore négativement la question de la **légitimité** de la technologie.

Corrélativement, la légitimité du CCUS en tant que technologie au service de la lutte pour le **climat**, peut également être discutée compte tenu de ce que, dans le cas du stockage, le dioxyde de carbone ne sera pas véritablement éliminé, mais seulement confiné.

L'impression adverse qui se dégage est, par ailleurs, entretenue par l'absence de tenue d'un débat public d'ampleur nationale autour de la transition énergétique incluant cette technologie.

À ces défis s'ajoutent ceux que peuvent connaître d'autres technologies, telles que le stockage en couche d'argile des déchets radioactifs les plus dangereux.

La gestion des **risques** liés au stockage géologique de long terme du dioxyde de carbone pour les sols et les populations, notamment en cas de fuite et/ou d'événements naturels mais aussi les **incertitudes** sur la réglementation applicable et sur le modèle économique à retenir pour les chaînes de CCUS constituent autant de défis pour la filière qui rendent plus difficile l'acceptation sociale des projets.

Pour relever tous ces défis, l'acceptabilité sociale des projets de CCUS doit répondre à plusieurs déterminants.

1.3.2. Les déterminants de l'acceptabilité sociale des projets

Il ressort de plusieurs expériences, notamment celle du projet Pycasso à Lacq (*cf. infra* point 2.1.1) qui a suscité des contestations dont la presse a pu se faire l'écho⁷¹, que l'acceptabilité sociale du CCUS et les difficultés pour l'obtenir ne doivent pas être sous-estimées. Cette acceptabilité repose sur plusieurs déterminants, tant au plan national que local.

a) En premier lieu, ainsi qu'il vient d'être souligné, l'acceptabilité sociale du CCUS est liée à l'existence d'une feuille de route et à un **cadrage** institutionnel préalables, de manière à favoriser l'établissement et la conduite d'un dialogue avec le territoire d'accueil du projet. La dimension nationale conférée à la politique du CCUS est un élément susceptible d'y contribuer par sa force symbolique.

b) En deuxième lieu, l'acceptabilité sociale est déterminée par la forte implication des parties prenantes sur le **territoire**, qu'il s'agisse des élus locaux comme nationaux, des acteurs économiques et de la population, ce d'autant que le stockage géologique de matériaux engage *a priori* plusieurs générations.

De ce point de vue, la prise en compte des spécificités du territoire d'accueil, à travers son histoire, sa culture, son économie et ses traditions constitue un élément-clé pour nouer et maintenir, tout au long du projet, un lien de proximité avec le public et ainsi faciliter un dialogue continu.

Pour répondre à ce double enjeu, il est possible d'objectiver une partie du débat, notamment le **service rendu** par le projet, en recourant à une évaluation socio-économique intergénérationnelle, à laquelle

⁷⁰ Source : notamment, S. Chailleux et X. Arnauld de Sartre, « L'acceptabilité au prisme du stockage géologique de CO₂ : retour sur un débat non émergé », Natures Sciences Sociétés 2021, n° 29, pp. 12-24, également disponible sur le site Internet de la HAL ([hal-03460725](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03460725)).

⁷¹ Voir les articles de presse publiés dans la [République des Pyrénées](#) et [Alternatives économiques](#) en 2023 et 2024.

s'est par exemple livrée l'ANDRA dans le cadre du projet Cigéo⁷², le cas échéant assortie d'une contre-expertise menée par un organisme indépendant⁷³.

c) En troisième lieu, le **dialogue** à mener dépend d'un ensemble de leviers auxquels il est utile d'avoir recours pour parvenir à l'acceptation des projets sur le territoire d'accueil.

Les leviers d'action en matière de dialogue

L'organisation d'un dialogue en vue de favoriser l'acceptabilité sociale du CCUS repose sur cinq leviers. Le premier consiste à **communiquer** autour du projet de différentes manières en vue de créer de l'intérêt et d'assurer sa visibilité (réseaux sociaux, visites, expositions, supports pédagogiques, articles de presse, etc.). Le deuxième levier revient à **informer** et à **expliquer**, c'est-à-dire à accueillir des questions, des interrogations, mais aussi des contestations. Dans les territoires où il n'existe pas d'antériorité sur les aspects industriels et scientifiques de ce type de projet, il devient alors nécessaire de développer des efforts supplémentaires et des moyens adaptés à l'émergence des questions et/ou à l'expression des inquiétudes pour qu'un réel débat puisse se tenir. Le troisième renvoie à la **participation** à la vie des territoires et correspond à des informations et des actions en faveur du développement économique du territoire. Le quatrième consiste à mener un **dialogue** aussi large que possible en essayant d'inclure l'ensemble des catégories socioprofessionnelles afin de prévenir le risque de ne voir s'exprimer que les positions radicales et éviter, ce faisant, de biaiser l'exercice. Le dernier correspond à la **concertation** qui donne l'occasion de mettre en débat le principe même du projet, ses alternatives et ses caractéristiques, même si la prise de décision n'en dépend pas nécessairement. Elle doit couvrir une durée suffisante et peut être renforcée par la désignation de garants afin de répondre aux enjeux de co-construction du projet avec le territoire.

En toute hypothèse, ce dialogue doit se nouer, en ce qui concerne le stockage, dès la phase d'exploration, afin de créer un cercle vertueux du point de vue de l'acceptabilité sociale des projets.

Le groupe de travail constate la nécessité d'un débat public national sur le CCUS, ses technologies et sa place dans la transition vers la neutralité carbone pour permettre une meilleure acceptabilité des projets localement, mais aussi pour améliorer la connaissance de la chaîne de valeur, laquelle constitue également un enjeu de sa régulation.

*

Le groupe de travail constate que le CCUS doit répondre à de multiples enjeux d'ordre technique, économique et social, mais qu'il bénéficie d'un cadre plus favorable à son développement avec le renforcement des objectifs de réduction des émissions de GES. Néanmoins, la mise en place d'une régulation à cette fin suppose de mieux cerner la chaîne de valeur de CCUS.

⁷² Source : <https://www.cigeo.gouv.fr>.

⁷³ Source : la note de synthèse de l'évaluation socio-économique du projet, disponible sur le site Internet https://www.andra.fr/sites/default/files/2021-03/Andra-Note_synthese_ESE.pdf.

2. Mieux cerner la chaîne de valeur de CCUS pour mieux la réguler

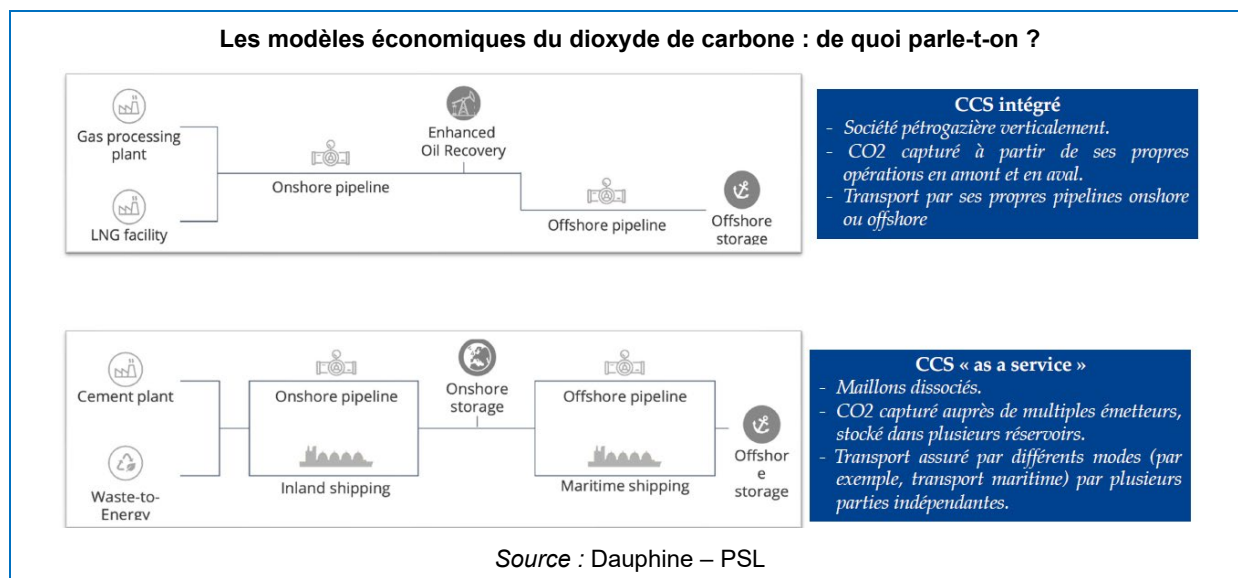
À titre liminaire, il convient de rappeler que les modèles économiques pour le CCUS ont évolué dans leur conception et que le développement de la filière reste tributaire des performances de la chaîne de valeur.

Historiquement, les premiers modèles ont fait l'objet d'une approche plutôt **linéaire** et **intégrée**, le captage, le transport et le stockage du dioxyde de carbone étant pris en charge par un seul opérateur.

Ce modèle présentait certains avantages et a pu contribuer au déploiement des premiers projets de CCUS dans le monde, comme le souligne l'AIE. Seulement, ces modèles présentent aussi des risques et des inconvénients, en particulier la nécessité pour leur développeur de détenir l'expertise sur l'ensemble de la chaîne et l'obligation pour lui d'assumer des coûts d'investissement élevés.

Dans la période récente, d'autres modèles se concentrent plutôt sur un ou plusieurs maillons de la chaîne de valeur qui sont pris en charge par des entités spécialisées, qu'il s'agisse d'entreprises pétrolières et/ou gazières ou de nouveaux acteurs, le plus souvent en établissant des collaborations en vue de développer de larges réseaux de CCUS. La chaîne de CCUS est alors conçue comme un ensemble de **services**.

Ces modèles permettent une plus grande **flexibilité** et de déplacer l'expertise d'un projet à l'autre. Ils facilitent la réduction à la fois des délais de réalisation d'un nouveau projet lorsque certaines infrastructures existent déjà et des coûts du fait de l'existence d'un marché plus spécialisé qui pousse davantage à la concurrence et à l'innovation entre les acteurs, mais aussi à travers le partage des coûts d'infrastructures. Enfin, ils facilitent l'accès aux infrastructures pour des émetteurs de plus petite taille et/ou plus dispersés.



Néanmoins, cette évolution induit une **complexification** de l'organisation et du fonctionnement de la chaîne de CCUS qui débouche sur une physionomie à géométrie variable (1).

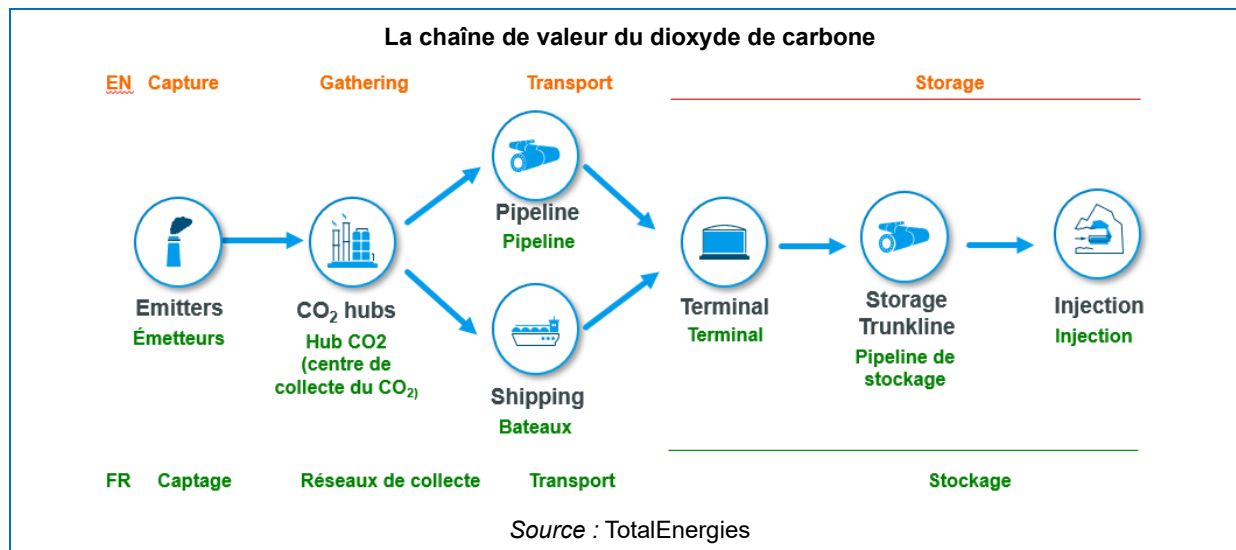
En toute hypothèse, l'**effectivité** de la chaîne de CCUS demeure soumise à de nombreuses **conditions**, dont la satisfaction constitue un enjeu essentiel pour le développement de la filière, qu'il s'agisse de concilier les contraintes des différents acteurs, de coordonner leurs actions, de répartir entre eux les différents risques ou de maîtriser les CAPEX et les OPEX (2).

2.1. Une physionomie à géométrie variable

La constitution de la chaîne de CCUS implique l'intervention d'acteurs divers, dont les risques et les coûts doivent se concilier, et la succession de plusieurs étapes, ce qui complexifie son appréhension. La chaîne est, par conséquent, susceptible de revêtir plusieurs formes. En outre, son déploiement est un processus nécessairement évolutif.

2.1.1. La diversité des acteurs de la chaîne

Le développement d'un modèle de chaîne de valeur de CCUS, conçue comme un ensemble de **services**, conduit à prendre la mesure de la diversité des acteurs économiques qui y participent.



a) Le **captage** du carbone est effectué, pour l'essentiel, à partir de sources industrielles en Europe. Le captage peut être réalisé par les émetteurs eux-mêmes au sein d'un bassin industriel ou par d'autres opérateurs spécialisés qui peuvent en assurer par ailleurs le transport vers un centre de collecte (*hub*). Ce dernier peut jouer un rôle d'accélérateur du déploiement de la chaîne de CCUS.

Techniquement, il s'agit d'adapter les technologies existantes à ces sources qui, en général, émettent de plus grandes quantités de dioxyde de carbone, et de démultiplier les capacités des unités existantes. Un premier traitement du carbone peut y être appliqué, qu'il s'agisse d'une purification et/ou d'une liquéfaction.

Le projet de captage de dioxyde de carbone « K6 »

Dans le cadre de ce projet développé à Lumbres dans les Hauts-de-France, proche du port de Dunkerque, un programme d'innovation technologique et de transformation d'une usine existante, qui produit 800 000 tonnes de ciment par an, est mené par les sociétés Air Liquide et EQIOM, en lien avec le projet d'intérêt commun (PCI) de l'Union européenne⁷⁴ D'Artagnan qui porte sur la partie transport.

Le projet consiste à installer une nouvelle ligne de production avec une meilleure efficacité énergétique et à remplacer les combustibles fossiles par des énergies renouvelables, puis à capter les émissions résiduelles incompressibles.



Source : Equiom

⁷⁴ Source : <https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/projects-common-interest-and-projects-mutual-interest/key-cross-border-infrastructure-projects>.

