

Captage, utilisation et stockage du CO₂ : levier clé pour décarboner l'industrie

Présentation de la Table ronde : enjeux et perspectives du captage et stockage du CO₂ Quels objectifs et solutions ? À quels coûts et échéances ? Quel cadre réglementaire ?

L'industrie française a divisé ses émissions de gaz à effet de serre par deux entre 1990 et 2020, grâce notamment à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Un effort supplémentaire est attendu, avec une nouvelle réduction de plus d'un tiers d'ici 2030.

Pour atteindre la cible de réduction de 2030 (de 72 MtCO₂eq à 45 entre 2022 et 2030), le captage, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS) constitue un levier de premier plan. Pour le GIEC et l'AIE, 15 % des efforts de réduction passeront par la mise en œuvre de la filière CCUS. Celle-ci permettra de capter les émissions incompressibles des industries difficiles à décarboner, en particulier celles de l'industrie lourde (sidérurgie, cimenterie, raffinage et chimie).

En France, le 23 juin dernier, le gouvernement a présenté les premières orientations de sa stratégie CCUS qui considère en priorité les 50 sites industriels les plus émetteurs.

Si la communauté scientifique, les industriels et les pouvoirs publics sont mobilisés pour mettre en place une filière industrielle dédiée au CCUS, il reste encore des défis importants :

- Quel cadre réglementaire pour un déploiement à grande échelle ?
- Quelles technologies de captage pour réduire les coûts énergétiques ?
- Quelles solutions de décarbonation suivant les secteurs industriels ?
- Quelles solutions de stockage et quelle appropriation sociétale ?

Ouverture par Pierre-Franck Chevet, Président d'IFPEN
Animée par Mickaele Le Ravalec, Directrice Économie et Veille, IFPEN

Avec la participation de :

- > **Maxime Butler**, Responsable du déploiement CCUS, Holcim
- > **Rachid Chennit**, Vice-Président Solutions bas carbone et gaz, Axens.
- > **Raphaël Huyghe**, Responsable de programme Captage et stockage du CO₂, IFPEN.
- > **Henri-Pierre Orsoni**, Chargé de mission, Coordination feuille de route de la décarbonation du territoire industriel de Dunkerque, Euraénergie.
- > **Julien Viau**, Chef du Bureau des marchés du carbone et de la décarbonation de l'industrie, Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

Avant la présentation des principales conclusions de cette table ronde, nous rappelons brièvement les actions déjà engagées par IFPEN, organisateur de cette rencontre qui a mobilisé environ 500 personnes.

L'IFPEN a effectivement apporté des contributions significatives dans les principaux thèmes du CCUS.

• Captage

IFPEN a développé différents procédés de captage. Les travaux de recherche ont progressivement abouti à la construction de pilotes industriels.

Le procédé DMX™ est dédié au captage du CO₂ dans les émissions des installations industrielles : centrales thermiques au charbon, cimenteries, aciéries, etc. Il vise à améliorer les performances des procédés classiques aux amines, qui présentent une forte consommation d'énergie pour la régénération du solvant. Une démonstration à l'échelle du pilote industriel sur du gaz sidérurgique réel est en cours de réalisation dans le cadre du projet européen 3D à Dunkerque. Le gain énergétique attendu est de l'ordre de 20 à 30 %. Après 1 an de tests, les promesses ont été tenues : le procédé permet de récupérer le CO₂ pur à 99,9 %. La prochaine étape sera la commercialisation.

IFPEN développe aussi un procédé de captage du CO₂ utilisant la combustion en boucle chimique (CLC, pour Chemical Looping Combustion). Ces travaux sont menés en partenariat avec TotalEnergies depuis 2008. La performance à grande échelle fait l'objet du projet sino-européen H2020 Cheers. L'opération d'une unité de démonstration de CLC est en cours en Chine.

• Utilisation / Valorisation

Le CO₂ peut également servir de matière première pour générer d'autres produits comme de l'éthylène ou encore des carburants synthétiques. Ces carburants, en général liquides dans des conditions ambiantes, sont faciles à transporter, à stocker et à utiliser ; ils représentent une voie d'avenir très prometteuse pour le transport aérien et maritime. Pour exemple, IFPEN contribue au projet Take Kair en association avec EDF, Axens et Holcim qui vise à construire un pilote en Pays de la Loire permettant de générer du e-kérosène dès 2028 à partir du CO₂ capté dans une cimenterie en Mayenne. La production initiale devrait être de 50 kt de e-kérosène par an. Elle sera achetée par Air France.

