

Les opportunités offertes par le CCUS pour décarboner l'industrie française

Par Benoît LEGAIT

Ingénieur général des Mines honoraire

Dans l'industrie, le captage et le stockage du CO₂ intéressent surtout la sidérurgie et l'industrie cimentière, et permettent des émissions « négatives » pour le gaz carbonique issu de la combustion de la biomasse. En 2050, une quinzaine de Mt CO_{2eq} devraient être captées et stockées, sous réserve de lever plusieurs freins. L'utilisation de CO₂ semble surtout prometteuse pour favoriser la croissance des cultures et pour la fabrication d'éthanol ; elle nécessite encore d'accroître les efforts en matière de R&D.

Pour permettre d'atteindre la neutralité carbone en 2070, l'Agence internationale de l'énergie (AIE)¹ prévoit une augmentation très significative des capacités annuelles de captage du CO₂ : 600 millions de tonnes captées à l'horizon 2030, plus de 4,4 milliards en 2050 et environ 6,9 milliards en 2070. Ces chiffres peuvent sembler bien élevés, car la quantité de CO₂ captée est aujourd'hui de seulement 35 millions de tonnes par an. Le CO₂ capté peut être soit stocké (CCS²), soit valorisé : le sigle CCUS³ recouvre ces deux voies. Le coût du captage et du stockage du CO₂ oscille entre 50 et 200 €/tonne de CO₂ selon l'IFPEN, dont 60 à 70 % de ce coût pour le seul captage, tandis que l'accès à un nombre réduit de sites de stockage géologique limitent le déploiement de cette technologie (l'Ademe⁴ considère que seules les zones proches de Dunkerque et du Havre, en raison d'un accès potentiel aux sites de stockage en mer du Nord, et l'ancien gisement de gaz de Lacq sont propices au CCS en France).

Pour la France, la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC)⁵ estime que le CCS permettra essentiellement la réduction des émissions résiduelles des procédés industriels et la génération d'émissions négatives liées à la combustion de la biomasse. Par rapport à un potentiel de 40 à 50 Mt CO_{2eq} par an en 2050, seules environ 15 Mt CO_{2eq} devraient être effectivement stockées chaque année à compter de cette

date, car il ne sera pas possible d'équiper tous les sites. La consultation des comités stratégiques de filières par la DGEC en début d'année 2020 sur leurs intentions en matière de réduction des émissions de GES a montré que les industries sidérurgiques et cimentières avaient les projets les plus avancés en matière de captage, de stockage et de valorisation du CO₂ (CCUS).

Cet article va donc examiner pour ces trois secteurs là où le CCUS semble aujourd'hui avoir le plus d'avenir en France : la sidérurgie, l'industrie cimentière ou la bioénergie avec CCS. Les voies d'utilisation du CO₂ à des fins purement énergétiques (méthanation, e-fuels...) sans CCS dépassent le cadre de cet article.

La sidérurgie

Selon le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA)⁶, la métallurgie a émis environ 16,8 Mt CO_{2eq} en 2018, soit 21 % des gaz à effet de serre (GES) produits par l'industrie française manufacturière et de la construction (80 Mt CO_{2eq}), soit environ 3,8 % des émissions françaises (445 Mt CO_{2eq}). La production française d'acier brut en 2018 a été de 15,4 Mt.

Dans le scénario « Avec mesures supplémentaires » (AMS) de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), les objectifs de réduction des émissions de GES fixés à la sidérurgie jusqu'en 2050 sont similaires à ceux de l'industrie française dans son ensemble : - 20 % en 2025 par rapport à 2015, - 31 % en 2030 et - 80 % en 2050. En comparaison, les réductions des émissions de GES évaluées par le Sustainable development

¹ "Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage", Agence internationale de l'énergie, septembre 2020.

² CCS : Carbon capture and storage.

³ CCUS : Carbon capture, utilization and storage.

⁴ EL KHAMLICHI Aïcha, GOURDON Thomas & PADILLA Sylvie (2020), *Le captage et le stockage géologique de CO₂ (CSC) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles*, Ademe, juillet.

⁵ HAJJAR Joseph (2020), *The French long term strategy and the role of CCS*, DGEC.

⁶ CITEPA, « Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques – Bilan des émissions en France de 1990 à 2018 », édition juin 2020.

scenario (SDS) de l'AIE⁷ à l'échelle mondiale sont plus faibles : - 4 % en 2025 par rapport à 2019, - 11 % en 2030 et - 54 % en 2050. Il peut se concevoir que les « pays développés » puissent être plus ambitieux que les autres, dans la mesure où les technologies mises en œuvre ne conduisent pas à des coûts qui pousseraient leurs productions industrielles hors du marché par manque de compétitivité.