Un four à oxy-combustion⁷⁵ sera installé dans la cimenterie (le chantier du nouveau four a démarré en mai 2024), en s'appuyant sur la technologie CryocapTM Oxy, pour capter puis liquéfier les émissions de dioxyde de carbone. Cette technologie consiste à retirer les impuretés du gaz, après avoir préalablement procédé au retrait de l'azote, en réalisant une compression des fumées de l'ordre de 80 à 90 %, une liquéfaction, une distillation ce qui permet ensuite la distribution du gaz, directement sous pression, au moyen d'une canalisation super critique ou son transport par bateau en vue de son stockage, voire son utilisation dans des matériaux de construction.

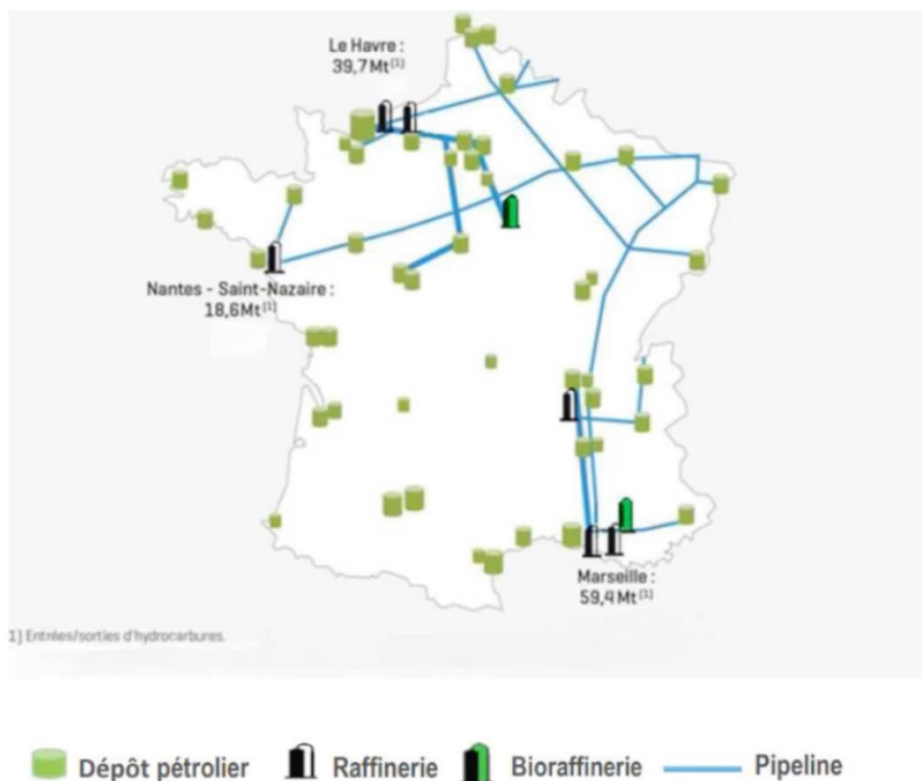
b) Le transport est effectué par voie terrestre (canalisations, transports routier ou ferroviaire) et/ou maritime (canalisations, transport maritime) par un opérateur spécialisé ou intégré selon les cas, qui se chargera le plus souvent de l'interconnexion avec la collecte du carbone.

Le nombre d'utilisateurs (industriels, gestionnaires de logistique aval) est limité à ce stade du développement des chaînes de valeur de CCUS.

Le maillon du transport est lui-même susceptible de comporter plusieurs étapes, dont chacune peut être opérée par un seul et même acteur ou des acteurs distincts.

Un premier transport (barge, navire, canalisation, train) amène le dioxyde de carbone capté à un centre de collecte qui va permettre d'appliquer des spécifications techniques en vue d'un deuxième transport. Pour l'assurer, il est, par exemple, envisagé de s'appuyer sur des infrastructures de transport des hydrocarbures existantes qui seraient reconverties.

Le transport des hydrocarbures en France



Source : UFIP avec les données CPDP, 2020

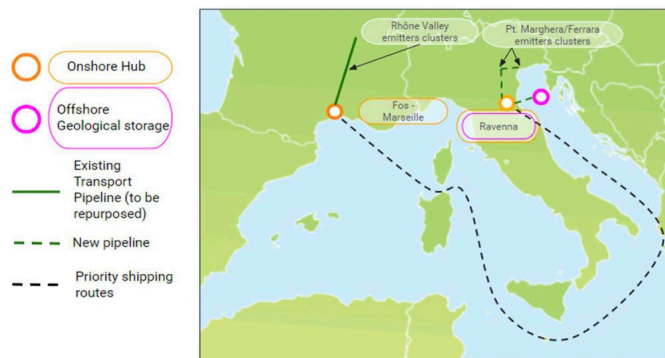
Quant au centre de collecte, il peut s'agir, par exemple, d'infrastructures portuaires, telles que des terminaux méthaniers ou GNL en exploitation, dans la mesure où celles-ci permettent d'opérer des synergies entre activités, notamment en matière de froid et de liquéfaction ; et de créer des interconnexions dans le cheminement du dioxyde de carbone vers le lieu de son stockage permanent ou de sa valorisation.

⁷⁵ L'oxy-combustion consiste à remplacer l'air dans le four de la cimenterie par de l'oxygène pur, afin d'augmenter son efficacité et de concentrer le CO₂ dans les fumées et faciliter son captage.

Une nouvelle étape de transport, souvent à plus longue distance et **transfrontalière**, par canalisation ou par navire, achemine alors le dioxyde de carbone vers l'infrastructure de stockage.

Le projet de transport longue-distance de dioxyde de carbone « Callisto »

Le projet *Carbon Liquefaction and STORage*, coordonné par Air Liquide, vise à créer un écosystème du CCUS avec des centres de collecte en accès libre en Méditerranée. Dans ce cadre, le dioxyde de carbone serait acheminé au moyen de canalisations longue-distance (environ 1 300 km.), exploitées notamment par la Société du Pipeline Sud-Européen (SPSE), spécialisée dans le transport d'hydrocarbure liquide, vers le site portuaire de Fos – Marseille.



Le dioxyde de carbone y sera liquéfié pour être ensuite transporté vers une zone de stockage située en mer Méditerranée.

Ce transport transfrontalier est **encadré** au plan international par le Protocole de Londres et au niveau européen par la directive de 2009.

Le Protocole de Londres

La convention du 29 décembre 1972, sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières⁷⁶, dite convention de Londres, signée dans le cadre de l'Organisation maritime internationale (OMI), ratifiée par la France le 17 mai 1974, puis entrée en vigueur à compter de 1975, vise à protéger le milieu marin contre les activités humaines en encourageant un contrôle effectif de toutes les sources de pollution des mers et la mise en place des mesures nécessaires pour prévenir la pollution résultant de l'immersion de déchets.

Le protocole de Londres, conclu le 7 novembre 1996 et ratifié par la France le 3 avril 2006, ne se contente pas de compléter ou d'amender à la marge la convention de 1972, mais en inverse la logique en interdisant toute immersion de déchets, sauf exception, parmi lesquelles figurent les formations géologiques sous-marines.

Un amendement de 2006 est ensuite venu ajouter la séquestration de dioxyde de carbone dans ces formations géologiques, puis un amendement de 2009 à l'article 6 du protocole a créé une exception à l'interdiction d'exportation de déchets ou autres matières aux fins d'immersion ou d'incinération en mer pour l'exportation des flux de dioxyde de carbone d'un État vers un autre État aux fins de séquestration, dans les formations géologiques du sous-sol marin, par ce dernier. Ce que la France tarde à ratifier. Cet amendement autorise l'exportation sous réserve qu'un accord ou arrangement ait été conclu par les pays intéressés. La France a lancé le processus de ratification de cet amendement ; mais a aussi signé deux accords bilatéraux avec le Danemark et la Norvège en 2024.

La directive européenne du 23 avril 2009 établit, quant à elle, un cadre juridique européen pour le transport, y compris transfrontalier, et le stockage géologique du dioxyde de carbone au sein des États membres de l'Union européenne⁷⁷, qui est également applicable dans l'espace économique européen (EEE) et concerne donc la Norvège. La Commission européenne estime que ce cadre est compatible avec les exigences du Protocole de Londres et que le transport transfrontalier entre deux États membres de l'Union européenne ne requiert pas d'accord bilatéral dans le champ couvert par la directive de 2009⁷⁸.

⁷⁶ Source : Disponible sur le site Internet de l'[OMI](https://www.imo.org/).

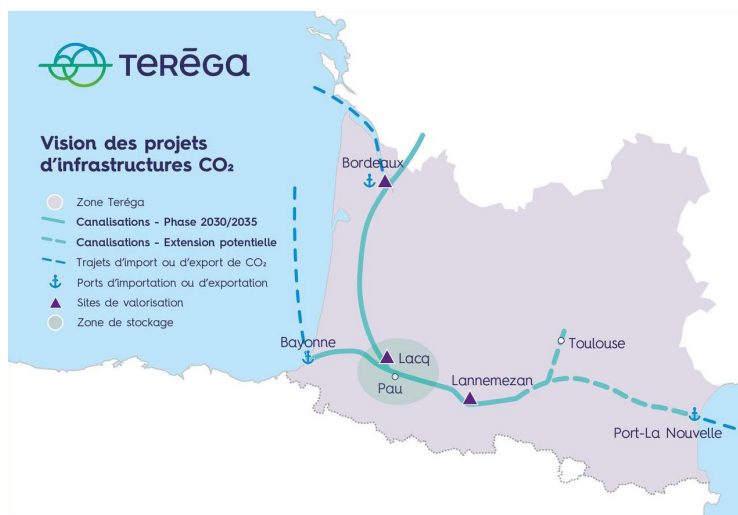
⁷⁷ Directive n° 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative au stockage géologique du dioxyde de carbone, préc., article 24.

⁷⁸ Document d'analyse du 30 septembre 2022, p. 7, disponible sur climate.ec.europa.eu.

c) Le **stockage** permanent est enfin assumé par un dernier opérateur qui, à partir d'un terminal, le cas échéant au moyen de canalisations, prend en charge le dioxyde de carbone pour l'injecter dans un puits, lequel peut être souterrain ou sous-marin (aquifères salins ; champs déplétés), situé en France, dans un État voisin, voire plus loin à l'étranger, notamment en Mer du Nord ou en Méditerranée.

Le projet de stockage souterrain de dioxyde de carbone dans le Grand Sud-Ouest

Ce projet d'initiative publique a été lancé en 2021, sous l'impulsion de l'agglomération de Pau, par un consortium entre les entreprises Teréga, Repsol et le groupe Lafarge. Il s'agit de collecter les émissions d'une vingtaine d'industriels situés dans un rayon de 200 km autour des réservoirs déplétés du Piémont pyrénéen.



Source : Teréga

La capacité de stockage du site projetée est supérieure à 500 millions de tonnes de dioxyde de carbone, selon un rythme d'injection pouvant aller jusqu'à 6 millions de tonnes par an à partir de 2035.

Le groupe de travail constate que la multiplication des maillons comme des différents acteurs intervenant sur eux n'est pas sans incidence sur la conception de la chaîne de CCUS, sur son modèle économique et sur son déploiement.

2.1.2. La structuration complexe de la chaîne

Il existe une grande variabilité des configurations envisageables de la chaîne de CCUS, de sorte que sa structuration peut s'avérer complexe. Cette complexité est susceptible de se manifester de plusieurs manières.

a) La physionomie de la chaîne de CCUS est largement tributaire de la **configuration géographique** dans laquelle elle est susceptible d'être mise en place.

Elle peut être façonnée et conçue à l'échelle d'un seul et même territoire, comme l'illustre le projet dans le Grand Sud-Ouest évoqué au point 2.1.1. Mais elle sera, assez fréquemment, envisagée à une échelle nationale voire transnationale, comme le montrent les projets *Callisto* et *D'Artagnan* abordés au même point, pour des raisons qui tiennent à des considérations d'ordre physique, économique ou technique, telles que la configuration des lieux, l'absence de solution de stockage disponible à l'échelon pertinent ou encore le regroupement ou, à l'inverse, le nombre insuffisant d'émetteurs à la maille locale.

Selon l'industrie pétrogazière, cinq projets **transfrontaliers** impliquant la France bénéficient, au niveau européen, du statut de PIC de l'Union européenne en 2023.

Les projets de dioxyde de carbone bénéficiant du statut de PIC de l'Union européenne

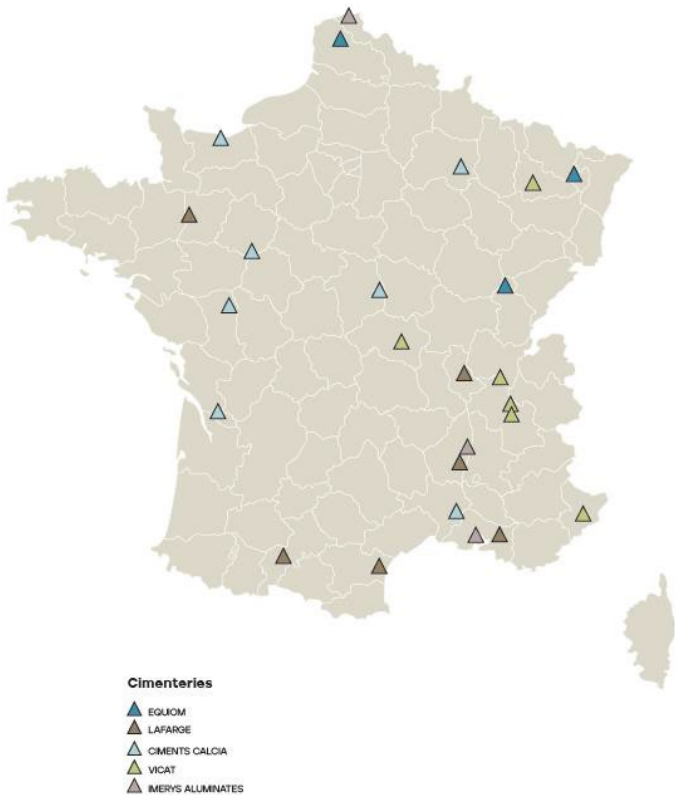
	Projects with PCI Status announced at the 3rd CCUS Forum	Project related to France	Segments of the CCS Value Chain covered
1	Aramis	NO	Transport / Storage
2	Bifrost	NO	Transport / Storage
3	Callisto	YES (FR/IT)	Transport
4	CCS Baltic Consortium	NO	Transport
5	CO2TransPorts	NO	Transport
6	Delta Rhine Corridor	NO	Transport
7	ECO2CEE	NO	Transport
8	EU2NSEA	YES (BE/FR/GER/NO/DK/LV/NL/PL/SE)	Transport
9	Geothermal CCS	NO	Capture / Transport / Storage
10	Nautilus	YES (NO/FR/GER)	Transport
11	NERN Lights 2 (N Lites)	YES (UK/IRL/BE/NL/FR/SE)	Transport / Storage
12	Norne	NO	Storage
13	Prinos	NO	Transport / Storage
14	Pycasso	YES (FR/ES), ONSHORE	Capture / Transport / Storage

Source : IOGP

Comme le relève en outre l'AIE, certains secteurs sont très concentrés dans des bassins industriels (chimie, pétrochimie) avec un accès direct à des infrastructures, tandis que d'autres peuvent être beaucoup plus dispersés et à plus petite échelle (cimenteries, incinérateurs, producteurs de carburants).

Selon France Ciment, les sites de son secteur sont situés près des carrières et donc souvent enclavés et assez éloignés les uns des autres, contrairement à d'autres industries (acier, chimie), ce qui rend plus critique l'accès à une infrastructure de transport.

