

Décarbonation industrielle à Dunkerque : oxycombustion

Janv.
2024



AAP ZIBAC - 3.1.9 - Dkarbonation -
Synthèse publique - GRDF

1. Contexte stratégique et articulation avec le programme ZIBAC

L'étude s'inscrit dans le cadre du programme ZIBAC (Zones Industrielles Bas Carbone) intégré au plan d'investissement France 2030, doté de 54 milliards d'euros pour accélérer la transition écologique et industrielle. L'objectif du programme est d'accompagner les territoires industriels fortement émetteurs dans leur trajectoire de décarbonation tout en renforçant leur compétitivité économique. La zone industrialo-portuaire de Dunkerque constitue un territoire prioritaire dans cette stratégie nationale puisqu'elle représente environ 20 % des émissions industrielles françaises, soit près de 13,7 Mt de CO₂ par an.

Dans ce contexte, les industriels du territoire ont engagé différentes démarches pour réduire leur empreinte carbone. Les principales stratégies identifiées reposent sur plusieurs leviers complémentaires tels que l'efficacité énergétique, l'évolution du mix énergétique, l'adoption de nouvelles technologies industrielles et le développement de solutions de captage et de valorisation du carbone. L'oxycombustion s'inscrit précisément dans cette dernière catégorie puisqu'elle vise à produire de la chaleur industrielle tout en facilitant la capture du CO₂ émis lors de la combustion.

L'étude commandée par GRDF a pour objectif d'évaluer la faisabilité technique et économique du déploiement de chaudières à oxycombustion dans la zone industrielle de Dunkerque. Elle vise également à identifier les synergies possibles entre acteurs industriels afin de structurer une chaîne de valeur locale intégrant l'approvisionnement en oxygène et la valorisation du CO₂ capté.

Cette analyse s'inscrit en complément d'autres expérimentations industrielles déjà engagées dans le cadre du programme ZIBAC, notamment un projet pilote sur la plateforme de Villers-Saint-Paul dont les essais industriels sont prévus à partir de 2025.

2. Objectifs de l'étude et méthodologie d'analyse

L'étude vise à fournir à GRDF et aux acteurs industriels du territoire une vision claire du potentiel de la technologie d'oxycombustion pour la production de chaleur industrielle décarbonée. Elle s'intéresse en particulier aux applications liées à la production de vapeur qui représente près de 45 % des volumes de gaz distribués par GRDF dans l'industrie, ce qui en fait un levier majeur de réduction des émissions.

La méthodologie adoptée repose sur trois axes principaux. Le premier consiste à réaliser un benchmark technologique des solutions nécessaires à la mise en œuvre de l'oxycombustion, incluant les systèmes de séparation de l'oxygène, les technologies de captage du CO₂ et les dispositifs de traitement des fumées. Le second axe porte sur l'analyse territoriale de la zone industrielle de Dunkerque afin d'identifier les industriels susceptibles d'utiliser cette technologie ainsi que les acteurs pouvant fournir de l'oxygène ou valoriser le CO₂ capté. Le troisième axe vise à définir un plan d'action permettant le lancement d'un premier projet industriel et l'émergence progressive d'une filière locale d'oxycombustion.

Cette approche combine donc une analyse technologique globale et une étude spécifique du contexte industriel dunkerquois afin d'évaluer la pertinence réelle de cette solution dans un écosystème industriel donné.

3. Principe et fonctionnement des chaudières à oxycombustion

L'oxycombustion repose sur un principe simple mais structurant : remplacer l'air utilisé dans la combustion par de l'oxygène pur. Dans une combustion classique dite aéro-combustion, la présence d'azote dans l'air dilue les fumées et rend difficile la séparation du CO₂. À l'inverse, l'oxycombustion supprime quasiment l'azote du processus de combustion, ce qui permet d'obtenir des fumées composées majoritairement d'eau et de CO₂.

Cette caractéristique entraîne deux conséquences majeures. La première est l'augmentation significative de la concentration de CO₂ dans les fumées, qui peut être huit à neuf fois plus élevée que dans une combustion classique. La seconde est la réduction de certains polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote, puisque l'azote est largement absent du mélange réactionnel.

L'oxycombustion constitue ainsi l'une des trois grandes méthodes de captage du carbone à la source avec la précombustion et la postcombustion. Elle est historiquement utilisée dans certains procédés industriels nécessitant des températures élevées comme la sidérurgie ou la verrerie et fait aujourd'hui l'objet de recherches approfondies pour la production d'énergie et de vapeur industrielle.

Toutefois, cette technologie présente une contrainte majeure : la nécessité de disposer d'un approvisionnement en oxygène pur, dont la production peut être énergivore et coûteuse.

4. Architecture technologique d'un système d'oxycombustion

Un système de chaudière à oxycombustion repose sur trois fonctions techniques principales. La première concerne l'approvisionnement en oxygène nécessaire au processus de combustion. Celui-ci peut être produit directement sur site grâce à une unité de séparation d'air, livré par un fournisseur industriel ou récupéré comme coproduit d'un autre procédé industriel tel que l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène.