Les émissions de GES de la sidérurgie française diminuent régulièrement d'environ 2,3 % par an et celles de la production d'acier brut française d'environ 1 % par an depuis 2001. La profession a ainsi réussi à faire baisser les émissions de CO_{2eq} de ses unités de production d'acier brut d'environ 1 % par an. Les objectifs de la SNBC pour la métallurgie sont donc environ deux fois plus élevés que les tendances observées dans le passé.

La production de l'acier se fait selon trois filières principales⁸ :

- les hauts-fourneaux réduisent⁹ le minerai de fer en brûlant du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur pour produire de la fonte. L'essentiel des émissions de CO₂ d'une usine de production viennent de l'étape de réduction du minerai de fer grâce au carbone dans le haut-fourneau, car cette dernière émet obligatoirement du CO₂ : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3/2 \text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + 3/2 \text{CO}_2$. Cette filière produit environ 64 % de l'acier français¹¹, soit environ 10 Mt/an, et émet l'essentiel des GES de la filière sidérurgique ;
- les fours électriques sont alimentés par des ferrailles récupérées qui sont fondues à l'aide d'un arc électrique formé entre trois électrodes en graphite ;
- les fonderies permettent de fondre des ferrailles récupérées pour réaliser des pièces moulées et des alliages.

Le comité stratégique de filière Mines et métallurgie a identifié plusieurs leviers pour réduire les émissions de GES dans le secteur de la sidérurgie : l'efficacité énergétique ; l'augmentation du taux de recyclage de la ferraille ; l'utilisation de sources carbonées circulaires pouvant être recyclées dans les hauts-fourneaux à la place du charbon fossile ; l'utilisation des sources carbonées circulaires, notamment le gaz issu des hauts-fourneaux, pour générer de l'éthanol ou d'autres composés précurseurs de l'industrie des polymères ; le captage et le stockage du carbone issu des hauts-fourneaux ; l'injection d'agents réducteurs (charbon de bois, granulés de plastique ou de combustible solide de récupération) ; ou encore la réduction du minerai de fer par électrolyse, par gaz naturel ou par hydrogène.

⁷ AIE, *Energy Technology perspectives*, 2020.

⁸ Ademe, *Transition industrielle – Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production*, mai 2020.

⁹ Opération par laquelle on extrait d'un oxyde le métal qu'il renferme, en éliminant l'oxygène.

¹⁰ Le minerai de fer peut être du Fe₂O₃ ou du Fe₃O₄.

¹¹ Observatoire de la métallurgie, « La sidérurgie en France », 8 mars 2019.

Certaines de ces technologies sont matures (comme l'efficacité énergétique ou l'augmentation du taux de recyclage), d'autres nécessitent des efforts supplémentaires en matière de R&D et des pilotes pour optimiser les procédés et en réduire les coûts : c'est le cas du CCS et du CCUS.

Voici deux exemples :

- le captage et le stockage du carbone pourraient réduire les émissions CO_{2eq} d'environ 1 Mt/an à partir de 2026. L'IFPEN, ArcelorMittal, Axens et Total, en coopération avec plusieurs autres partenaires et avec le soutien de la Commission européenne, mènent un projet de démonstrateur d'un procédé innovant de captage du CO₂ par post-combustion. Ce projet, DMXTM Demonstration in Dunkirk, doté d'un budget de près de 20 M€ sur quatre ans, vise à démontrer l'efficacité de ce procédé à l'échelle d'un pilote, à préparer la mise en place d'une première unité industrielle sur le site ArcelorMittal de Dunkerque (avec pour objectif de capter plus d'un million de tonnes de CO₂ par an à partir de 2025) et, enfin, à concevoir le futur pôle européen de Dunkerque – Mer du Nord, qui pourrait permettre de capter, de conditionner, de transporter et de stocker 10 millions de tonnes de CO₂ par an à l'horizon 2035. Ce pôle s'appuierait sur les infrastructures de conditionnement et de transport servant au stockage du CO₂ en mer du Nord dans des couches géologiques adaptées, des infrastructures qui ont été mises en place dans le cadre d'autres projets, comme celui de Northern Lights ;
- l'utilisation des sources carbonées circulaires pour générer de l'éthanol ou d'autres composés précurseurs de l'industrie des polymères pourrait réduire les émissions CO_{2eq} d'environ 0,6 Mt/an à partir de 2026. ArcelorMittal développe à Gand (Belgique) un démonstrateur industriel, baptisé Carbalyst®, qui, doté d'un budget de 120 M€, est destiné à capturer les gaz résiduels de son haut-fourneau, et à les convertir en éthanol, qui pourra être utilisé comme carburant dans les transports ou comme précurseur des plastiques, en substitution aux hydrocarbures.