Des cimenteries réparties sur l'ensemble du territoire



Source : France Ciment

La planification du réseau de transport doit donc prendre en compte la géographie et les différents besoins des émetteurs.

Au niveau de l'Union européenne, la plupart des centres de stockage sont, à l'heure actuelle, en développement autour de la Mer du Nord, dans des gisements de pétrole ou gaz déplétés, bien que seulement 15 % des émissions soient à moins de 100 km des ports de cette mer (*cf. supra* point 1.1.1).

Il en découle la nécessité de construire une infrastructure à l'intérieur du territoire, de sorte à pouvoir raccorder les émetteurs plus dispersés ; ainsi que, réciproquement, des interconnexions, y compris transfrontalières, en vue de faciliter l'acheminement du dioxyde de carbone collecté vers les plus grands centres.

Le groupe de travail considère que la prise en compte de l'**échelon pertinent** est déterminante pour concevoir la chaîne la mieux adaptée à la réalité opérationnelle des projets et aux besoins des émetteurs.

b) La structuration de la chaîne de CCUS crée ensuite une **interdépendance**, d'une part, entre les acteurs qui interviennent à différents titres et, d'autre part, toutes les infrastructures qui lui sont dédiées.

À l'heure actuelle, le développement d'un autre modèle de chaîne, conçu comme un ensemble de services, avec une multiplication d'acteurs spécialisés, qui interviennent parfois sur le même maillon, opérant sur la chaîne présente certaines difficultés opératoires. Il pose l'enjeu de la coordination qui, faute d'être traité, risque de provoquer des retards, voire des ruptures, tant dans sa mise en place que dans l'acheminement du dioxyde de carbone entre le lieu de son captage et celui de son stockage permanent.

2.1.3. Les coûts et les risques associés à la chaîne

La mise en place d'une chaîne de CCUS implique de prendre en considération les besoins, les coûts et les risques de chacun de ses acteurs. Ceux-ci peuvent différer selon le maillon de la chaîne considéré. Mais ils doivent être correctement maîtrisés et répartis de manière équilibrée pour assurer la viabilité économique de l'ensemble.

a) Le groupe de travail constate, en premier lieu que la structuration de la chaîne de CCUS a une incidence directe sur les coûts pour ses acteurs.

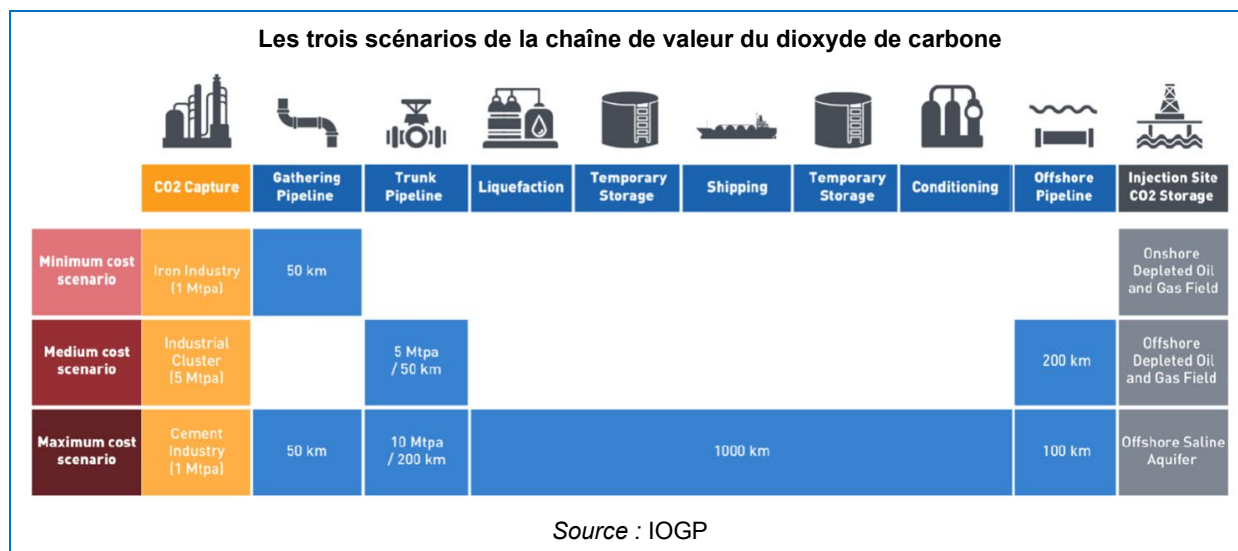
De manière générale, le **stockage à terre** entraîne des coûts inférieurs au **stockage au large des côtes** de l'ordre de 1 à 4 ou 5. Il permet, en effet, d'éviter certains coûts, comme ceux liés à la liquéfaction, qui sont de quelques dizaines d'euros par tonne de dioxyde de carbone (en variant de 30 à 50 euros selon la dimension des installations de *terminaling*, incluant le stockage temporaire), et la multiplication des étapes de transport, notamment maritime, et d'accéder à moindre coût à des solutions de stockage.

Le niveau indicatif des coûts de transport et de stockage
Transport and storage costs – Indicative (capture not including)

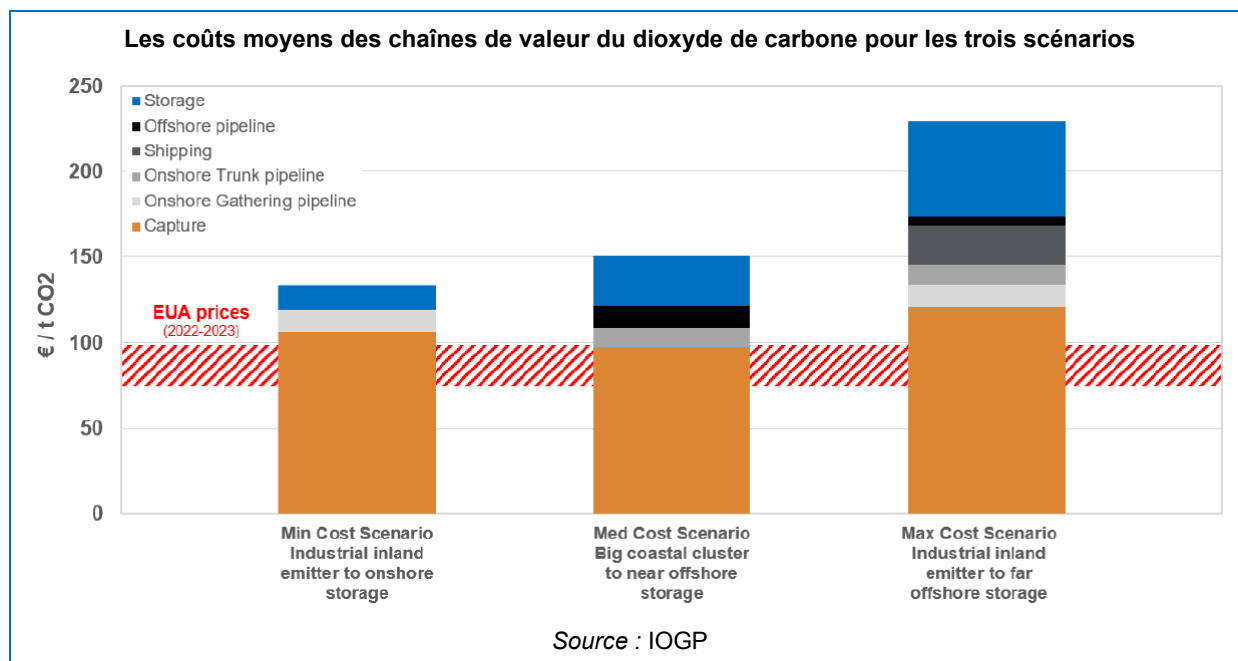


Source : ArcelorMittal

En outre, plus la chaîne est complexe, plus elle est susceptible d'entraîner une augmentation des coûts. Différents scénarios peuvent ainsi être considérés : 1. un stockage à terre d'un million de tonnes de dioxyde de carbone pour une industrie de fer avec 50 km de transport par canalisations (*Minimum cost scenario*) ; 2. un stockage de 50 millions de tonnes pour une zone industrielle située à 50 km avec un transport *off-shore* par canalisations (*Medium cost scenario*) ; 3. un stockage au large des côtes de 15 millions de tonnes pour une industrie cimentière enclavée avec 50 km de canalisations, puis un transport maritime (*Maximum cost scenario*).



Selon la chaîne de valeur de CCUS considérée, les coûts peuvent varier entre 130 et 230 euros par tonne de dioxyde de carbone stockée.



b) En deuxième lieu, chacun des maillons de la chaîne de CCUS doit assumer des **coûts** et des **risques** qui lui sont **propres**.

Les émetteurs pourraient être amenés à assumer un risque lié aux investissements dans le captage, aux volumes de dioxyde de carbone effectivement captés et, le cas échéant, à une étape de purification du gaz préalable au transport.

Le transporteur doit, quant à lui, assumer les investissements initiaux et les risques techniques liés aux infrastructures de transport elles-mêmes, notamment leur dimensionnement et les spécifications techniques (température, pression, composition du gaz) auxquelles elles doivent répondre, ainsi que

d'autres risques liés, par exemple, à la réservation de capacité et au volume transporté, ainsi qu'à la flexibilité de ces infrastructures.

Selon les études menées par Gaztransport & Technigaz (GTT), le coût du transport maritime du dioxyde de carbone s'établit, par exemple, à 30 euros par tonne en moyenne, la liquéfaction représentant 30 % de ce coût. Ce dernier dépend également de la variabilité du prix de l'électricité, une augmentation de 20 % de ce celui-ci induisant une augmentation de 7 % du coût du transport. Il faut encore y ajouter le coût amont du captage et du transport vers le terminal.

S'agissant du stockage, les coûts techniques, (abordés lors des études préalables, notamment les analyses géologiques, les vérifications des sites ; mais aussi les injections en continu du dioxyde de carbone sur une longue durée) représentent une part importante. La réservation des capacités de stockage constitue également un risque pour l'entité spécialisée. Il lui revient enfin, *in fine*, d'assumer le risque de long terme du stockage, qui peut être notamment lié au maintien de l'intégrité du site et du confinement du gaz.

c) Au total, il reste certains types de risques sont supportés **collectivement** par les acteurs de la chaîne, notamment en ce qui concerne le prix de marché du dioxyde de carbone, les retards dans le déploiement de la chaîne, ou encore la désynchronisation lors de son fonctionnement.

2.1.4. Le développement graduel de la chaîne

Le groupe de travail constate que le déploiement de la chaîne de valeur de CCUS présente un caractère nécessairement évolutif tant au stade de sa constitution qu'à celui de son développement ultérieur.

a) Le **dimensionnement** de la chaîne de CCUS constitue un enjeu important pour l'équilibre économique des projets.

Un sous-dimensionnement initial serait, en effet, de nature à créer des blocages dans le développement du marché. Il peut, à tout le moins, entraîner des surcoûts liés à l'extension ultérieure du réseau à de nouveaux émetteurs qui devront être considérés.

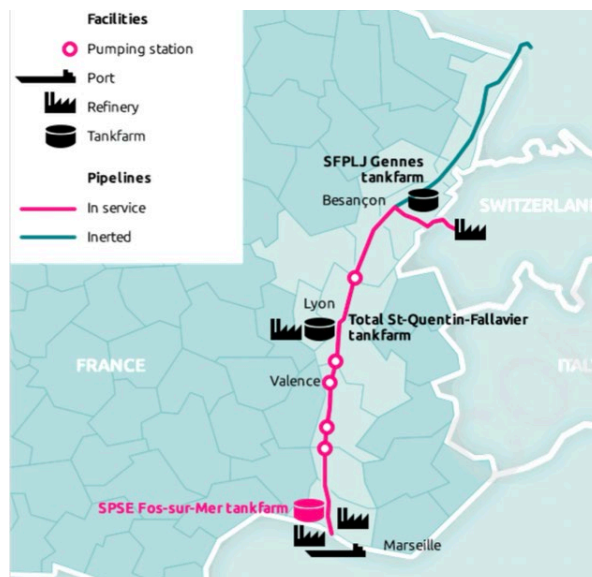
Un surdimensionnement risquerait, à l'inverse, de menacer la viabilité économique du projet en cas de stagnation ou de réduction du nombre initial d'émetteurs. Là encore, des surcoûts liés à l'amortissement des infrastructures devront être couverts.

Il existe également, à moyen terme, un risque de différenciation tarifaire entre les premiers utilisateurs qui ont contribué à la mise en place de la chaîne de valeur et qui ont été, à ce titre, exposés à des coûts importants, et ceux qui arriveront plus tard sur le marché, alors que la chaîne aura déjà été constituée.

La reconversion d'infrastructures déjà existantes peut, par ailleurs, jouer un rôle structurant dans la recherche d'un équilibre économique, dans la mesure où elle offre à la fois un potentiel de déploiement immédiat et un gain financier, notamment lié au dimensionnement initial du réseau.

La reconversion des infrastructures de transport

Un projet de reconversion d'une canalisation servant au transport longue-distance d'hydrocarbures pour celui du dioxyde de carbone est mené par la Société du Pipeline Sud-Européen (SPSE).



Il s'agit d'acheminer environ 4 millions de tonnes de dioxyde de carbone au moyen d'une canalisation de grande capacité (40 pouces), aujourd'hui inutilisée et inertée, en créant des interconnexions en amont avec des émetteurs et/ou des centres de collecte situés le long de la vallée du Rhône et en aval avec le terminal Fos – Marseille, pour un investissement de 200 millions d'euros.

Le groupe de travail considère que l'anticipation et la planification du déploiement de la chaîne de valeur de CCUS en vue de parvenir à une taille et à des coûts optimaux constituent un élément déterminant du modèle économique à retenir.

b) L'intégration de nouveaux usages du dioxyde de carbone constitue un facteur de développement de la chaîne de valeur de CCUS, autant qu'une possible évolution, dans l'éventualité où les besoins de stockage diminueraient ou les capacités de stockage seraient atteintes.

L'émergence de ces nouveaux usages peut aussi permettre l'accélération du déploiement du captage, en tant que technologie, notamment avec le **captage** atmosphérique du dioxyde de carbone (DAC) ou en tant qu'étape préalable à sa valorisation finale.

Le groupe de travail relève que, selon les choix opérés lors de la conception du projet, le risque existe de mettre en place une infrastructure inutile ou sous-optimale. Ce n'est pas le seul facteur auquel l'efficacité de la chaîne de valeur de CCUS est subordonnée.

2.2. Une efficacité conditionnelle

Compte tenu des caractéristiques que présentent les chaînes de CCUS, leur déploiement et leur fonctionnement dépendent de la conciliation des contraintes qui pèsent sur les différents acteurs (1) et de la nécessité de : coordonner leurs actions aux différents stades du développement de la chaîne (2), répartir entre eux les différents risques (3) et maîtriser les coûts qu'ils ont à assumer (4).

2.2.1. Concilier les contraintes des acteurs de la chaîne

Le bon fonctionnement de la chaîne de valeur de CCUS suppose de concilier les différentes **contraintes** d'ordre **technique**, **économique**, voire **géographique**, auxquelles sont soumis les différents acteurs tant dans la constitution de celle-ci que lors de son fonctionnement.