La seconde fonction correspond au système de combustion lui-même, c'est-à-dire la chaudière et son brûleur spécifique. La combustion en oxygène pur génère des températures plus élevées que la combustion classique. Afin de préserver les équipements, il est nécessaire d'intégrer une boucle de recirculation des fumées qui permet de réduire la température de flamme et de stabiliser la combustion.

La troisième fonction concerne le traitement des fumées afin de récupérer le CO₂ dans des conditions compatibles avec son utilisation industrielle ou son stockage. La composition finale des fumées dépend de plusieurs facteurs tels que la pureté de l'oxygène utilisé, la composition du combustible et les caractéristiques du brûleur.

Ces différentes briques technologiques constituent l'infrastructure nécessaire au déploiement de l'oxycombustion à l'échelle industrielle.

5. Technologies d'approvisionnement en oxygène

L'approvisionnement en oxygène représente un élément structurant du modèle économique de l'oxycombustion. Plusieurs technologies sont aujourd'hui disponibles pour produire de l'oxygène à partir de l'air. La séparation cryogénique constitue la solution la plus mature pour les applications industrielles de grande échelle. Elle repose sur la liquéfaction de l'air suivie d'une distillation fractionnée permettant de séparer l'oxygène de l'azote. Cette technologie garantit une très haute pureté de l'oxygène mais nécessite une consommation énergétique importante.

Les procédés d'adsorption représentent une alternative pour des installations de taille moyenne. Ils reposent sur l'utilisation de matériaux capables de retenir sélectivement certaines molécules de gaz avant de les libérer lors d'un cycle de régénération. Ces technologies sont plus adaptées à des volumes limités mais peuvent être moins performantes pour des applications à grande échelle.

Les technologies membranaires constituent une autre voie de séparation basée sur la diffusion différentielle des gaz à travers une membrane semi-perméable. Elles sont généralement plus simples et moins coûteuses que la cryogénie mais produisent souvent un air enrichi en oxygène plutôt que de l'oxygène pur.

Enfin, les boucles chimiques représentent une technologie encore expérimentale qui combine la séparation de l'oxygène et la combustion dans un même processus grâce à des cycles d'oxydoréduction impliquant des matériaux métalliques. Cette approche reste cependant au stade de recherche et développement.

6. Technologies de captage et de traitement du CO₂

Le captage du CO₂ constitue l'objectif principal de l'oxycombustion. Plusieurs méthodes de captage existent selon l'étape du procédé dans laquelle elles sont appliquées. La précombustion consiste à transformer le combustible en un gaz riche en hydrogène et en CO₂ avant la combustion. La postcombustion consiste à extraire le CO₂ des fumées après la combustion. L'oxycombustion se distingue en produisant directement des fumées fortement concentrées en CO₂.

Les technologies de séparation du CO₂ comprennent principalement l'absorption chimique, l'adsorption solide, les membranes sélectives et les procédés cryogéniques. Dans le cas des chaudières industrielles, la forte concentration en CO₂ obtenue grâce à l'oxycombustion simplifie considérablement les opérations de capture par rapport aux systèmes de postcombustion.

Le traitement des fumées dépend ensuite de l'usage final du CO₂. Pour certaines applications industrielles ou alimentaires, des niveaux de pureté très élevés sont requis. Dans d'autres cas, le CO₂ peut être liquéfié puis transporté pour être stocké ou valorisé dans d'autres procédés industriels.

7. Opportunités industrielles sur la zone de Dunkerque

L'analyse du territoire dunkerquois montre que de nombreux industriels utilisent de la vapeur dans leurs procédés, ce qui constitue une condition préalable au déploiement de chaudières à oxycombustion. Les applications ciblées concernent généralement des installations dont la puissance thermique se situe entre 1 et 20 MW.

Les industries agroalimentaires apparaissent particulièrement pertinentes pour l'intégration de cette technologie car elles combinent plusieurs caractéristiques favorables. Elles utilisent de la vapeur dans leurs procédés, consomment du CO₂ dans certaines étapes de production et peuvent parfois également utiliser de l'oxygène dans leurs opérations industrielles.

Les entretiens réalisés avec plusieurs industriels de la région confirment une volonté forte de réduire les émissions de carbone. Toutefois, les entreprises envisagent plusieurs solutions alternatives telles que la biomasse, l'électrification ou la récupération de chaleur fatale. Dans ce contexte concurrentiel, l'oxycombustion apparaît particulièrement adaptée aux sites nécessitant une forte flexibilité opérationnelle ou confrontés à des contraintes d'approvisionnement électrique.

8. Valorisation et débouchés du CO₂ capté

La valorisation du CO₂ constitue un facteur déterminant pour la viabilité économique d'un projet d'oxycombustion. Plusieurs industries locales utilisent déjà du CO₂ dans leurs procédés, notamment pour la production de boissons gazeuses, la conservation alimentaire ou la fabrication de neige carbonique.