• Stockage

IFPEN a été très impliqué dans les projets européens sur le stockage géologique de CO₂ dans les années 2010. Cette expérience lui a permis de développer un savoir faire dans

le domaine des outils de surveillance et de la simulation numérique. Par exemple, IFPEN a développé un outil avec SEMM Logging qui permet d'établir la composition des fluides prélevés à différents endroits dans un aquifère.

Principales conclusions des interventions de la table ronde animée par Mickaele Le Ravalec (Directrice économie et veille, IFPEN)

Le sujet CCS (CCUS) n'est pas nouveau, puisque comme présenté ci-avant et comme le mentionne **Pierre-Franck Chevet**, président directeur général d'IFPEN, dans l'introduction du séminaire, il est en attente depuis une vingtaine d'années et revient sur le devant de la scène en raison de la nécessaire décarbonation de notre industrie. Des projets de CCS ont en effet été développés dès la fin des années 90 avec Sleipner (Norvège) en 1996 ou encore Snohvit (Norvège) en septembre 2007 et In Salah (Algérie) en 2004. Il faut néanmoins remarquer que le CCUS n'est que l'un des leviers à mettre en oeuvre parmi lesquels, selon l'AIE, on peut citer par ordre d'importance :

- Accroître l'efficacité et la sobriété des procédés, sujet majeur.
- Utiliser des renouvelables.
- CCUS.
- Hydrogène.

Le CCUS qui à partir du captage, va nécessiter ensuite transport, stockage voire transformation en produits et carburants n'est donc pas la voie prioritaire mais un complément essentiel pour la décarbonation de l'industrie qu'il est important de réactiver !

En France, 55 % des émissions industrielles de CO₂ proviennent de 50 sites industriels identifiés et cela représente 10 % des émissions françaises. Il faut signaler alors, selon Mickaele Le Ravalec, qu'après mise en oeuvre des solutions présentées ci-dessus, il reste des émissions dites incompressibles, c'est-à-dire qui ne peuvent être évitées. Celles-ci peuvent être compensées par des puits de carbone naturels (par ex., forêts) ou des puits de carbone technologiques (par ex., CCUS), objet de la présente réunion avec les avis des intervenants publics et privés suivants :

Selon **Julien VIAU** (Chef du Bureau des marchés du carbone et de la décarbonation de l'industrie, Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires), la révision du marché du carbone, la quantification des enjeux de la décarbonation industrielle ont conduit à une révision de la stratégie CCUS par l'État publiée en 2023. Celle-ci doit donc être mise en oeuvre rapidement pour répondre à **l'objectif de décarbonation de l'industrie de 10 MTONNES en 2030 et de 20 MTONNES en 2050, et ceci prioritairement par les industries du ciment, de l'ammoniac, du raffinage, de la sidérurgie, ...**

Pour ces industries, si le captage est envisagé sur site, le stockage est proposé au niveau européen en l'absence de capacités de stockage installées en France. Certains sites sont néanmoins examinés dans la région de Lacq, dans le bassin parisien et offshore en prévision d'un stockage national à l'horizon 2030.

La stratégie de finalisation du transport qui en résulte (les règlements d'exportation en direction de la Norvège, des Pays-Bas, du Danemark, des pays méditerranéens, l'analyse

des différents éléments de régulation et de financement des transports) devrait être mise en place au cours de l'année 2024.

Un exemple d'application est alors décrit par Henri Pierre **ORSONI** (Chargé de mission, Coordination feuille de route de la décarbonation du territoire industriel de Dunkerque, Euraénergie), la zone industrielle bas carbone de Dunkerque-Hauts de France. Cette zone comporte 2 axes d'activités, la première de sites à décarboner et la deuxième de développement de chaînes de valeur décarbonées.

Concernant les émissions de CO₂, un abattement de CO₂ de 30 % est envisagé pour 2030 et une neutralité carbone pour 2050.

Pour atteindre ces objectifs à terme, les progrès techniques et le CCS devraient contribuer respectivement à hauteur de 75 % et de 25 %. La feuille de route comporte donc 3 grandes familles de leviers :

- 1) Sobriété et efficacité, ruptures technologiques, électrification et production d'hydrogène.
- 2) Circularité des matières, recyclage de l'acier et de l'aluminium.
- 3) Captage et stockage/utilisation du CO₂ (CCS/CCU).