En ce qui concerne les émetteurs, ces contraintes peuvent tenir à leur éloignement géographique d'un centre de collecte, aux technologies ou conditions de captage du dioxyde de carbone, à la mise en place d'interconnexions avec les infrastructures de transport, aux spécifications techniques du gaz à transporter, notamment sa composition et son degré de pureté, comme à la réservation des capacités de transport et de stockage auprès des autres acteurs.

collecte (*cluster*), comme le proposent les appels à projets Zone Industrielle Bas Carbone (ZIBaC ; cf. *infra* partie IV du rapport, spécifiquement le point 4.4).

2.2.3. Concevoir l'allocation des risques

Compte tenu de la nature particulière du dioxyde de carbone et des finalités assignées au CCUS, le groupe de travail constate la nécessité de concevoir une allocation des risques liés au déploiement de la chaîne de valeur (cf. *supra* point 2.1.3.) en sorte d'éviter que la charge correspondante aux risques repose exclusivement ou principalement sur un seul des acteurs de la chaîne. En effet, cette allocation repose essentiellement sur des contrats conclus de manière indépendante entre certains d'entre eux, de sorte qu'elle se réalise de manière dispersée et fragmentaire.

Un **partage équilibré** des risques est donc nécessaire entre les émetteurs industriels, les exploitants des infrastructures et l'État.

Le groupe de travail estime que ce partage doit être opéré en tenant compte de la nature des risques en cause et de la **temporalité** de leur gestion.

D'un côté, la solidarité entre les différents maillons pour constituer la chaîne de CCUS implique de limiter les risques liés au **retard** ou à la **défaillance** de l'un d'eux en vue de prévenir, ou de compenser le cas échéant, toute désynchronisation dans son déploiement. La couverture de ce risque relève, selon les situations, de la sphère contractuelle, mais pourrait également relever d'une garantie de l'État.

De l'autre, la gestion des risques de **long terme**, qui est propre au stockage géologique, pose une difficulté particulière. La responsabilité du dioxyde de carbone, et des risques afférents, assumée en premier lieu par l'émetteur, est transférée de manière définitive à l'exploitant du stockage. Cette responsabilité fait ensuite l'objet d'un nouveau transfert, cette fois à l'État, lors de la mise à l'arrêt définitif de l'infrastructure de stockage souterrain, sous réserve du respect d'une période de surveillance qui ne peut être inférieure à dix ans⁸⁰ (cf. *infra* point 3.1.4). Cette double opération implique de fixer, dès le départ, la contribution de l'émetteur au provisionnement des charges liées au stockage, alors que le dioxyde de carbone doit lui-même passer par plusieurs étapes intermédiaires pour atteindre le site de stockage. Il en va de même pour la contribution de l'exploitant de ce site au-delà de la période de surveillance.

Le groupe de travail estime que l'allocation de ces deux types de risques doit être clairement déterminée, au besoin par la puissance publique, et assumée de manière collective dans la mesure où elle est susceptible d'affecter le déploiement des chaînes de CCUS et le fonctionnement à venir du marché.

2.2.4. Favoriser la maîtrise des coûts

À titre liminaire, le groupe de travail constate que le coût de déploiement des chaînes de valeur de CCUS demeure élevé, au regard notamment du prix de marché actuel du dioxyde de carbone et/ou des situations dans lesquelles la concentration des gaz captés ou le nombre des émetteurs n'est pas suffisant. La compétitivité des chaînes de CCUS dépend alors d'une bonne maîtrise des coûts.

a) Selon l'AIE, un **prix de marché du carbone** se situant autour de 40 à 60 dollars par tonne pour des applications concentrées en dioxyde de carbone et de 70 à 170 dollars par tonne pour des concentrations plus diluées est nécessaire pour qu'une chaîne de CCUS soit compétitive par rapport à une unité fossile conventionnelle faisant l'acquisition de *quotas* d'émission.

Ce prix du carbone est, à l'heure actuelle, déterminé sur les marchés carbone ETS-EU, qui s'appuient sur un système de plafonnement en volume et d'échange de *quotas* (*cap and trade*) des émissions de GES, organisé depuis 2003 par la directive européenne **SEQUE-UE**⁸¹.

Le SEQUE-UE

Conformément au principe du « *pollueur-payeur* » en vue d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES, le SEQUE-UE fixe, d'une part, une limite en volume des émissions dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'aviation et du transport maritime dans l'Union européenne et, d'autre part, un système de fixation du prix du

⁸⁰ Source : selon les cas, articles L. 229-46 et s. du code de l'environnement et articles L. 211-2 et s. du code minier.

⁸¹ Directive n° 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003, établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, disponible sur eur-lex.europa.eu.

dioxyde de carbone à l'aide d'un mécanisme de marché où s'échangent les **quotas** ou EUA (*European Union allowance*, en anglais) alloués aux entreprises de ces secteurs.

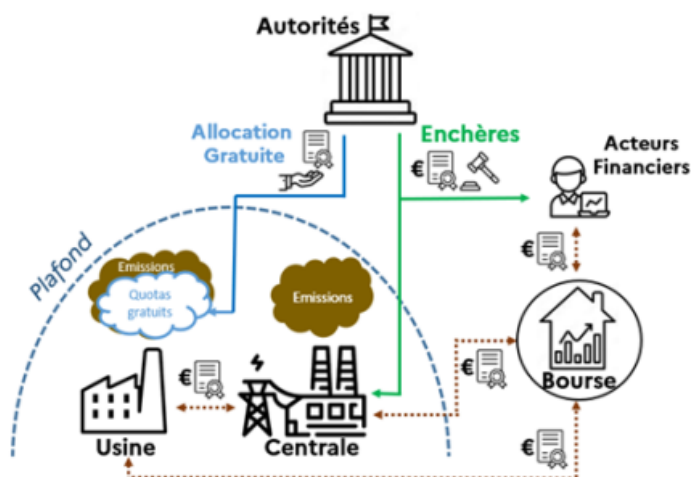
En 2022, le SEQUE-UE couvrait en France 1 059 installations qui ont émis 84 millions de tonnes de dioxyde de carbone soit environ 20 % des émissions territoriales de la France. L'industrie, hors production d'électricité et de chauffage urbain, représente la majorité des émissions, soit 78,8 millions de tonnes, sachant que 80 % des émissions de l'industrie sont couvertes par le SEQUE-UE. Les 50 plus gros émetteurs représentent, à eux seuls, deux tiers de ces émissions.

Le **plafond** du SEQUE-UE fixe le volume absolu maximal de dioxyde de carbone qui peut être émis et, ce faisant, le nombre de **quotas** qui peuvent être délivrés pour une période donnée. Ce plafond est calculé de manière distincte en fonction du secteur concerné, mais surtout présente un caractère **dégressif**. Il diminue chaque année pour garantir que les objectifs globaux de réduction des émissions de GES soient atteints. Les **quotas** d'émission sont majoritairement distribués suivant un mécanisme de mise aux enchères, tenant compte du niveau des émissions historiques à partir de 2005, entre les États membres. La part de la France dans cette répartition, qui représente 57 % -au plus- du plafond global, est de 6,1 % en ce qui concerne les **quotas** généraux (la grande majorité des volumes d'enchères) et de 11,3 % en ce qui concerne les **quotas** de l'aviation.

Parallèlement, afin de faire face au risque de fuite du carbone en dehors de l'Union européenne, un volume significatif de **quotas** est alloué **gratuitement** quoique de manière transitoire au secteur **industriel**, soit 63 secteurs et sous-secteurs pour la période allant de 2021 à 2030. 52,9 millions de **quotas** ont été alloués gratuitement à l'industrie en France en 2022. Dans certains secteurs du système SEQUE-UE (ciment, aluminium, engrais, hydrogène, fer et acier), l'allocation gratuite sera progressivement remplacée par le MACF (ou CBAM) sur la période allant de 2026 à 2034⁸².

Sur le **marché**, les **quotas** d'émission sont matérialisés par des **certificats** qui constituent des titres financiers négociables représentant le droit pour leur porteur d'émettre une tonne de dioxyde de carbone. Les entreprises qui émettent un volume de dioxyde de carbone inférieur aux **quotas** qui leur ont été alloués ou qu'elles ont acquis, peuvent les conserver pour une utilisation future ou les céder à celles dont les activités l'ont dépassé soit sur un marché dédié, soit de gré-à-gré. À la fin de chaque année, les entreprises doivent communiquer les émissions qu'elles ont effectivement réalisées sur la période ou rendre un volume correspondant qui sera annulé par la Commission européenne. Le système d'échange permet aux entreprises de déterminer librement l'option la moins coûteuse pour respecter le plafond fixé pour leur secteur et réduire par-là leurs émissions de GES.

Enfin, pour équilibrer l'offre et la demande, une réserve de stabilité de marché (RSM) a été mise en place en 2019 par la Commission européenne. Elle permet de réduire ou d'augmenter le nombre total de **quotas** en circulation en prélevant ou en ajoutant des quotas mis aux enchères. La RSM ajuste automatiquement l'offre d'allocations dans le SEQUE-UE en fonction de seuils prédéfinis dont le volume est limité à 400 millions de quotas à compter de 2024.



Source : Ministère de la transition écologique⁸³

Depuis son lancement en 2005, le SEQUE-UE a contribué, au sein de son périmètre, à réduire les émissions de GES à hauteur de 46 %.

Néanmoins, le prix de marché européen du carbone s'établit en moyenne autour de 85 euros par tonne en moyenne en 2022 et de 70 euros en 2024, ce qui n'est pas suffisant pour assurer, sans soutien, la

⁸² Règlement n° 2023/956/UE du Parlement européen et du Conseil du 10 mai 2023, préc.

⁸³ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/marches-du-carbone-seque-ue>.

viabilité économique de la chaîne de CCUS en toutes hypothèses. En outre, le marché comporte encore un risque important de variabilité des prix futurs qui doit être pris en compte dans le financement.

Le prix du quota de dioxyde de carbone sur les marchés carbone ETS-EU



Source : Ministère de la transition écologique⁸⁴

Dans le domaine du **transport** maritime par exemple, les coûts de transport du dioxyde de carbone, incluant la liquéfaction, mais hors coûts de captage et de transport vers le terminal portuaire, varient sensiblement selon la distance à parcourir. Ils sont de l'ordre de 32 dollars par tonne pour 2 millions de tonnes transportées sur une distance de 700 milles nautiques par an, voire 26 dollars par tonne pour 10 millions de tonnes transportées sur la même distance, mais avec des surcoûts atteignant 14 dollars lorsque la distance est comprise entre 600 et 2 500 milles nautiques, de sorte que l'équilibre économique sera plus difficilement atteint.

Le groupe de travail constate que le niveau actuel du prix européen du dioxyde de carbone, étant encore éloigné de la **valeur tutélaire** du carbone, ne se situe pas à un niveau permettant d'assurer, à lui seul, l'équilibre économique des chaînes de valeur de CCUS. Or, compte tenu de l'évolution du marché SEQUE-UE et des coûts croissants qu'elle induira, le groupe de travail estime que la trajectoire de cette valeur tutélaire doit être davantage prise en considération dans l'évaluation socio-économique des projets d'investissements à venir dans la filière du CCUS.

La valeur tutélaire du carbone

La valeur tutélaire du carbone représente la valeur pour la collectivité des efforts permettant d'éviter l'émission d'une tonne d'équivalent dioxyde de carbone⁸⁵. Elle est utilisée pour l'évaluation socio-économique des projets d'investissements publics, afin d'orienter les choix vers des projets favorables à la décarbonation. Elle a également vocation à être utilisée dans l'élaboration et l'évaluation des diverses mesures favorisant les investissements privés et les comportements décarbonés (tarification explicite du carbone, subventions à l'investissement, réglementations, etc.), sans viser à fixer le niveau et le taux instrument par instrument. La valeur tutélaire du carbone fournit en effet un point de repère auquel comparer le coût de ces différentes politiques publiques par tonne évitée de gaz à effet de serre, ce qui est un des éléments à prendre en compte dans l'élaboration des mesures. La valeur tutélaire du carbone a vocation à servir de référence pour la fixation de la composante carbone, mais il n'est toutefois pas prévu de l'appliquer directement dans le cadre de la mise en œuvre de la SNBC⁸⁶.

Selon France Stratégie, la valeur tutélaire du carbone à retenir à l'horizon 2030 est de 250 €₂₀₁₈, puis de 500 €₂₀₁₈ en 2040 et de 775 €₂₀₁₈ en 2050⁸⁷.

⁸⁴ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/marches-du-carbone-seque-ue>.

⁸⁵ Masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre (*Vocabulaire du droit de l'environnement*, JORF, 24 septembre 2019, texte n° 49, disponible sur le site Internet [Legifrance](https://www.legifrance.gouv.fr)).

⁸⁶ Ministère de la transition écologique et solidaire, *Stratégie nationale bas-carbone*, mars 2020, p. 60, disponible sur le site Internet du [Ministère en charge de l'écologie](https://www.ministere-en-charge-de-l-ecologie.gouv.fr).

⁸⁷ Source : A. Quinet (dir.), *La valeur de l'action pour le climat*, 2019, p. 7, disponible sur le site Internet de [France Stratégie](https://france-strategie.fr).

Pour les 50 premiers émetteurs, qui émettent 51 millions de tonnes de dioxyde de carbone et qui doivent abattre 9 millions de tonnes à l'horizon 2030, avec une progression ultérieure plus ou moins marquée, les coûts externes sont susceptibles de croître de la manière suivante :

	2030	2040	2050
Scénario 1 Mt/CO2/an	9	11	18
Scénario 2	9	13	22
Scénario 3	10	14	25
S1 Mds €/an	2,20	5,63	14,14
S2	2,37	6,41	16,86
S3	2,55	7,20	19,58

Ce tableau permet de comparer les quantités totales de dioxyde de carbone évitées par les différents scénarios et des coûts externes (i.e. externalités calculées en fonction de la valeur tutélaire) qui y correspond (en euros constants). Le premier scénario correspond à 20 % de captage de dioxyde de carbone et 80 % d'hydrogène. Le deuxième scénario correspond à une répartition à 50/50 et le troisième scénario à 80 % de captage de dioxyde de carbone et 20 % d'hydrogène.

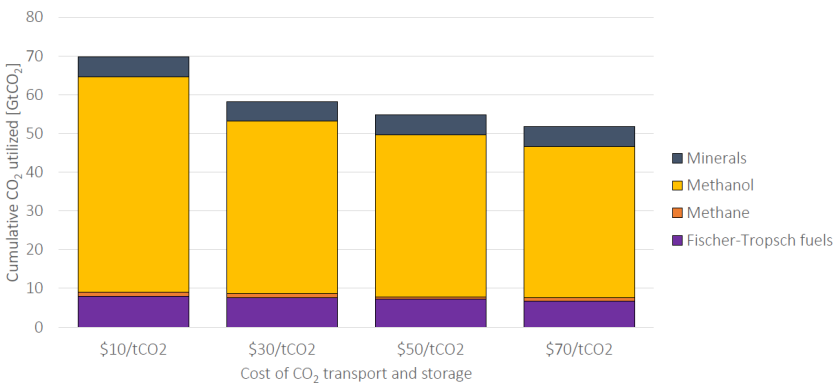
Source : Patrice Geoffron (Paris Dauphine – PSL)

b) De même, le dimensionnement des infrastructures, s'il peut être d'emblée envisagé dans la perspective d'extensions ultérieures de la chaîne de CCUS, peut néanmoins, comme il a été dit au point 1.1.4, entraîner de possibles surcoûts – s'il n'est pas suffisamment adapté aux perspectives du développement du marché à la maille pertinente.