L'industrie du ciment

En 2019, les émissions de GES dues à la fabrication de minéraux non métalliques et matériaux de construction¹² représentaient 18,2 Mt CO_{2eq}, soit 23 % des émissions totales de l'industrie (qui s'élevaient à 78,3 Mt CO_{2eq}) et 4 % des émissions nationales (qui atteignaient 440,7 Mt CO_{2eq}). Ces émissions affectent particulièrement l'empreinte carbone du secteur du bâtiment. Les minéraux non métalliques comprennent les verres, les ciments, la chaux, les plâtres, les bétons, les matériaux de construction en terre cuite et les enrobés pour route. Les émissions de GES de la seule industrie cimentière représentent 59 % (chiffre 2015) de celles dues à la fabrication de minéraux non métalliques. La production française de ciment¹³ a été en 2018 de 16,8 Mt.

¹² CITEPA-format SECTEN, *Données par secteur*, édition 2020.

¹³ Infociment, « L'Essentiel, les chiffres clés », rapports 2010 à 2019.

Le scénario AMS de la SNBC prévoit une réduction de 24 % des émissions de GES liées à la production de minéraux non métalliques en 2030 par rapport à 2015 ; celle-ci serait portée à 85 % en 2050. Au niveau mondial, le scénario Sustainable Development de l'AIE anticipe une dynamique de réduction plus lente pour les émissions de GES de l'industrie du ciment : - 14 % en 2030 et - 62 % en 2050 par rapport à 2019.

Les émissions de CO₂ générées lors de la production de ciment proviennent de deux sources :

- la combustion des énergies fossiles, qui est nécessaire pour porter les fours des cimenteries à haute température (1 450°C) afin de cuire le clinker, émet environ 40 % des GES de la production considérée ;
- la calcination du carbonate de calcium en oxyde de calcium lors de la cuisson du clinker, qui est composé à 80 % de calcaire et à 20 % d'aluminosilicates (ou argiles). Sous la chaleur (à partir de 800°C), le carbonate de calcium se transforme en oxyde de calcium et émet du CO₂, selon la réaction $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Cette étape de « clinkérisation » est responsable d'environ 60 % des émissions de GES de la production de ciment.

Au total, la fabrication d'une tonne de ciment émet environ 800 kg de CO₂. L'objectif de la filière est de faire chuter ce chiffre à 130 kg en 2050¹⁴. La mise en place d'un mécanisme d'ajustement aux frontières devrait réduire la tentation de cimentiers européens de produire le clinker en dehors de l'UE et de l'importer pour en faire du ciment.

Le comité stratégique de filière Industries pour la construction a identifié plusieurs leviers pour diminuer les émissions de GES en retenant deux approches différentes : émettre moins de CO₂ par tonne de ciment produite ou bien utiliser moins de ciment. Les principaux leviers d'action sont les suivants : élaborer des ciments à plus faible teneur en clinker, ou cuits à basse température ; augmenter le taux de substitution des combustibles fossiles par des déchets énergétiques ou de la biomasse ; améliorer l'efficacité énergétique ; capter et stocker le carbone ; carbonater le béton ; réduire l'empreinte carbone du m² construit ; ou encore recycler les granulats.

Le CCS, qui pourrait commencer à être mis en œuvre à partir de 2030 en France, réduirait les émissions de 5,6 Mt CO_{2,eq}. À horizon 2050, dans le scénario STEPS¹⁵, l'AIE anticipe que le CCS permettra de réduire de 40 % les émissions mondiales du secteur. Néanmoins, la dispersion des cimenteries sur le territoire national et l'absence d'offre de stockage géologique dans le sous-sol métropolitain (hormis peut-être le site de Lacq) rendront le transport du CO₂ plus coûteux, en dehors des trois territoires identifiés par l'Ademe¹⁶.

¹⁴ « L'acier, le ciment et l'aluminium, en route vers la neutralité carbone », *Enjeux*, n°404, mai 2020.

¹⁵ Scénario STEPS – Stated Policies Scenario, qui prend en compte les mesures annoncées par les autorités en matière de climat.

