

Décarbonation industrielle à Dunkerque : pyrolyse

Janv.
2024



AAP ZIBAC - 2.2.2 Dkarbonation -
Synthèse publique - GRDF

1. Contexte stratégique et enjeux de décarbonation

Le programme ZIBAC (Zones Industrielles Bas Carbone) s'inscrit dans le plan d'investissement France 2030 dont l'objectif est d'accélérer la transformation écologique des grandes plateformes industrielles françaises afin de renforcer leur compétitivité et leur attractivité. Dans ce cadre, la zone industrialo-portuaire de Dunkerque constitue un territoire prioritaire en raison de son poids dans les émissions industrielles nationales. Le bassin dunkerquois représente environ 13,7 millions de tonnes de CO₂ par an soit près de 20 % des émissions industrielles françaises. La décarbonation de cette zone constitue donc un levier majeur pour atteindre les objectifs climatiques nationaux et européens.

La stratégie de décarbonation des industriels locaux repose sur plusieurs axes complémentaires qui incluent l'efficacité énergétique la transformation du mix énergétique l'adoption de nouvelles technologies industrielles et le captage du carbone pour les émissions difficiles à réduire. Dans ce contexte l'hydrogène bas carbone apparaît comme un vecteur énergétique central notamment pour des acteurs industriels majeurs du territoire tels qu'ArcelorMittal dont les besoins sont estimés entre 125 000 et 150 000 tonnes d'hydrogène par an.

Actuellement la principale solution envisagée pour répondre à cette demande est la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cependant cette technologie présente des coûts encore élevés notamment pour des usages industriels intensifs comme la sidérurgie. L'étude analyse donc la pertinence d'une alternative technologique la pyrolyse du méthane qui permet de produire de l'hydrogène bas carbone à un coût potentiellement inférieur tout en générant du carbone solide valorisable comme co-produit industriel.

2. Objectifs et méthodologie de l'étude

L'étude vise à évaluer la faisabilité technique économique et industrielle d'un projet de production d'hydrogène par pyrolyse du méthane sur la plateforme industrielle de Dunkerque. Elle doit également déterminer si cette technologie peut s'intégrer dans la stratégie énergétique locale et contribuer à la décarbonation des activités industrielles.

La démarche méthodologique repose sur trois axes d'analyse. Le premier consiste à établir un état de l'art des technologies de pyrolyse et des acteurs industriels impliqués. Ce travail inclut un benchmark technologique ainsi qu'une analyse de la maturité industrielle des procédés disponibles. Il examine également les performances énergétiques les niveaux d'investissement nécessaires les coûts d'exploitation et les rendements des différentes technologies.

Le second axe consiste à analyser les dimensions techniques environnementales et économiques d'un projet potentiel. L'étude compare la pyrolyse du méthane aux principales filières concurrentes de production d'hydrogène telles que l'électrolyse alcaline l'électrolyse PEM et le vaporeformage avec captage du carbone. Elle analyse également les contraintes liées à la distribution au stockage et à l'intégration de l'hydrogène dans les infrastructures existantes.

Le troisième axe consiste à identifier les opportunités industrielles locales permettant de structurer une filière hydrogène turquoise sur le territoire. Cette analyse inclut l'identification des débouchés potentiels pour l'hydrogène produit ainsi que pour le carbone solide issu du procédé. Des entretiens ont été réalisés avec plusieurs industriels afin d'évaluer leurs besoins leurs contraintes techniques et leurs critères d'achat.

3. Principe technologique de la pyrolyse du méthane

La pyrolyse du méthane est un procédé thermochimique qui consiste à décomposer le méthane en hydrogène et en carbone solide en l'absence d'oxygène. Cette réaction endothermique nécessite un apport de chaleur ou d'électricité pour rompre les liaisons moléculaires du méthane. Le processus produit deux flux principaux l'hydrogène qui constitue le produit énergétique recherché et le carbone solide qui peut être valorisé dans diverses applications industrielles.

Cette filière est généralement associée à l'hydrogène dit « turquoise » qui se distingue par un profil environnemental intermédiaire entre l'hydrogène vert et l'hydrogène gris. Elle consomme moins d'électricité et d'eau que l'électrolyse de l'eau tout en générant un co-produit valorisable ce qui peut améliorer la viabilité économique du procédé.

Les technologies de pyrolyse se déclinent en plusieurs familles selon la méthode de chauffage utilisée. Les principales catégories incluent la pyrolyse plasma la pyrolyse catalytique les procédés utilisant des bains de métaux ou de sels fondus les procédés thermiques et certaines technologies émergentes utilisant des micro-ondes ou des sources solaires. Chacune de ces technologies présente des caractéristiques spécifiques en termes de rendement de pureté des produits et de maturité industrielle.

4. Maturité technologique et acteurs industriels

Le marché de la pyrolyse du méthane est aujourd'hui dominé par des start-ups et des PME innovantes plutôt que par de grands groupes industriels. Parmi les projets les plus avancés l'entreprise américaine Monolith se distingue comme le seul acteur ayant atteint une production commerciale à grande échelle grâce à une technologie de pyrolyse plasma. Son site industriel produit environ 2 500 tonnes d'hydrogène par an ainsi que 14 500 tonnes de noir de carbone.