En cas de sous-dimensionnement, l'extension du réseau entraînera des surcoûts notamment pour le maillon du transport tandis qu'en cas de surdimensionnement l'insuffisance de la demande obtenue induira des surcoûts pour les utilisateurs effectifs. La reconversion d'infrastructures déjà existantes peut, plus généralement, permettre de limiter les coûts de mise en place de la chaîne de CCUS et de mieux répartir ensuite ceux liés à ses extensions ultérieures.

Lorsqu'est envisagée la valorisation du carbone, le fort coût de son transport et de son stockage pèse, en outre, sur la compétitivité du déploiement de la chaîne de CCUS. Il affecte directement l'éventualité que cette solution puisse constituer un relais, à terme, du stockage.

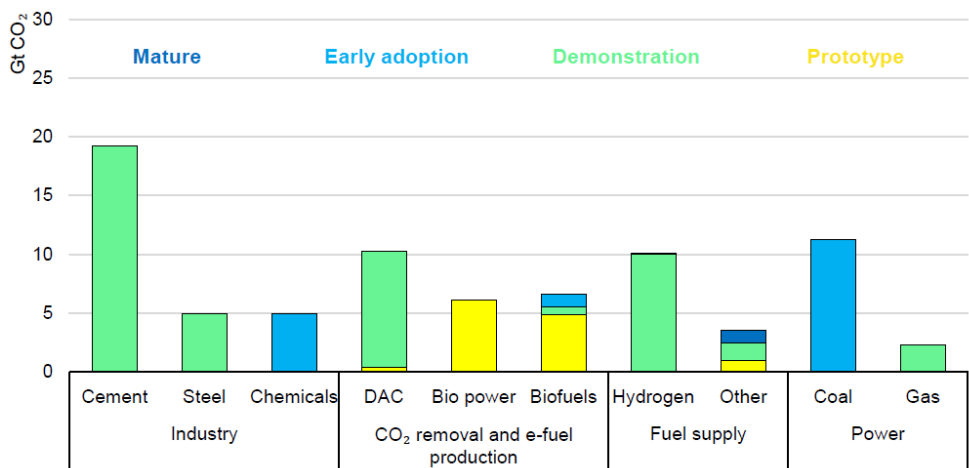
Compétitivité du déploiement du CCUS en fonction du coût du dioxyde de carbone transporté et stocké



Source : Lucas Desport (Mines Paris – PSL)

De surcroît, selon le degré de maturité des technologies permettant la valorisation du carbone et la date de leur mise à disposition, l'intégration à la chaîne de CCUS peut s'avérer incertaine à un pas de temps utile à son développement, notamment en ce qui concerne les investissements nécessaires.

La capacité cumulée de dioxyde de carbone jusqu'en 2050 dans le scénario NZE par niveau de maturité



Source : AIE⁸⁸

Un autre enjeu en la matière tient aux coûts liés aux **spécifications techniques** qui doivent tout à la fois garantir la sûreté des infrastructures et demeurer économiquement viables, de sorte de ne pas obérer le développement de la chaîne de CCUS.

Compte tenu de la forte sensibilité aux coûts, et à leur empilement, de la chaîne de CCUS, le groupe de travail estime que la **maîtrise** des coûts à un niveau permettant son déploiement constitue un enjeu central pour le développement de la filière.

*

Il ressort de ce qui précède que le déploiement des chaînes de CCUS est indispensable à la transition énergétique, mais qu'il est soumis à de nombreuses conditions. Les chaînes de CCUS se complexifient et sont confrontées à de nombreuses contraintes qui deviennent autant de défis pour la croissance de la filière. Cette dernière offre de nombreuses potentialités, mais dont la concrétisation dépend de la possibilité d'accélérer la réalisation des projets, afin que la technologie du CCUS puisse, en temps utile, jouer son rôle pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES. Le groupe de travail estime qu'un cadre de régulation peut constituer le moyen adapté pour répondre à ces enjeux et assurer le développement efficace de la filière du CCUS.

⁸⁸ Source : AIE, Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE), préc.

3. Réguler les réseaux de CCUS pour les développer efficacement

Le groupe de travail relève, à titre liminaire, que le périmètre de la régulation comme ses différentes composantes doivent être définis selon les caractéristiques du secteur industriel concerné et l'existence d'une convergence technique et économique en son sein, comme le rappelle notamment le Conseil d'analyse économique⁸⁹.

Dans le contexte de la transition énergétique, la régulation des chaînes de CCUS est rendue nécessaire, s'agissant d'actifs qui seront pour la plupart privés, par la nécessité de parvenir, à un pas de temps utile pour les échéances fixées par les autorités publiques, à construire un marché.

Compte tenu des caractéristiques particulières des chaînes de CCUS, le groupe de travail estime que la régulation à mettre en place doit cibler leurs éléments pertinents et être conçue de manière suffisamment flexible pour embrasser la pluralité des configurations et encadrer efficacement leur développement.

La régulation à définir poursuit ainsi un double objectif tendant : à favoriser le développement équilibré et la stabilité économique des réseaux ; et à garantir la satisfaction des besoins de leurs utilisateurs. Il s'agit également de réaliser des progrès en termes de coûts et d'innovation s'agissant de technologies, au moins en partie, nouvelles et essentielles à la décarbonation de l'industrie en France.

La délimitation d'un cadre de régulation pour les chaînes de CCUS suppose donc d'en préciser les différentes composantes (1) pour envisager les modèles possibles (2).

3.1. Les composantes de la régulation

Le cadre de régulation des chaînes de CCUS devrait reposer sur des principes déjà éprouvés en matière de régulation sectorielle, mais qui seraient adaptés aux caractéristiques particulières du secteur.

Elles tiennent à la grande **diversité** des situations dans lesquelles une chaîne de CCUS est susceptible de se développer et à la grande **variabilité** des structures. Ce dont doit tenir compte la définition d'un **cadre de régulation** adapté et univoque.

En effet, une chaîne « *simple* » peut comporter quatre maillons (émission et captage, transport, terminal, stockage). Mais elle peut tout aussi bien en comprendre plusieurs autres, dans l'hypothèse notamment d'une multiplication des étapes de collecte et/ou de transport, le cas échéant transfrontalier (*cf. supra* point 2.1.2). La chaîne peut également accueillir, en tout ou partie, des activités liées à la valorisation du dioxyde de carbone, complexifiant encore davantage le schéma.

Le groupe de travail constate que les chaînes de CCUS ont également en commun de comporter un maillon névralgique qui est celui du **transport**, autour duquel les acteurs doivent se positionner et la chaîne se structurer. C'est également sur lui que reposent les enjeux les plus importants lors du déploiement de la chaîne, notamment du point de vue temporel (*cf. supra* point 2.1.4).

Il existe, en outre, des enjeux liés à la gestion du **stockage** sur le long terme. Ceux-ci pourraient être pris spécifiquement en considération, dans la mesure où un transfert de responsabilité vers l'État est *in fine* prévu par la réglementation postérieurement à la mise à l'arrêt définitif du site⁹⁰ (*cf. supra* point 2.1.3). Et parce que cette gestion est susceptible d'affecter le fonctionnement futur du marché.

Au regard de ces enjeux, le cadre de régulation des chaînes de CCUS reposerait (1) sur la construction de tarifs compétitifs, (2) sur la garantie d'un accès des tiers au réseau, et (3) sur l'organisation de procédures de contractualisation et de soutien à la filière adaptées. Il est également envisageable (4) d'y intégrer d'autres éléments.

3.1.1. Contribuer à la construction de tarifs compétitifs

Lorsqu'elle est conçue comme un ensemble de services (*cf. supra* point 2), la chaîne de CCUS repose sur un empilement de coûts qui sont fixés par une succession d'accords contractuels entre ses différents acteurs à chaque étape du cheminement du dioxyde de carbone.

⁸⁹ Source : M. Bacache-Beauvallet et A. Perrot, *Régulation économique : quels secteurs réguler et comment ?*, novembre 2017, disponible sur cae-eco.fr.

⁹⁰ Source : article L. 229-47 du code de l'environnement, s'agissant du stockage géologique de dioxyde de carbone.

Leur **transparence** devient alors un enjeu pour garantir un équilibre économique propice au déploiement, en temps utile, des chaînes de CCUS dans le cadre d'un marché ouvert.

Dans cette perspective, il paraît important de pouvoir disposer de **références** de coûts pour chacun des maillons de la chaîne, afin de permettre à la fois leur dimensionnement efficient, mais aussi de garantir la **compétitivité** des tarifs pour l'ensemble de cette chaîne, tout en assurant une rémunération raisonnable du capital et une juste allocation des risques.

Cette approche s'avère, en outre, particulièrement utile, à la fois pour déterminer le niveau pertinent des **soutiens** publics consentis à la filière, et pour organiser le lissage *ratione temporis* des tarifs destinés à prendre en compte le caractère évolutif de la chaîne de CCUS.

Le groupe de travail relève que cet enjeu n'est pas seulement attaché à un fonctionnement concurrentiel de la chaîne de CCUS, mais participe plus largement de la compétitivité de l'industrie française sur le plan **international**, par rapport à d'autres pays n'ayant pas encore fourni les mêmes efforts en matière de décarbonation.

Le groupe de travail considère que l'encadrement des pratiques tarifaires des acteurs des chaînes de CCUS est un élément essentiel de leur régulation tout comme la garantie d'un accès des tiers à certains de leurs maillons.

3.1.2. Garantir l'accès des tiers aux infrastructures de transport et de stockage

La constitution d'une chaîne de CCUS implique, s'agissant d'infrastructures de réseaux, des investissements particulièrement lourds et qui nécessitent souvent un soutien public, de sorte qu'il s'avère inutile de les dupliquer. Afin d'éviter que ceci ne constitue une barrière à l'entrée, un **accès des tiers** à ce **réseau** (ATR) sera instauré pour permettre une égalité d'accès entre ses utilisateurs.

À cette fin, les conditions d'accès, techniques et tarifaires, doivent être définies de manière **transparente** et **non discriminatoire** et portées à la connaissance des opérateurs préalablement à leur mise en œuvre, conformément aux principes fondamentaux du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, ce dont s'assure l'autorité en charge de la régulation. Les refus d'accès susceptibles d'être valablement opposés par l'exploitant de l'infrastructure aux demandes d'accès présentées par les tiers se limitent donc à de stricts motifs tirés de son indisponibilité ou d'ordre technique. Les différends nés de ces refus peuvent être soumis à l'autorité de régulation.

Dans les chaînes de CCUS, ce droit d'accès concerne *a priori* les maillons du **transport** et du **stockage** qui constituent à la fois des infrastructures difficilement reproductibles et des éléments essentiels du réseau. S'il ne semble pas nécessaire d'étendre son champ aux terminaux et au maillon du captage, au contraire pour les centres de collecte, certains pourraient, à titre exceptionnel, ressortir d'un tel droit.

Les **émetteurs** sont alors mis en mesure de réserver des capacités pour stocker le dioxyde de carbone capté, et de s'assurer de son acheminement, en sorte d'assurer la visibilité et la sécurité de leurs investissements dans la chaîne, par exemple dans des technologies ou des installations de captage.

a) Un tel droit d'accès aux sites de stockage et aux réseaux de transport de dioxyde de carbone est d'ores et déjà consacré par la réglementation française de transposition de la directive européenne de 2009⁹¹, en ce qui concerne le **stockage géologique**⁹².

S'agissant d'actifs, qui sont en grande majorité privés à l'heure actuelle, les conditions d'accès aux infrastructures de transport et de stockage sont le plus souvent **négociées** entre l'opérateur et les utilisateurs et font l'objet d'un contrat qui est transmis puis approuvé par le ministre chargé de l'environnement⁹³. L'accès peut être légalement refusé en cas de manque de capacité de stockage ou de transport, en cas d'incompatibilité avec les spécifications techniques ou eu égard à la nécessité de respecter les besoins de l'exploitant ou les intérêts de tous les autres utilisateurs du site ou du réseau⁹⁴. Les différends nés de l'exercice de ce droit d'accès sont réglés par la CRE⁹⁵.

⁹¹ Directive n° 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative au stockage géologique du dioxyde de carbone, préc.

⁹² Source : articles L. 229-32 et L. 229-48 et s. du code de l'environnement.

⁹³ Source : article L. 229-49 du même code.

⁹⁴ Source : article L. 229-50 de ce code.

⁹⁵ Source : article L. 229-51 dudit code.

b) Néanmoins, ce droit peut, le cas échéant, prendre la forme d'un **accès régulé** aux infrastructures, notamment en cas d'appropriation publique des actifs, de l'existence de missions de service public liées à leur utilisation, comme c'est déjà le cas dans le secteur gazier⁹⁶ par exemple, et/ou de circonstances particulières tenant par exemple à la dispersion géographique des acteurs ou à des différences importantes de pouvoir de marché.

Le tarif d'utilisation est alors homologué par l'autorité de régulation en tenant compte de l'empilement des charges d'exploitation, des dotations aux amortissements et de la juste rémunération des capitaux engagés par l'opérateur.

Cette solution est envisagée par la stratégie française en matière de captage, stockage et utilisation du carbone pour les infrastructures de transport⁹⁷.

Outre la garantie d'un ATR, le cadre de régulation doit comporter un encadrement des procédures de contractualisation et de soutien à la filière du CCUS.

3.1.3. Encadrer les procédures de contractualisation et de soutien à la filière

À l'heure actuelle, le soutien public aux investissements repose sur des mécanismes de financement direct et/ou qui s'appuient sur le marché du carbone ETS-EU (*cf. supra* point 2.2.4).

a) Les **interconnexions** transfrontalières créées par les infrastructures de **transport** de dioxyde de carbone peuvent ainsi être soutenues par l'Union européenne sur appel à financement, si le **projet** est qualifié comme étant d'**intérêt commun** (PIC) au sens du règlement européen du 30 mai 2022 dit **RTE-E**⁹⁸, ce qui a été le cas pour les zones industrielles de Fos-sur-Mer, de Dunkerque, du Havre, de Saint-Nazaire et pour le site de Lacq.

De même, le **Fonds** pour l'**innovation** de l'Union européenne permet de soutenir le développement des technologies nouvelles ce dont peuvent bénéficier les émetteurs pour le **captage** du dioxyde de carbone comme sa **valorisation**, ce qui a été le cas par exemple pour le projet K6 (*cf. supra* point 2.1.1).

b) La stratégie française en matière de captage, stockage et utilisation du carbone prévoit l'organisation d'**appels d'offres** pour soutenir les projets de décarbonation de l'industrie, notamment ceux relatifs aux chaînes de **CCUS**⁹⁹. À l'issue d'une procédure d'enchères, ces appels d'offres peuvent permettre aux **émetteurs** de bénéficier d'une aide calculée par rapport au niveau de production, aux gains d'émissions et à la différence entre l'enchère en euros par tonne de dioxyde de carbone et le prix du quota carbone sur le marché ETS¹⁰⁰.

Ils reposeraient *a priori* sur un outil contractuel spécifique, le **Contrat carbone pour la différence** (*Carbon Contract for Difference*, en anglais – CCfD).