¹⁶ Les Hauts-de-France, la Normandie et la Nouvelle-Aquitaine.

Plusieurs voies d'utilisation du CO₂ émis lors de la fabrication du ciment sont explorées :

- les silicates de calcium du ciment peuvent réagir avec le CO₂ pour former des carbonates de calcium. Le procédé consiste à faire durcir le mélange ciment-eau-granulats injecté dans du béton frais en l'exposant à un gaz riche en CO₂. Deux entreprises nord-américaines, CarbonCure et Solidia Technologies, sont leaders dans ce domaine ;
- un autre procédé consiste à accélérer la carbonatation naturelle des bétons, qui est un processus très lent. Les granulats recyclés, notamment les parties fines, incorporent de la portlandite et des silicates hydratés qui peuvent être carbonatés plus rapidement que le béton, sous forme d'injection dans les structures. C'est l'objet du projet français FastCarb¹⁷ ;
- des matériaux de construction peuvent être fabriqués à partir de CO₂ et de déchets (scories de fer, cendres volantes de charbon, résidus de bauxite...). Le projet français Carboval vise à utiliser la minéralisation de scories de nickel par CO₂ comme matériau de construction ;
- l'augmentation du rendement des cultures grâce au CO₂ (production d'algues, cultures sous serre...) peut être significative, pouvant aller jusqu'à 25 à 30 %. Dans le cadre du projet Cimentalgue, la société nazairienne Algosource Technologies a prévu d'installer différents systèmes de culture de microalgues à proximité d'une cimenterie Vicat.

La bioénergie avec CCS

La bioénergie avec captage et stockage du CO₂ (BECCS) peut se résumer ainsi : la biomasse absorbe le CO₂ de l'atmosphère par photosynthèse pendant le processus de pousse des plantes. Puis la biomasse est brûlée pour produire de l'énergie ou convertie en biocarburant en utilisant des processus de fermentation. Enfin, le CO₂, produit pendant la combustion ou la conversion, est capturé et stocké. Les émissions totales de CO₂ générées sur l'ensemble de cette chaîne sont comptabilisées comme négatives, si le volume de CO₂ stocké est supérieur à celui de CO₂ émis lors de la production, du transport, de la conversion et de l'utilisation de la biomasse.

Actuellement, cinq installations dans le monde utilisent des technologies de type BECCS. Ensemble, ces installations captent environ 1,5 million de tonnes de CO₂ par an. La seule installation de BECCS de grande dimension est située dans l'Illinois, elle produit à grande échelle de l'éthanol à partir de maïs. Le CO₂ émis par le processus de fermentation est capté (jusqu'à 1 million de tonnes par an) et envoyé dans un stockage géologique dédié situé en profondeur sous l'installation. Les quatre autres installations BECCS aujourd'hui en fonctionnement sont des usines de production à petite échelle d'éthanol, le CO₂ émis lors de l'opération étant utilisé pour la récupération assistée du pétrole : il s'agit de Kansas Arkalon (aux États-Unis), de Bonanza CCS et de Farnsworth (toutes deux, elles aussi, situées

¹⁷ Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé.

aux États-Unis) et de Husky Energy CO₂ Injection (au Canada). Trois autres projets de BECCS sont en cours de développement : la centrale électrique de Mikawa (au Japon), la centrale électrique de Drax (au Royaume-Uni) et Klemetsrud, une unité de valorisation énergétique des déchets (en Norvège).

L'AIE estime que le BECCS permettra de générer près de 3,3 Gt d'émissions négatives de CO₂ en 2100. Le coût du CO₂ évité varie entre 15 et 400 \$/tonne, en fonction de la technologie utilisée (la moins chère étant la voie éthanol) et de son implantation dans des zones propices (accès aisé à des sites de stockage, notamment).

Conclusion

Le CCS (y compris le BECCS) devrait permettre une réduction d'environ 15 Mt/an des émissions de GES de l'industrie française (par rapport à un volume d'émissions de 78 Mt en 2019), en 2050. Divers handicaps devront être levés au préalable : pallier le manque de structures opérationnelles de stockage géologique sur le territoire métropolitain ou à proximité, l'insuffisance des infrastructures de transport, réduire le coût du CCS, vaincre les réticences de la population, instaurer un prix du carbone évolutif... Les procédés d'utilisation du CO₂ font encore l'objet de travaux de R&D. L'AIE estime que la quantité de CO₂ utilisée à l'échelle mondiale en 2060 ne devrait représenter que quelques pourcents de celle qui sera stockée dans des structures géologiques.