D'autres acteurs développent actuellement des projets pilotes ou des démonstrateurs industriels. Hazer Group en Australie développe un procédé catalytique avec un réacteur pilote tandis que BASF explore une technologie thermique dans le cadre d'un projet de recherche en Allemagne. Des initiatives utilisant des bains de métaux fondus ou des technologies solaires sont également en cours mais elles restent à des niveaux de maturité technologique plus faibles.

Globalement les technologies de pyrolyse n'ont pas encore démontré leur capacité à être déployées à très grande échelle. Leur maturité industrielle reste inférieure à celle des technologies d'électrolyse ou de reformage avec captage du carbone ce qui constitue l'un des principaux risques associés à leur déploiement industriel.

5. Marché et valorisation du carbone solide

Le développement économique de la pyrolyse du méthane dépend fortement de la valorisation du carbone solide produit lors du procédé. Ce carbone peut être transformé en plusieurs matériaux industriels notamment le noir de carbone le graphite ou des carbones spécialisés utilisés dans les batteries les encres ou les matériaux composites.

Les marchés du carbone solide peuvent être divisés en deux catégories. Les marchés actuels sont caractérisés par des produits à forte valeur ajoutée mais avec des volumes relativement limités. Les marchés futurs pourraient concerner des applications à faible valeur ajoutée mais à très grande échelle comme les matériaux de construction ou la métallurgie.

Le noir de carbone constitue aujourd'hui l'un des débouchés les plus importants. Il est principalement utilisé dans l'industrie du caoutchouc notamment pour les pneumatiques où il représente entre 20 % et 30 % de la composition d'un pneu. Le prix de marché varie généralement entre 1,2 et 2 € par kilogramme selon la qualité et les conditions du marché.

Le graphite constitue un second marché stratégique notamment pour les batteries lithium-ion. Ce matériau est utilisé pour les anodes et représente plus de 90 % de la composition de certaines électrodes. Le marché mondial du graphite est fortement dominé par la Chine ce qui crée des enjeux de sécurité d'approvisionnement pour l'Europe.

Cependant les volumes potentiels de carbone solide issus d'une production massive d'hydrogène par pyrolyse pourraient dépasser largement la taille actuelle des marchés existants. À titre d'illustration si l'ensemble de la production mondiale d'hydrogène reposait sur la pyrolyse elle générerait environ 300 millions de tonnes de carbone solide par an alors que le marché actuel est estimé à environ 26 millions de tonnes d'ici 2030.

6. Dimensionnement d'un projet potentiel à Dunkerque

Compte tenu de la maturité technologique actuelle il apparaît peu réaliste d'envisager à court terme un projet de pyrolyse du méthane à très grande échelle sur la ZIBAC de Dunkerque. Les projets les plus avancés au niveau mondial restent encore relativement modestes en termes de capacité de production.

L'étude propose donc un scénario de référence basé sur une installation produisant environ 5 000 tonnes d'hydrogène par an ainsi que 15 000 tonnes de carbone solide. Cette capacité correspondrait à une production énergétique d'environ 167 GWh d'hydrogène par an ce qui permettrait d'alimenter plusieurs sites industriels de taille moyenne sur la plateforme industrielle.

Ce dimensionnement est considéré comme réaliste car il reste inférieur aux projets d'électrolyse envisagés sur la zone tout en étant suffisamment important pour répondre aux besoins énergétiques de certains industriels locaux.

7. Analyse environnementale et technique

Du point de vue environnemental la production d'hydrogène par pyrolyse du méthane présente des performances intermédiaires entre l'hydrogène vert et l'hydrogène gris. L'empreinte carbone du procédé dépend principalement de l'électricité utilisée pour fournir la chaleur nécessaire à la réaction ainsi que du gaz naturel consommé comme matière première.

Comparativement à l'électrolyse la pyrolyse présente plusieurs avantages opérationnels. Elle consomme significativement moins d'électricité et presque aucune eau. À titre d'exemple pour une installation produisant 5 000 tonnes d'hydrogène par an la consommation électrique serait d'environ 65 GWh contre environ 260 GWh pour un électrolyseur de capacité équivalente.

Cependant le rendement énergétique du procédé reste inférieur à celui de l'électrolyse et l'empreinte carbone dépend fortement de la composition du gaz utilisé. L'intégration de biométhane dans le mix d'alimentation pourrait améliorer significativement le bilan carbone et même conduire à des émissions négatives si la proportion dépasse environ 25 %.

8. Analyse économique et compétitivité

L'analyse économique montre que les coûts de production de l'hydrogène turquoise dépendent principalement du prix du gaz naturel et de la valorisation du carbone solide. Les investissements initiaux restent relativement élevés en raison de la faible maturité technologique et du manque d'industrialisation des procédés.

Les coûts d'exploitation représentent la part dominante du coût total de production. Contrairement à l'hydrogène vert dont les coûts dépendent principalement du prix de l'électricité l'hydrogène turquoise présente une structure de coûts répartie entre l'électricité et le gaz naturel ce qui limite la dépendance à une seule source énergétique.