Le contrat carbone pour la différence

Cette catégorie de contrat financier porte sur la couverture du risque de volatilité du prix de marché du carbone en vue de lever les obstacles liés aux coûts de la décarbonation de l'industrie. De tels contrats se sont d'abord développés dans le domaine des énergies renouvelables, afin de promouvoir la production d'électricité décarbonée.

Les émetteurs doivent, en effet, investir lourdement dans les infrastructures nécessaires à la décarbonation, pour un montant qui excède aujourd'hui le prix du quota carbone sur le marché ETS.

Le contrat carbone pour différence prévoit, à partir d'un coût de référence de la tonne de dioxyde de carbone pour le secteur industriel concerné, une compensation de la différence entre ce prix de référence (*strike price*) et le prix variable de marché du *quota* carbone (*spot price*). Quand cette différence est négative pour l'opérateur, la différence est reversée par l'État (*cf. supra* point 2.2.1). De même, quand le prix de marché est supérieur au prix de référence, le contractant reverse à l'État cette différence positive.

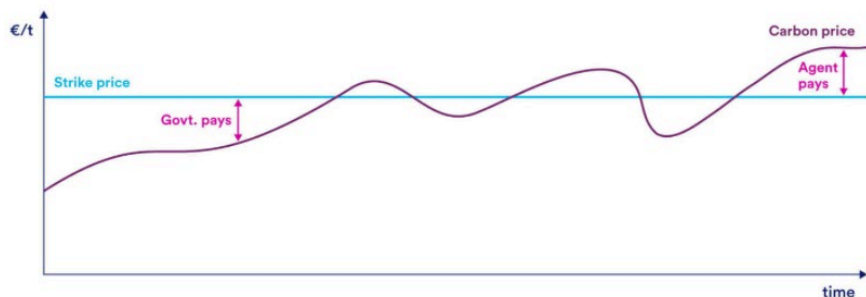
⁹⁶ Source : article L. 421-5 du code de l'énergie.

⁹⁷ Source : *Stratégie CCUS, France 2030*, juillet 2024, préc.

⁹⁸ Règlement (UE) 2022/869 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2022, concernant des orientations pour les infrastructures énergétiques transeuropéennes, modifiant les règlements (CE) n° 715/2009, (UE) 2019/942 et (UE) 2019/943 et les directives 2009/73/CE et (UE) 2019/944, et abrogeant le règlement (UE) n° 347/2013, disponible sur eur-lex.europa.eu.

⁹⁹ Source : *Stratégie CCUS, France 2030*, juillet 2024, préc.

¹⁰⁰ Source : les sites Internet du Conseil national de l'industrie et de l'Ademe.



Source : Climate Policy Journal, 2020¹⁰¹

Un prix plancher qui compense le coût supplémentaire des réductions d'émission de GES par rapport aux niveaux actuels du marché est ainsi garanti à l'émetteur et ce sur une longue durée, de 10 à 20 ans, en sorte d'améliorer la prévisibilité et la sécurité de sa contribution à la décarbonation par les économies de carbone réalisées. Il assure ainsi la compétitivité des technologies bas-carbone, telles que la production d'hydrogène par électrolyse, par rapport aux technologies fossiles.

Aux Pays-Bas, dans le cadre du programme de subventions aux énergies renouvelables (SDE ++), de tels contrats peuvent être conclus en matière de captage et de stockage du dioxyde de carbone sur la base d'un prix d'abattement des émissions par tonne de dioxyde de carbone captée¹⁰², ce dont a pu bénéficier, par exemple, le projet Porthos (cf. *supra* point 1.1.2).

De la même manière que pour les énergies renouvelables, le régulateur peut être appelé, d'une part, à instruire les procédures d'appels d'offres et, d'autre part, à assurer l'expertise des coûts et rentabilités des projets de chaîne de CCUS en vue de déterminer, notamment, le bon dimensionnement des dispositifs de soutien public à leur développement.

3.1.4. Les autres composantes éventuelles de la régulation

Le groupe de travail considère que l'intégration au cadre de régulation de deux autres enjeux mérite d'être, le cas échéant, considérée : 1° la **normalisation** technique des produits et des procédés ; 2° la gestion des risques de **long terme** du stockage de dioxyde de carbone.

- a) La question de la normalisation technique en matière de captage, de transport, de stockage et de valorisation du dioxyde de carbone se pose à deux égards.

D'une part, elle tient à la **pureté** du fluide, comme le prévoit déjà la réglementation à propos du transport et du stockage souterrain¹⁰³, qui doit être essentiellement composé de dioxyde de carbone ce qui implique qu'il ne puisse contenir aucun déchet ni aucune autre matière ajoutée en vue de son transport, de son stockage et de sa valorisation. Certaines substances peuvent néanmoins y être associées lors des opérations de captage ou d'injection. Toutefois, le niveau des concentrations de toutes les substances associées doit demeurer inférieur à un seuil qui serait susceptible de compromettre la sécurité du transport ou l'intégrité du stockage.

Il est prévu que l'autorisation administrative nécessaire à l'exploitation d'un site de stockage géologique de dioxyde de carbone fixe les exigences concernant la composition de son flux et la procédure d'acceptation de ce flux assortie d'une évaluation des risques, et que soit tenu un registre de la composition des flux injectés par cet exploitant¹⁰⁴. Mais cette procédure pourrait faire l'objet d'une standardisation plus globale, à la fois pour garantir la qualité du dioxyde de carbone capté, transporté puis stocké ou valorisé, et pour permettre l'homogénéisation des procédures applicables aux utilisateurs de la chaîne. La poursuite de ce double objectif aura une incidence directe sur la transparence des coûts, leur maîtrise, l'égalité de traitement entre les utilisateurs des chaînes de CCUS, et la confiance dans la sécurité des infrastructures et leur contribution à la décarbonation de l'économie. Il en découle

¹⁰¹ Climate policy journal, *Carbon contracts for differences: an essential instrument for European industrial decarbonisation*, 9 septembre 2020, disponible sur climatepolicyjournal.org.

¹⁰² Source : T. Gerres et P. Linares, *Carbon Contracts for Differences (CCfDs) in a European context*, juin 2022, disponible sur researchgate.net.

¹⁰³ Source : article L. 229-28 du code de l'environnement.

¹⁰⁴ Source : articles L. 229-37, L. 229-38 et R. 229-75 du même code.

que le régulateur peut jouer un rôle utile pour l'édiction de la réglementation applicable et le réexamen périodique de son efficacité.

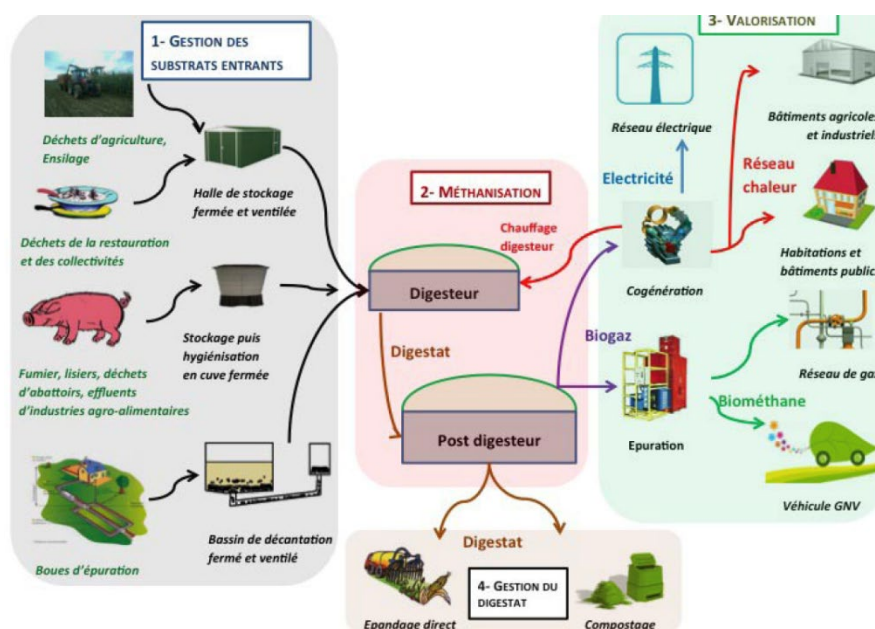
D'autre part, l'**origine** du dioxyde de carbone destiné à être stocké ou valorisé peut faire l'objet d'un système de **certification** prenant la forme d'une « **garantie d'origine** »¹⁰⁵ ou de traçabilité, comme cela existe déjà dans les secteurs électrique et gazier pour la production d'énergie¹⁰⁶, ce qui inclut aussi l'hydrogène¹⁰⁷ dorénavant à partir de sources renouvelables, en vue de promouvoir leur développement dans le cadre de marchés.

Transposé au cas du dioxyde de carbone, ce système peut assurer une forme de soutien au développement des chaînes de CCUS qui intégreraient du dioxyde de carbone d'origine **biogénique** soit en vue de son **utilisation**, soit en vue de l'optimisation des infrastructures de **stockage**, lorsqu'il est produit à proximité de celles-ci¹⁰⁸.

Le dioxyde de carbone biogénique

Le dioxyde de carbone biogénique est issu de la biomasse, entendue comme désignant toute matière d'origine biologique, animale ou végétale, à l'exclusion des matières emprisonnées dans des formations géologiques ou transformées en matières fossilisées¹⁰⁹. Il est émis lors de la combustion ou de la dégradation de la biomasse¹¹⁰.

Dans ce dernier cas, il résulte de la méthanisation, le processus de dégradation de la biomasse donnant lieu, par réaction chimique, à l'émission de méthane qui peut ensuite être valorisé de plusieurs manières.



Source : biométhanisation.fr

Néanmoins, en dépit de son origine, le dioxyde de carbone produit un effet de serre.

Parmi ses usages possibles, le dioxyde de carbone biogénique, combiné à de l'hydrogène produit par électrolyse, ce qui suppose une consommation électrique massive pour en améliorer le rendement énergétique, pourrait

¹⁰⁵ La garantie d'origine est un document servant à prouver au client final qu'une part ou une quantité déterminée d'énergie a été produite à partir de sources renouvelables (cf. article 2 de la directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE, disponible sur eur-lex.europa.eu).

¹⁰⁶ Source : articles L. 314-14-1 et suivants et L. 446-18 et suivants du code de l'énergie.

¹⁰⁷ Source : articles L. 821-1 et suivants du même code.

¹⁰⁸ Dans ce dernier cas, le stockage de dioxyde de carbone biogénique permet à la fois d'éviter les émissions et de réduire la quantité présente dans l'atmosphère des GES.

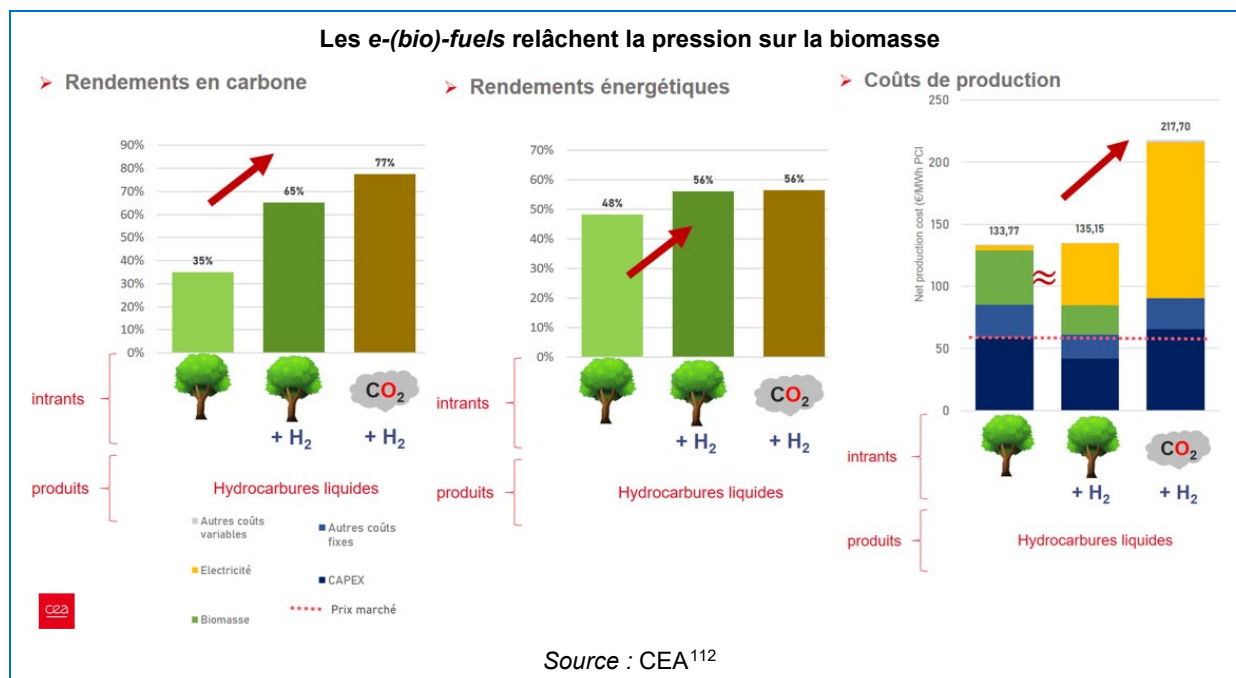
¹⁰⁹ Source : la norme ISO 14067 pour la quantification de l'empreinte carbone des produits, disponible sur iso.org.

¹¹⁰ Source : la documentation Base Carbone disponible sur le site internet de l'Ademe.

notamment servir à la production de carburants de synthèse biologiques (*e-(bio)fuels*) ou être stocké dans un réservoir géologique et capté en vue de produire des émissions négatives (BECS)¹¹¹.

S'agissant de l'utilisation du dioxyde de carbone biogénique, ce dernier entre alors dans la production décarbonée d'un produit et sa certification intègre l'ACV (*cf. supra* point 2.2.1). Ce qui permet de contribuer, à travers une mise aux enchères des garanties d'origine obtenues, au renforcement du financement de la filière du CCUS. Le groupe de travail estime néanmoins que le développement d'un tel système, et partant son utilité pour le déploiement des chaînes de CCUS, sont fortement conditionnés par la disponibilité en quantité suffisante de la biomasse, et d'électricité à un prix facilitateur.

À titre d'illustration, la production d'*e-(bio)fuels* requiert, selon le CEA, un prix de l'électricité établi entre 30 et 70 euros/MWh pour être compétitive.



Le groupe de travail relève que le stockage du dioxyde de carbone biogénique, qui est par exemple prévu par le projet *Northern Lights* (*cf. supra* point 1.1.2), présente un intérêt *a priori* limité pour le dimensionnement des infrastructures, même lorsque l'existence de contraintes ou d'opportunités économiques, telles que la réalisation d'économies d'échelle ou l'évitement de coûts, le justifie.

Le régulateur peut là encore être chargé de veiller à l'absence de création d'une surrémunération des opérateurs et à ce que les garanties d'origine assurent leur rôle de traçabilité et leur contribution à la réduction du coût de financement des infrastructures.

b) La gestion des risques de long terme liés au stockage géologique du dioxyde de carbone est une question *a priori* réglée par les textes en vigueur.