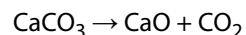
L'exécution comporte 15 projets de décarbonation ; un déjà autorisé, six autres à autoriser en 2024, les suivants en examen pour autorisation. L'ensemble conduira à une suppression de CO₂ de 8 MT en 2030 et de 6 MT supplémentaires en 2033 si tous les verrous de financement, techniques et administratifs sont levés en temps utile !

À ce jour et concernant les projets CCS, les actions suivantes sont en réalisation :

- un projet de captage industriel « Dartagnan » (site Arcelor) est en réalisation ;
- la création d'un Hub CO₂ avec un réseau d'infrastructures pour expédition ;
- un stockage temporaire avant transport ;
- la collecte et le captage de CO₂ sur le port de Dunkerque par GRT gaz.

Si tous les verrous de financement, techniques et administratifs ne sont pas levés en temps utile, l'échéance de ces actions glissera vers les années 2033-2035 !

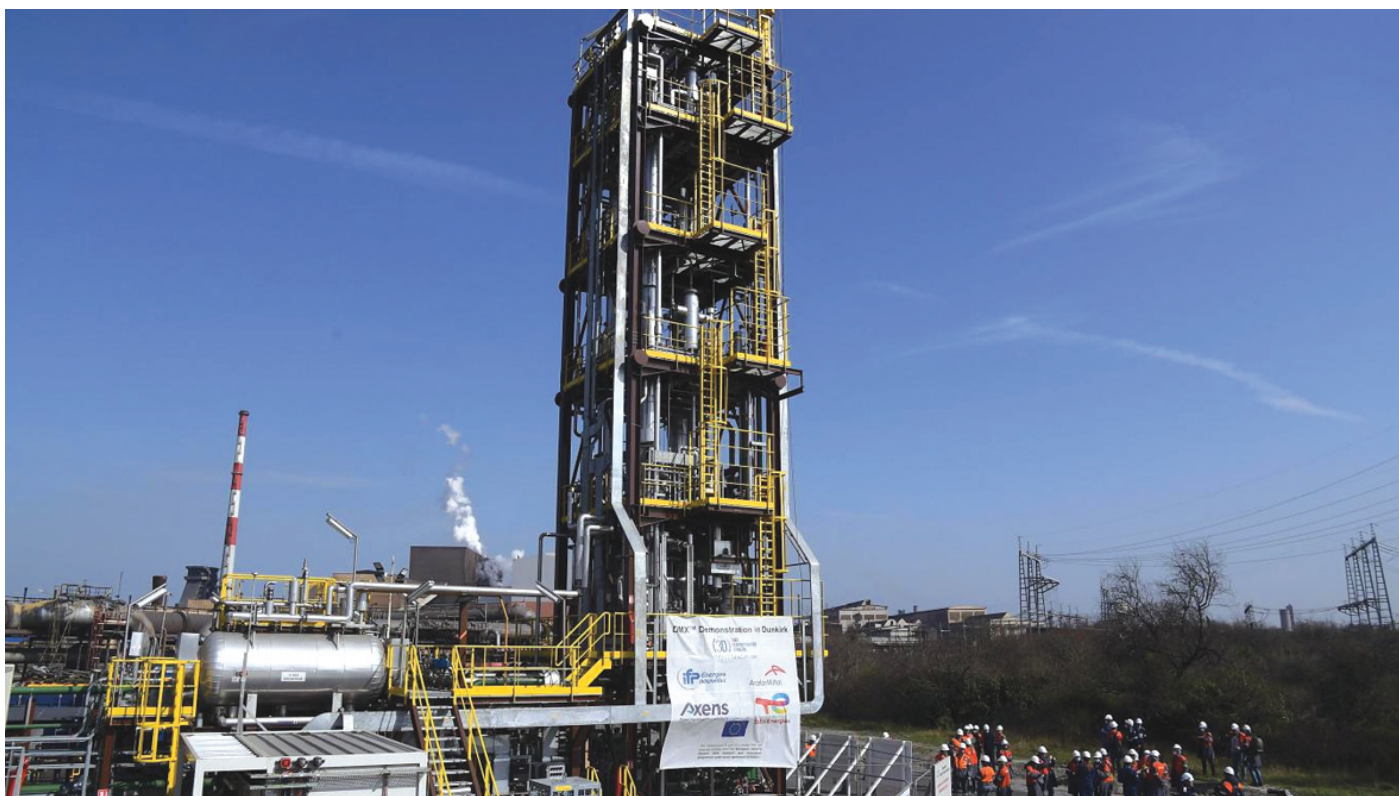
Le point de vue d'un industriel du ciment apporte un éclairage particulier : Maxime **BUTLER** (responsable du déploiement CCUS de la société HOLLCIM) présente la particularité de ce secteur industriel. La principale réaction de transformation du carbonate de calcium (calcaire) en oxyde de calcium, principal composant du ciment est accompagnée de la production de gaz carbonique.