Le prix du CO₂ sur le marché varie généralement entre 150 et 200 € par tonne selon la qualité requise et l'usage final. Dans le cas d'une chaudière à oxycombustion d'environ 5 MW, la valorisation du CO₂ capté pourrait représenter plus d'un million d'euros de revenus par an, ce qui constitue un levier économique significatif pour les projets industriels.

Par ailleurs, des solutions de stockage géologique du CO₂ sont en développement en Europe, notamment le projet Northern Lights en mer du Nord. Ce type d'infrastructure pourrait à terme offrir une solution de séquestration à grande échelle pour les émissions industrielles captées.

9. Projet pilote envisagé chez Coca-Cola

L'étude identifie un premier projet potentiel de chaudière à oxycombustion sur le site de Coca-Cola situé à Dunkerque. Ce site industriel produit environ 370 références de boissons sur plusieurs lignes de production nécessitant de la vapeur pour les opérations de nettoyage et de stérilisation.

La demande thermique du site varie fortement, avec des besoins pouvant passer de 1,8 à 15 MW en moins de trois minutes, ce qui nécessite une grande flexibilité de production de vapeur. Cette contrainte rend certaines alternatives énergétiques difficiles à mettre en œuvre, ce qui renforce l'intérêt potentiel de l'oxycombustion.

Le site consomme également environ 6 500 tonnes de CO₂ par an pour la gazéification des boissons et l'inertage des lignes de production. Le projet envisagé consiste à convertir une chaudière existante en système d'oxycombustion afin de capturer le CO₂ émis et de le réutiliser dans les procédés industriels du site après purification.

10. Perspectives de développement d'une filière oxycombustion

La mise en place d'une filière d'oxycombustion sur la zone industrielle de Dunkerque nécessite la coordination de plusieurs acteurs industriels. Il est indispensable de structurer simultanément l'approvisionnement en oxygène, la production de chaleur industrielle et la valorisation du CO₂ capté.

À court terme, l'approvisionnement en oxygène pourrait être assuré par les fournisseurs industriels déjà présents sur le territoire, notamment Air Liquide. À moyen terme, des alternatives pourraient émerger grâce à la valorisation de l'oxygène coproduit par des électrolyseurs destinés à la production d'hydrogène ou par la mise en place d'unités de séparation d'air mutualisées.

Le développement d'un premier projet pilote constitue un levier essentiel pour démontrer la viabilité de cette technologie et susciter l'intérêt d'autres industriels. L'accompagnement de ce projet ainsi que la structuration progressive d'un réseau d'acteurs industriels pourraient permettre l'émergence d'une véritable filière territoriale de décarbonation basée sur l'oxycombustion.

RÉSUMÉ

Cette étude analyse le potentiel de déploiement de chaudières à oxycombustion dans la zone industrielle bas carbone de Dunkerque, territoire émettant environ 13,7 Mt de CO₂ par an, afin d'accélérer la décarbonation des usages de chaleur industrielle. L'objectif est d'évaluer la faisabilité technique, économique et territoriale de cette technologie permettant de produire de la vapeur tout en facilitant la capture du CO₂ à la source.

Le principe repose sur la combustion du gaz avec de l'oxygène pur plutôt qu'avec de l'air, ce qui élimine l'azote du processus et génère des fumées fortement concentrées en CO₂, simplifiant ainsi les opérations de captage et de valorisation. L'étude examine les différentes briques technologiques nécessaires, notamment les solutions d'approvisionnement en oxygène, les technologies de traitement des fumées et les procédés de captage du CO₂.

L'analyse territoriale identifie les industries utilisant de la vapeur comme cibles prioritaires, en particulier les acteurs agroalimentaires capables de valoriser le CO₂ dans leurs procédés. Plusieurs options d'approvisionnement en oxygène sont étudiées, incluant les fournisseurs industriels existants, la production locale par unités de séparation d'air et la valorisation d'oxygène coproduit par l'électrolyse de l'hydrogène.

Les débouchés du CO₂ capté constituent un levier économique central. Les usages industriels locaux tels que la production de boissons gazeuses, la conservation alimentaire ou la fabrication de neige carbonique offrent des opportunités de valorisation, tandis que des solutions de stockage géologique du CO₂ pourraient compléter ces usages à plus long terme.

L'étude met en évidence la pertinence d'un premier projet pilote industriel, notamment sur un site de production de boissons nécessitant à la fois de la vapeur et du CO₂ pour ses procédés. Cette approche permettrait de tester la technologie en conditions réelles et de structurer progressivement une filière territoriale d'oxycombustion, reposant sur la coordination entre producteurs d'oxygène, industriels consommateurs de vapeur et utilisateurs du CO₂ capté.

Si les chaudières à oxycombustion sont en concurrence avec d'autres solutions de décarbonation telles que la biomasse, l'électrification ou la récupération de chaleur fatale, elles présentent un avantage pour les sites nécessitant une forte flexibilité de production thermique et un captage efficace du carbone. L'émergence de projets pilotes et le développement d'infrastructures de transport et de valorisation du CO₂ apparaissent ainsi comme des conditions clés pour leur déploiement industriel à Dunkerque.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

CITATION DE CE RAPPORT

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.