Il est, en effet, prévu une période minimale de surveillance de trente ans, ce qui va au-delà de ce qu'exige le droit de l'Union européenne¹¹³, entre l'arrêt définitif des opérations d'injection par l'exploitant et l'intervention de la décision de transfert de responsabilité à l'État. Il est néanmoins possible à l'autorité administrative de réduire la période de surveillance légalement prévue, à partir d'une évaluation de la capacité du site à stocker le dioxyde de carbone de façon permanente et sûre réalisée par l'exploitant et à l'issue d'une période incompressible de dix ans. En cas d'insuffisance des éléments fournis par l'exploitant, une nouvelle période de surveillance incompressible, qui ne peut excéder dix ans, peut, à

¹¹¹ Pour en savoir plus sur les besoins en CO₂ et en électricité liés à la production des e-carburants : <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/6680-electro-carburants-en-2050-quels-besoins-en-electricite-et-co2-.html>

¹¹² Source : CEA, *L'économie circulaire du carbone*, 29 novembre 2021, disponible sur cea.fr.

¹¹³ Article 18 de la directive n° 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative au stockage géologique du dioxyde de carbone, préc.

l'inverse, être fixée par l'autorité administrative. Le transfert de responsabilité peut intervenir avant l'expiration de la première période décennale de surveillance en cas d'engagement pris par l'exploitant de retour gratuit à l'État de la propriété du site ou de versement par le premier d'une soule couvrant l'ensemble des coûts liés à la surveillance trentenaire et au transfert de responsabilité¹¹⁴.

Le groupe de travail constate que cette question constitue un enjeu central pour les acteurs de la chaîne de CCUS qui dépasse ceux qui sont strictement liés au stockage (*cf. supra* points 2.1.3 et 2.2.3). Et qu'elle pourrait, dans cette mesure, être prise en compte par le cadre de régulation. D'une part, pour favoriser le fonctionnement à venir du marché et, d'autre part, pour garantir un juste équilibre entre les obligations incombant aux opérateurs et la responsabilité qui échoit *in fine* à l'État.

Au sein du cadre de régulation à géométrie variable qui vient d'être tracé, il existe plusieurs modèles possibles, compte tenu des caractéristiques du secteur concerné.

3.2. Les modèles possibles de régulation

Compte tenu de la diversité des configurations possibles dans lesquelles les chaînes de CCUS sont susceptibles de se déployer, il ne semble pas possible au groupe de travail d'envisager un **modèle** unique de régulation. Le groupe de travail estime, en outre, que l'intensité de la régulation est susceptible de varier selon les objectifs poursuivis et les situations appréhendées.

À l'aune de ces facteurs, il est possible de distinguer plusieurs **modèles** de régulation, l'un plus léger, l'autre plus approfondi, selon le contexte dans lequel la chaîne de CCUS est appelée à se déployer. À ce dernier égard, il semble pertinent de tenir compte du degré de maturité du marché et de ses potentialités de développement, mais aussi des contraintes physiques et géographiques auxquelles sont confrontés les opérateurs économiques. Dans certaines situations, ces derniers sont nombreux et regroupés à proximité d'un centre de collecte et/ou d'une infrastructure de transport ; tandis que dans d'autres, ils sont peu nombreux et/ou disséminés et éloignés de ces infrastructures. L'élément central pour la régulation devient alors la **taille critique** qu'atteint ou est susceptible d'atteindre, à terme, la chaîne de CCUS à déployer pour permettre son fonctionnement pleinement efficient.

Ce premier constat conduit à définir un **périmètre** de régulation. *A priori*, les chaînes de CCUS de taille réduite et dédiées à un seul acteur, constituent ainsi des « *lignes directes* » privées, et semblent devoir en être exclues, dans la mesure où elles ne sont pas conçues pour se développer au-delà de leur conception et de leur utilité initiales. Néanmoins, une régulation pourrait se justifier même dans ce cas de figure, si le réseau devait être étendu, dans un second temps, à d'autres utilisateurs.

Pour les autres chaînes de CCUS, il découle de ce qui précède que la régulation est appelée à présenter une physionomie différente selon qu'elle a vocation à encadrer le déploiement de réseaux qui bénéficient déjà d'une certaine ouverture à la concurrence (1) et ceux pour lesquels, en raison de leur enclavement géographique ou d'autres types de contraintes, elle sera plus difficile, voire impossible, à plus ou moins brève échéance (2).

3.2.1. Une régulation souple des chaînes de CCUS « *ouvertes* »

Le groupe de travail constate qu'il existe une première configuration dans laquelle les chaînes de CCUS se développent dans des **conditions** « *ouvertes* », en raison du nombre d'acteurs intéressés et de la configuration favorable des lieux, notamment en ce qu'elle permet un accès facilité, le cas échéant transfrontalier, à une infrastructure de stockage en raison notamment de l'existence d'installations, d'interconnexions ou de modes de transport adaptés. Ces actifs sont donc essentiellement privés et leur développement appelle une intervention publique mesurée.

a) Dans cette situation, la régulation de la chaîne de CCUS peut se limiter à accompagner son déploiement, sans peser excessivement sur l'autonomie des acteurs. L'enjeu de la régulation de ces réseaux devient alors de garantir un traitement transparent et non discriminatoire en ce qui concerne l'accès aux réseaux de transport et de stockage, voire le cas échéant aux terminaux.

En vue de stimuler le déploiement de ce type de chaîne de CCUS, le groupe de travail estime essentielle l'instauration d'un droit d'**accès** des **tiers** au **réseau**, mais considère qu'il peut demeurer dans un cadre **négocié**.

¹¹⁴ Source : article L. 229-47 du code de l'environnement.

En effet, dès lors qu'il existe une capacité d'investissement privé et un nombre d'opérateurs suffisants pour permettre l'émergence d'une compétition, la régulation n'apparaît pas *a priori* nécessaire. Les investissements et la fixation des tarifs sont alors librement définis par les acteurs de la chaîne.

Néanmoins, le soutien public qui peut être apporté aux différents maillons de la chaîne de CCUS ne saurait aboutir à une situation inefficace dans laquelle une surrentabilité de certaines infrastructures apparaîtrait, permettant à l'exploitant d'abuser de sa position sur le marché naissant.

En effet, tout risque de surrentabilité ne peut être écarté, dans le cadre des politiques publiques menées en Europe, comme en France, qui prévoient la mise en place ou la poursuite de programmes de soutien financier aux différents acteurs de la chaîne (cf. *supra* 3.1.3), qui serviront notamment à l'édification des infrastructures de transport et de stockage, voire aux terminaux.

b) Compte tenu de ces éléments, une **régulation ciblée** des chaînes de CCUS ouvertes à la concurrence doit être mise en place pour encadrer leur déploiement.

Le régulateur serait, en premier lieu, en charge d'approuver les conditions d'accès aux infrastructures de transport et de stockage définies par contrat, en sorte de garantir leur caractère **transparent** et **non discriminatoire**.

Il s'agit alors pour le régulateur de prévenir les **différences** de traitement injustifiées entre les utilisateurs, qui sont attentatoires au bon fonctionnement du marché, autant que de garantir la confiance des investisseurs comme des utilisateurs.

Il lui revient de s'assurer que les conditions tarifaires et techniques d'accès aux infrastructures ont été fixées par l'exploitant à partir d'éléments clairs, rationnels et objectifs et ont été portées à l'avance à la connaissance des opérateurs.

En deuxième lieu, le régulateur contrôlerait *ex post* la **structure tarifaire** pratiquée par les gestionnaires d'infrastructures en vue de vérifier le rendement interne des investissements réalisés et ainsi déterminer l'existence d'une éventuelle surrentabilité pour la corriger, le cas échéant. Il convient également d'envisager les situations dans lesquelles un sous-rendement pourrait être éventuellement constaté, ce qui impliquerait également d'apporter des corrections tarifaires symétriques.

En vue d'assurer l'effectivité d'un tel contrôle, il paraît souhaitable d'imposer au gestionnaire des infrastructures une **séparation comptable** de sorte d'isoler les coûts pertinents.

En dernier lieu, le cadre de régulation devra tenir compte du caractère **évolutif** de la chaîne de valeur de CCUS.

Il s'agit, en particulier, de tenir compte des investissements initiaux réalisés par les **premiers investisseurs** à la mise en fonctionnement de la chaîne, dans la phase ultérieure de son expansion. Il s'agira alors de faire jouer une « *clause de grand-père* » prenant en considération les efforts antérieurement fournis par les utilisateurs dans la détermination des tarifs dû par les nouveaux entrants, de sorte à assurer un équilibre dans la répartition des coûts de l'infrastructure concernée.

En outre, le **surdimensionnement** initial des infrastructures exige un traitement spécifique lorsqu'il intervient à l'initiative ou avec l'appui de la puissance publique dans le cadre d'une politique incitative. L'actif concerné pourrait alors, de manière distincte et autonome, faire temporairement l'objet d'un ATR davantage régulé le temps d'atteindre des conditions de concurrence suffisantes.

Le projet *Porthos* et *Aramis* aux Pays-Bas

Dans le cadre du projet *Porthos* (cf. *supra* point 1.1.2) et *Aramis* aux Pays-Bas, les opérateurs publics nationaux en charge de la production et du transport de gaz ont intégré un consortium, à l'origine exclusivement privé, pour exploiter des infrastructures de transport et de stockage mutualisées. L'objectif principal est de permettre, au-delà des premiers émetteurs utilisateurs de cette infrastructure, de mettre à disposition des capacités supplémentaires à de nouveaux entrants.

De même, il n'est pas exclu qu'à la faveur d'un **effet d'échelle**, un réseau plus étendu et interconnecté voit le jour sur le territoire français ou européen¹¹⁵, justifiant l'instauration d'un ATR régulé aux lieux et places d'un ATR négocié.

Une telle solution doit être d'emblée envisagée quand les circonstances ne permettent pas un déploiement de la chaîne par le simple jeu concurrentiel.

3.2.2. Une régulation renforcée des chaînes de CCUS « *enclavées* »

Le groupe de travail constate l'existence d'une deuxième configuration dans laquelle les chaînes de CCUS se développent dans un contexte d'« **enclavement** », soit en raison du nombre trop limité d'acteurs présents sur le territoire concerné ou de l'insuffisance des capacités d'investissements, soit de la configuration défavorable des lieux, du fait de l'éloignement des installations de centres de collecte et/ou d'infrastructures de transport. Le marché est alors défaillant et des solutions entièrement locales doivent être recherchées.

a) Dans ce contexte, la constitution même de la chaîne est tributaire d'une intervention publique comme ultérieurement son développement. Cette intervention peut revêtir la forme d'un programme d'investissements lié à une volonté locale, voire nationale, de créer un réseau, qui peut avoir vocation à se limiter à un échelon strictement local, ou d'étendre un réseau existant qui peine à trouver son équilibre économique et financier en raison de l'existence d'externalités. Un opérateur ou un consortium public pourrait être désigné comme gestionnaire de la chaîne ou, plus spécifiquement, du maillon concerné, comme c'est déjà le cas aux Pays-Bas.

Ce soutien public peut alors s'accompagner de règles et de tarifs définis par la puissance publique en vue de tenir compte notamment des investissements assumés par elle et en susciter d'autres. Cet encadrement devra également s'adapter aux possibles extensions ultérieures et à l'accueil de nouveaux utilisateurs.

b) C'est une **régulation plus poussée** qui s'avère alors nécessaire pour encadrer le déploiement de la chaîne de CCUS dans de telles configurations.

Le régulateur serait en charge de fixer *ex ante* les conditions de l'ATR de transport et/ou de stockage, de manière transparente et non discriminatoire, ainsi que les tarifs d'utilisation. L'objectif poursuivi est ainsi de produire un effet de levier et de favoriser l'émergence, à terme, d'une compétition.

En vue d'assurer l'effectivité de la régulation, il paraît souhaitable d'imposer au(x) gestionnaire(s) des infrastructures désigné(s) une **séparation comptable et fonctionnelle** en sorte de garantir une stricte indépendance vis-à-vis des autres opérateurs autant que d'assurer la transparence des coûts.

Néanmoins, il n'est pas souhaitable d'envisager le **surdimensionnement** initial des infrastructures, s'il ne présente pas un intérêt économique identifiable pour la puissance publique au moment de la mise en place de la chaîne. Symétriquement, en cas de **sous-utilisation** de l'infrastructure, il sera nécessaire de prévoir une compensation pour l'opérateur dans les premiers stades de développement de la chaîne, le cas échéant en recourant à un fonds comme l'envisage, par exemple, le Royaume-Uni.

*

Souple et favorisant un accès négocié aux réseaux dans la plupart des cas, davantage renforcé par des mesures directement déterminées par le régulateur dans des situations plus exceptionnelles, le cadre de régulation doit, à la manière d'un « *gant de velours* », permettre le déploiement accéléré des chaînes de CCUS au service de la transition énergétique, tout en garantissant leur fonctionnement efficient.

Ces deux modèles de régulation ne sont pas nécessairement exclusifs mais peuvent, le cas échéant, se combiner. La réalisation d'infrastructures communes aux utilisateurs de la chaîne de CCUS, telles qu'un centre de collecte ou un terminal par exemple, incite à l'instauration de tarifs régulés, tandis que le changement d'échelle d'une chaîne « *enclavée* », notamment à travers son raccordement à de grandes infrastructures interconnectées et transfrontalières, induira un fonctionnement plus concurrentiel de la chaîne et une régulation plus souple. C'est dire que le champ des possibles de la régulation des chaînes de CCUS est vaste.

¹¹⁵ Commission européenne, Communication au Parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, *Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'Union européenne*, 6 février 2024, préc.

Néanmoins, l'évolution du cadre national de régulation devra composer avec la réglementation européenne à venir, annoncée en début d'année et confirmée depuis, qui pourrait retenir le principe d'un modèle plutôt qu'un autre. Le groupe de travail estime que, quelle que soit l'option européenne retenue à terme, les autorités françaises doivent, sans tarder, le définir et en assurer la mise en œuvre effective afin que puissent être tenus les engagements de la France en matière de décarbonation de son économie. Le prochain Forum européen sur le captage et le stockage du dioxyde de carbone se tiendra à Pau les 10 et 11 octobre 2024 sous l'égide du ministère français en charge de l'énergie et de la Commission européenne.

4. Renforcer les moyens au soutien de la filière du CCUS pour permettre son plein succès

Le groupe de travail considère que le CCUS constitue une opportunité de décarbonation importante, voire déterminante, pour l'industrie et plus largement pour réussir la transition énergétique. Il est ainsi primordial d'en accélérer la progression pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, ce qui passe par un renforcement des moyens mis en œuvre à cette fin.

Le groupe de travail considère, en outre, que l'enjeu du déploiement des chaînes de CCUS n'est pas seulement sa contribution à la **décarbonation** de l'économie, mais tout autant son concours à la **réindustrialisation** profonde de la France et à la consolidation de sa **souveraineté**.

Partant, le groupe de travail entend faire plusieurs **propositions** pour créer ou renforcer les moyens propres à assurer un développement efficace des chaînes de CCUS dans le « *pas de temps* » fixé par la PPE/SNBC pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Pour faire du CCUS un instrument crédible et efficace de décarbonation, cinq axes ont ainsi été dégagés par le groupe de travail. L'enjeu est de contribuer à définir une véritable **politique publique** du CCUS qui ne se limite pas à la décarbonation, mais qui participe également à la réindustrialisation de la France.