2/3 du CO₂ vient donc de la matière première et 1/3 vient de l'énergie nécessaire (combustibles) pour réaliser la réaction.

Les principales actions spécifiques envisagées pour atteindre un procédé plus performant sont partiellement différentes :

- 1) Sobriété : moins de béton dans la construction et moins de ciment dans le béton.
- 2) Accroître l'efficacité énergétique du procédé/utiliser des déchets comme combustibles-biomasse.
- 3) Choix de matières premières décarbonées disponibles sur sites (15 %).
- 4) CCUS : captage, stockage et utilisation du gaz carbonique.



HOLCIM est engagé dans cette action CCUS, incontournable pour les cimentiers de façon à ce qu'un projet démarre en 2028 et qu'une installation d'abattement de CO₂ démarre en 2030. Pour cela, un engagement financier « maison » de 2 milliards d'euros est programmé et devra être accompagné de soutiens nationaux et Européens (dossiers en cours).

À cela et comme les cimentiers ne peuvent éviter la production de CO₂, Maxime Butler ajoute quelques attendus spécifiques concernant les exutoires à CO₂ ; stockage et transformation en produits et carburants. La profession souhaiterait en effet pour répondre au « net zero industry act » et à un abattement CO₂ de 50 MT/an :

- un exutoire prioritaire ;
- le développement rapide des infrastructures « Connecting Europe Facilities » : hub de liquéfaction, transport en pays nordiques, stockage offshore.

Raphael HUYGHE (responsable du programme captage et stockage du CO₂ à l'IFPEN), aborde ensuite « les besoins d'innovation » pour optimiser les procédés CCUS et abaisser les coûts.

Les émissions de gaz carbonique aujourd'hui de l'ordre de 450 MT/an, pourraient être respectivement à 1 GT et 6 GT en 2030 et 2050.

L'IFPEN étudie depuis au moins deux décennies des technologies innovantes de captage-compression, stockage, transport, utilisations de CO₂, la première étape de captage étant la plus coûteuse du procédé global (plus de 60 %). En partenariat avec AXENS, un procédé de captage avec des solvants innovants

(DMX) est maintenant proposé et un démonstrateur est en cours d'installation sur le site Arcelor-Mittal à Dunkerque (mise en service en 2024) comme mentionné plus haut.

Les travaux de recherche-innovation sont parallèlement poursuivis pour i) la formulation de solvants biosourcés et ii) l'extraction de CO₂ d'effluents à basse teneur voire de l'air (DAC : direct air capture). Pour ce dernier acte fortement recommandé, une technologie de rupture est nécessaire.

Si le captage est un enjeu majeur, il ne faut pas négliger pour autant le stockage, le deuxième enjeu majeur. Pour cela il faut continuer d'identifier et d'évaluer les sites de stockage (ou qu'ils soient, mais particulièrement en France) avec des outils expérimentaux de nouvelle génération.

La nécessaire approche collaborative sur des sujets comme le CCUS est confirmée et jugée essentielle par Rachid **CHENIT** (Vice-président Solutions bas carbone et gaz, AXENS). C'est à partir du savoir-faire acquis par IFPEN que la société AXENS a pu développer le procédé industriel DMX avec des solvants, à base d'amines, robuste et fiable. La poursuite des travaux est nécessaire pour des développements spécifiques en fonction d'une part de l'origine des émissions de CO₂ et d'autre part des étapes ultérieures de prétraitement, de conditionnement et des utilisations envisagées.

Joel BARRAULT* et **Mickaele LE RAVALEC**
*joel2.barrault@gmail.com