Les projections économiques indiquent que l'hydrogène turquoise pourrait devenir compétitif à horizon 2030 si le carbone solide est valorisé autour de 1 à 1,5 € par kilogramme. Dans ce scénario le coût de production pourrait être comparable à celui de l'hydrogène vert non subventionné.

Toutefois la compétitivité de cette filière pourrait être affectée par l'émergence d'un marché européen de l'hydrogène. Le projet d'infrastructure European Hydrogen Backbone prévoit la construction d'un réseau de transport d'hydrogène de 40 000 kilomètres d'ici 2040 permettant d'acheminer l'hydrogène sur de longues distances à un coût estimé d'environ 0,2 € par kilogramme pour 1 000 kilomètres.

9. Acteurs industriels et débouchés locaux

Les entretiens menés avec les industriels du territoire montrent que la demande potentielle en hydrogène existe mais reste encore incertaine. Plusieurs entreprises dont ArcelorMittal Imerys et Ascometal envisagent l'hydrogène comme un levier possible de décarbonation mais elles restent prudentes face aux coûts aux risques technologiques et aux modifications des procédés industriels nécessaires.

ArcelorMittal apparaît néanmoins comme le principal futur consommateur d'hydrogène sur la plateforme de Dunkerque notamment dans le cadre de ses projets de réduction directe du minerai de fer. Les besoins potentiels pourraient atteindre plusieurs milliers de gigawattheures par an à horizon 2030.

Du côté du carbone solide plusieurs entreprises ont exprimé un intérêt potentiel notamment Michelin GrafTech Aluminium Dunkerque ou encore Armor Group. Toutefois les exigences techniques et les contraintes de prix varient fortement selon les applications ce qui complique la structuration du marché.

10. Modèles d'affaires et risques

Le développement d'un projet de pyrolyse du méthane comporte plusieurs risques majeurs. Le premier concerne la maturité technologique encore limitée de la filière. Le second concerne les risques économiques liés au niveau élevé des investissements et à l'incertitude sur les prix du gaz et du carbone solide. Le troisième concerne la nécessité de sécuriser des contrats d'achat à long terme pour l'hydrogène et le carbone afin d'assurer la rentabilité du projet.

L'étude identifie plusieurs modèles d'affaires possibles. Le modèle considéré comme le plus pertinent à court terme repose sur un projet porté par un grand industriel ou un énergéticien capable de financer l'investissement et de gérer les risques industriels. Une alternative consisterait à confier le projet à un développeur de technologie mais cette option comporte davantage de risques financiers en raison de la taille généralement limitée de ces entreprises.

11. Recommandations stratégiques

L'étude conclut que la mise en place d'un projet de pyrolyse du méthane à Dunkerque d'ici 2030 est envisageable à condition de réunir plusieurs facteurs clés de succès. La première condition est le développement industriel de la technologie et la démonstration de sa fiabilité à grande échelle à travers des projets pilotes internationaux.

La seconde condition est la confirmation d'une demande industrielle suffisante en hydrogène sur la plateforme industrielle au-delà des besoins déjà identifiés. La troisième condition concerne l'existence de débouchés industriels viables pour le carbone solide afin d'assurer l'équilibre économique du projet.

Enfin la réussite du projet dépendra également d'un cadre réglementaire favorable et d'une intégration claire de la pyrolyse du méthane dans la stratégie territoriale de décarbonation. La coordination des acteurs industriels énergétiques et institutionnels apparaît comme un élément déterminant pour structurer cette nouvelle filière industrielle.

RÉSUMÉ

Cette étude analyse le potentiel de la pyrolyse du méthane comme solution de production d'hydrogène bas carbone dans la zone industrielle bas carbone (ZIBAC) de Dunkerque, un territoire clé de la décarbonation industrielle française. L'objectif est d'évaluer la faisabilité technique économique et industrielle de cette technologie afin de compléter les solutions existantes de production d'hydrogène et répondre aux besoins croissants des industries locales.

La pyrolyse du méthane permet de produire de l'hydrogène en décomposant le méthane sans oxygène tout en générant du carbone solide valorisable comme coproduit industriel. L'étude compare cette technologie aux principales filières existantes telles que l'électrolyse et le reformage du méthane avec captage du carbone. Elle examine également les conditions nécessaires à l'émergence d'une filière industrielle locale, notamment les débouchés pour l'hydrogène et le carbone solide ainsi que les contraintes techniques réglementaires et économiques.

Les résultats indiquent qu'un projet industriel de taille intermédiaire pourrait être envisageable à Dunkerque avec une production d'environ 5 kt d'hydrogène par an, sous réserve de sécuriser des débouchés industriels et de valoriser le carbone solide. La compétitivité de cette filière dépend principalement du prix du gaz naturel et de la valorisation économique du carbone solide.

L'étude conclut que la pyrolyse du méthane pourrait constituer une solution complémentaire pour la décarbonation industrielle à condition de consolider la demande industrielle l'écosystème technologique et le cadre réglementaire.

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.