Le groupe de travail propose de renforcer les moyens au soutien du CCUS en travaillant à construire l'acceptabilité sociale des projets (1), en organisant la planification et la coordination de leur réalisation (2), en instaurant une régulation souple des chaînes de valeur (3), en soutenant les investissements qui sont indispensables à leur développement (4) et en anticipant les risques économiques et techniques liés à leur déploiement (5).

4.1. Promouvoir l'acceptabilité sociale des projets de CCUS

Il ressort des travaux du groupe de travail que l'une des conditions essentielles à la réalisation des projets de chaînes de CCUS tient à la nécessité d'assurer leur **acceptation sociale**. Ce besoin s'exprime d'abord au niveau local, mais s'inscrit dans un contexte national qui doit être plus généralement pris en compte par les autorités publiques.

L'organisation d'un débat national sur la transition énergétique incluant les technologies du CCUS peut permettre de sensibiliser le public sur les enjeux auxquels elles entendent répondre, notamment s'agissant du stockage, et leur utilité pour la transition énergétique, en sorte de les « *déconfiner* ».

Une meilleure connaissance de ces technologies contribue à ce que, dans un second temps, les projets de chaînes de CCUS menés localement puissent être mieux acceptés par les populations.

En outre, un cadrage institutionnel et une feuille de route peuvent venir, consécutivement au débat, en renforcer la portée comme la légitimité des technologies et des projets qui sont mis en œuvre sur les territoires. L'échelon régional peut être appelé à jouer un rôle central dans le déploiement des projets.

En toute hypothèse, la réussite de ces projets sur le terrain de l'acceptabilité sociale passe, à la maille plus locale, par la mise en œuvre de différents leviers d'action par les parties prenantes en matière de dialogue qui doivent être mobilisés dès les premières études préalables et tout au long de leur conception puis de leur réalisation.

Le groupe de travail considère ainsi que l'acceptabilité sociale des projets doit être promue à ces différents échelons pour assurer le déploiement réussi des chaînes de CCUS.

Recommandation n°1 :

Organiser une information au niveau national sur les technologies du CCUS.

Recommandation n°2 :

Promouvoir les actions de dialogue à l'échelle locale sur les projets de chaîne de CCUS.

4.2. Planifier et coordonner le déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national

Il ressort également des travaux du groupe de travail que l'un des enjeux majeurs du déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national tient à sa **planification** et à sa **coordination**.

En premier lieu, le facteur **temporel**, pour des projets nécessitant plusieurs années pour se développer, commande de planifier les investissements et les opérations nécessaires de sorte d'en assurer la bonne réalisation, en particulier la mise en service coordonnée de ses différents maillons.

De même, le facteur **spatial**, s'agissant de configurations géographiques variables qui doivent être prises en compte par les projets, oblige à rechercher une cohérence dans le développement des réseaux à la maille territoriale pertinente, dans une perspective d'optimisation d'infrastructures qui sont difficilement reproductibles.

En deuxième lieu, le besoin, pour chaque projet, de **dimensionner** correctement la chaîne de CCUS à constituer, tout en anticipant son évolution ultérieure, pour en assurer tant l'équilibre que la pérennité économiques, suppose d'organiser les différentes étapes de son déploiement qu'il s'agisse d'étendre le réseau ou d'intégrer de nouveaux usages.

En troisième lieu, cette planification doit être assumée par les pouvoirs publics eux-mêmes lorsqu'il existe une situation d'**enclavement** des émetteurs, dans la mesure où une intervention non commerciale est indispensable pour développer la chaîne de CCUS. Le programme public des investissements et le lancement d'appel d'offres faciliteront un dimensionnement adapté de la chaîne aux besoins existants ou futurs des utilisateurs et, le cas échéant, une **péréquation territoriale** dans le développement de la technologie du CCUS.

En dernier lieu, le groupe de travail estime qu'il est primordial d'encourager la **mutualisation** des moyens et des infrastructures, au-delà de la réalisation des économies d'échelle qu'elle permet, pour assurer une meilleure coordination des projets et des acteurs de la chaîne de CCUS, comme le propose par exemple les appels à projets ZIBaC (*cf. infra* partie IV du rapport, spécialement le point 4.4).

Le groupe de travail estime, en conséquence, qu'il y a lieu d'organiser une planification du déploiement des chaînes de CCUS aux différentes mailles territoriales pertinentes pour garantir la cohérence des actions et l'adaptation des infrastructures aux besoins et aux potentiels de développement de la technologie.

Recommandation n° 3 :

Planifier le déploiement des chaînes de CCUS sur le territoire national.

Recommandation n° 4 :

Planifier et coordonner les investissements dans les projets de chaînes de CCUS.

Recommandation n° 5 :

Encourager la mutualisation des maillons de la chaîne de CCUS.

4.3. Instaurer une régulation souple des chaînes de CCUS

Surtout, il ressort des travaux du groupe de travail que l'instauration d'une **régulation** des chaînes de CCUS est tout à la fois indispensable et pertinente pour accélérer le développement d'un marché ouvert en sorte de créer les conditions permettant de contribuer pleinement et en temps utile à la transition énergétique.

Le groupe de travail estime que cette régulation doit être suffisamment **flexible** pour appréhender les différentes configurations possibles dans lesquelles les chaînes de CCUS sont susceptibles d'être constituées.

L'**intensité** de la régulation doit ainsi varier en fonction des conditions géographiques, techniques et économiques dans lesquelles les chaînes de CCUS se déploient.

Là où l'initiative privée est évidente et la configuration des lieux favorable, la régulation peut se limiter à rationaliser le comportement des opérateurs et à garantir un ATR négocié aux infrastructures difficilement reproductibles au sein de la chaîne de CCUS.

Là où les contraintes sont importantes et les conditions de concurrence défavorables, la régulation doit être **renforcée** par des actions incitatives et un ATR régulé de sorte à soutenir la constitution et le développement des chaînes de CCUS, sous réserve qu'il existe un intérêt économique et des perspectives identifiables par la puissance publique.

Le groupe de travail estime que ces deux modes de régulations ne sont pas exclusifs l'un de l'autre et peuvent, le cas échéant, se **combiner** ou se **succéder** selon les configurations et les évolutions possibles que connaissent les projets de chaîne de CCUS.

En tout état de cause, le **cadre national** de régulation doit être défini sans attendre, en vue d'encourager le lancement rapide des projets de CCUS et de créer les conditions permettant leur réalisation en temps utile pour atteindre les objectifs intermédiaires de réduction des émissions des GES.

Recommandation n° 6 :

Instaurer un cadre national de régulation souple des chaînes de CCUS pour accélérer leur déploiement.

Recommandation n° 7 :

Renforcer la régulation des chaînes de CCUS en présence d'externalités particulières.

4.4. Soutenir les investissements nécessaires au déploiement des chaînes de CCUS

Le groupe de travail constate l'insuffisance des **soutiens publics** existants au déploiement des chaînes de CCUS, voire l'absence de dispositif qui lui serait spécifiquement dédié. Comme il a été souligné plus haut (*cf. supra* partie I du rapport, spécifiquement le point 2.2.1), la constitution d'une chaîne de CCUS requiert des investissements importants, en particulier dans le secteur industriel émetteur lui-même.

En effet, les dispositifs nationaux d'aide existants se concentrent sur l'amont des projets de CCUS, la **recherche** et l'**innovation** de la chaîne de valeur dans le cadre du programme France 2030. Ainsi, le Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR), qui soutient l'innovation pour développer de nouveaux procédés industriels largement décarbonés, a permis le financement de six projets de recherche en lien avec le CCUS¹¹⁶, de même que l'appel à projets de développement de briques technologiques et démonstrateurs et réalisation de premières industrielles associant l'offre et la demande (DEMIBaC) qui permet de soutenir des projets également liés au CCUS¹¹⁷.

Au-delà de ces soutiens à l'innovation, les appels à projets Zone Industrielle Bas Carbone (ZIBaC) facilitent, pour une dizaine de zones industrielles françaises émettrices de GES, à travers l'élaboration de trajectoires de décarbonation, le développement d'infrastructures mutualisées nécessaires à la décarbonation, ce qui englobe le CCUS¹¹⁸.

Le groupe de travail estime que la mise en place d'un dispositif d'aide efficace et **ciblé** à l'investissement, dans le cadre de la mise en place d'une politique publique dédiée (*cf. supra* partie II du rapport, spécifiquement le point 3.1.3), venant en complément de ces dispositifs, ainsi que de ceux mis en place par l'Union européenne, tels que le Fonds d'innovation ou les PIC (*cf. supra* partie I du

¹¹⁶ Source : le site Internet de l'[ANR](#).

¹¹⁷ Source : le site Internet de l'[Ademe](#).

¹¹⁸ Source : le site Internet du [Ministère de l'économie](#).

rapport, spécifiquement le point 1.2.2), produirait un **effet** d'accélérateur pour la réalisation des projets de chaîne de CCUS.

Le groupe de travail a constaté que les premiers éléments de définition de la stratégie française en la matière envisagent de recourir aux CCfD (*cf. supra* partie II du rapport, spécifiquement le point 3.1.3) attribués par appels d'offres et estime que le recours à de tels instruments doit être encouragé pour stimuler et garantir sur le long terme les investissements dans les chaînes de CCUS.

Ce dispositif peut être complété par des aides directes spécifiques à deux égards.

D'une part, un soutien public pourrait être apporté au **dimensionnement** des infrastructures de transport et de stockage souterrain, qu'il s'agisse de surdimensionner des actifs existants ou en projet, ou du développement de nouvelles infrastructures, pour garantir leur développement et favoriser, en lui accordant une priorité, leur mutualisation, sous réserve qu'il existe un intérêt économique et des perspectives identifiables par la puissance publique.

D'autre part, le développement de nouvelles **technologies**, qu'il s'agisse de procédés innovants de captage, de transport ou de valorisation pourraient faire l'objet, au-delà des dispositifs déjà existants, d'un soutien public. S'agissant de la valorisation du dioxyde de carbone, ce soutien pourrait, par exemple, prendre la forme de garanties d'origine (*cf. supra* partie II du rapport, spécifiquement le point 3.1.4).

Recommandation n° 8 :

Développer des contrats carbone pour la différence, afin de garantir le financement de long terme des chaînes de CCUS.

Recommandation n° 9 :

Cibler les dispositifs d'aide publique à l'investissement sur les infrastructures de transport et de stockage souterrain, notamment pour assurer dès le premier investissement le dimensionnement optimal à terme.

Recommandation n° 10 :

Instaurer des dispositifs d'aide publique au développement des nouvelles technologies de CCUS.

4.5. Anticiper les risques économiques et techniques liés au CCUS

Il ressort des travaux du groupe de travail que la **couverture** des risques économiques et techniques liés aux chaînes de CCUS doit être anticipée dès la conception des projets afin de la répartir de manière équilibrée entre ses acteurs.

Le groupe de travail constate qu'il existe plusieurs modèles possibles d'allocation, l'un passant par un faisceau de contrats conclus entre les acteurs de la chaîne de CCUS, et d'autres faisant intervenir une garantie de l'État ou impliquant une propriété publique, le cas échéant conjointe, de certains actifs afin de réduire les risques supportés par les opérateurs des infrastructures de transport et de stockage.

Le groupe de travail relève la spécificité que présente la gestion des risques de long terme du stockage souterrain de dioxyde de carbone qui induit un transfert de responsabilité entre l'émetteur, le stockeur et *in fine* l'État.

Il estime aussi que, quelle que soit la solution retenue, l'allocation des risques entre les différents acteurs de la chaîne, et leur couverture, doivent être clairement déterminées et réparties à due proportion de la charge qu'ils représentent, en tenant compte notamment du facteur temporel et/ou de la dimension collective de leur gestion.

Recommandation n° 11 :

Anticiper les risques économiques et techniques en procédant à leur allocation de manière juste et équilibrée entre les acteurs de la chaîne de CCUS.

5. Conclusion

Le captage, le transport, le stockage et la valorisation du carbone sont un moyen utile, crédible et efficace pour décarboner l'économie française et réussir, ce faisant, la transition énergétique à l'horizon 2050. Il en va de même pour soutenir la réindustrialisation de notre pays dans un contexte international tendu, appelant à une plus grande souveraineté industrielle. Ce contexte a revivifié l'intérêt des acteurs économiques (conduits à revoir leur stratégie bas-carbone), et des autorités publiques (incitées à recourir à tous les leviers utiles à la décarbonation), pour cette technologie ; faisant du CCUS un levier, certes de dernier recours, mais incontournable pour les secteurs où les émissions de GES sont difficiles à abattre.

Le groupe de travail entend réaffirmer sa conviction que face à l'urgence climatique cette solution est pertinente et adaptée pour atteindre, en temps utile, les objectifs fixés par les politiques nationales et européennes en matière de lutte contre le changement climatique. À cet égard, il estime que l'approche par les coûts pour déterminer s'il est pertinent d'y recourir doit se combiner avec la prise en compte de sa valeur au service de l'action publique en faveur de cette lutte.

Déployer les chaînes de CCUS est un défi industriel aux multiples enjeux et soumis à plusieurs conditions, mais qui peut être relevé rapidement. Il s'agit d'un engagement national, économique et politique, de long terme pour lequel les acteurs, privés comme publics, doivent pouvoir disposer de la visibilité et des garanties suffisantes pour le mener à bien ; à un rythme permettant une pleine contribution à la transition énergétique d'ici 2050, mais aussi à la réindustrialisation profonde et durable de la France.

Le groupe de travail propose, dans cette perspective, d'instaurer un cadre de régulation souple et flexible des chaînes de CCUS, et de renforcer les moyens au soutien de la filière, en vue de créer les conditions d'une accélération de leur déploiement.

C'est à cette double condition que les chaînes de CCUS tiendront leur rang parmi les différents leviers nécessaires à notre neutralité carbone et contribueront à un futur énergétique soutenable de la France.

Le glossaire

AIE	Agence internationale de l'énergie
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ATR	Accès des tiers au réseau
BECCS	<i>Bionergy with carbon capture and storage</i> (bioénergie avec captage et stockage du carbone)
BECSC	Bioénergie avec captage et stockage du carbone
CAPEX	<i>Capital expenditure</i> (dépenses d'investissement)
CCfD	<i>Carbon contract for difference</i> (contrat carbone pour la différence)
CBAM	<i>Cross border adjustment mechanism</i> (mécanisme d'ajustement carbone aux frontières)
CCS	<i>Carbon capture and storage</i> (captage et stockage du carbone)
CCU	<i>Carbon capture and utilization</i> (captage et recyclage du carbone)
CCUS	<i>Carbon capture, utilization and storage</i> (captage, stockage et utilisation du carbone)
CSVC	Captage, stockage et valorisation du carbone
DAC	<i>Direct air capture</i> (captage direct dans l'air)
DEMIBaC	Développement de briques technologiques et démonstrateurs et réalisations de premières industrielles associant l'offre et la demande
ETS	<i>Emission trading system</i> (système de permis d'émissions négociables)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNL	Gaz naturel liquéfié
GES	Gaz à effet de serre
MACF	Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières
OPEX	<i>Operational expenditure</i> (dépenses d'exploitation)
PIC	Projet d'intérêt commun
PEPR	Programme et équipements prioritaires de recherche
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
RFNBO biologique)	Renewable fuels of non-biological origin (carburants renouvelables d'origine non biologique)
SNBC	Stratégie nationale bas-carbone
SEQE-UE européenne	Système d'échanges de <i>quotas</i> d'émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne
ZIBaC	Zone industrielle bas-carbone

