

# Les carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène électrolytique et des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur cimentier : un vecteur de décarbonation du transport maritime

Par Pierre DE RAPHÉLIS-SOISSAN

Directeur du Développement d'Hynamics

Et Arthur PARENTY

Chargé des Affaires publiques d'Hynamics

Responsable de 2,5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, le transport maritime international fait partie des secteurs particulièrement difficiles à décarboner. Parmi les vecteurs de décarbonation possibles et permettant de conserver un service acceptable pour l'économie, les carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène électrolytique et de CO<sub>2</sub> disposent d'avantages certains : sous forme de méthanol de synthèse, ils peuvent être utilisés pour alimenter les systèmes de motorisation à combustion existants ; en outre, ils ne nécessitent pas un recours à la biomasse. Si de nombreux projets de production massive de carburants de synthèse se développent à travers l'Europe, certains défis industriels, énergétiques et réglementaires doivent encore être relevés pour libérer le plein potentiel de cette filière.

## Les carburants de synthèse comme vecteurs de décarbonation du secteur maritime

### La décarbonation du secteur maritime, un enjeu majeur

Le transport maritime international représente 2,5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. La stratégie climatique de l'Organisation maritime internationale (OMI) vise à réduire l'intensité carbone de la flotte mondiale de 40 % entre 2008 et 2030. Une majorité des États membres de l'OMI s'est prononcée en faveur d'une réduction de l'intensité carbone limitée à 11 % entre 2020 et 2026, avant une révision de cette proposition en 2025 permettant de fixer de nouvelles valeurs pour les années 2027-2030 afin d'atteindre l'objectif initial de - 40 %. Au niveau européen, la Commission européenne propose dans son paquet Climat une réduction progressive du CO<sub>2</sub> émis par les navires par rapport aux valeurs observées en 2020, correspondant à une baisse de 2 % dès 2025, de 6 % en 2030, de 13 % en 2035 et allant jusqu'à 75 % en 2050<sup>(1)</sup>.

L'atteinte de ces objectifs de décarbonation est d'autant plus nécessaire que les prévisions de croissance du transport maritime laissent augurer un fort accroissement de ses émissions de gaz à effet de serre si des mesures drastiques ne sont pas prises. L'OMI, l'Agence internationale de l'énergie ou encore l'OCDE prévoient en effet, en fonction des scénarios économiques et technologiques, une demande en transport maritime pouvant atteindre en 2050 le double de celle actuelle. Il est donc critique pour l'atteinte de nos objectifs climatiques d'accompagner cette croissance du transport maritime d'une forte réduction des émissions de CO<sub>2</sub> associées.

Au-delà de certaines mesures, comme la baisse de la vitesse des navires de transport de marchandises, la question centrale et la plus difficile à traiter est bien sûr celle des carburants d'avenir. Le défi est d'atteindre les objectifs de réduction de l'intensité carbone des flottes, tout en faisant en sorte que le service apporté reste de niveau acceptable pour l'économie : il convient donc que le carburant de demain permette de réaliser des opérations maritimes en toute sécurité et fiabilité avec le niveau de décarbonation requis et qu'il soit disponible en grandes quantités dans les principaux ports mondiaux, tout en restant à des niveaux socialement supportables en termes de coûts.

<sup>(1)</sup> Proposal for a Regulation on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC, 14 juillet 2021.

## Le méthanol de synthèse, un vecteur de décarbonation du transport maritime

L'agence de classification DNV, un des principaux prestataires internationaux de services en management des risques, a classé les carburants bas-carbone susceptibles d'être produits en trois grandes catégories :

- les carburants obtenus à partir de reformage du gaz naturel associé à la capture et au stockage permanent du CO<sub>2</sub> ;
- les biocarburants élaborés à partir de matériaux organiques non fossiles, venant en complément ou en substitution de combustibles fossiles : il s'agit, par exemple, du biogaz ou du biodiesel ;
- les carburants de synthèse – aussi appelés e-carburants (e-fuels) en ce qui concerne les électro-carburants – produits sans pétrole ni biomasse, mais à partir de CO<sub>2</sub> et d'électricité bas-carbone.

On se contentera ici de restituer, à travers le schéma ci-après, les grandes conclusions de l'étude<sup>(2)</sup>, lesquelles qualifient de particulièrement prometteurs les carburants de synthèse, comme l'ammoniac ou le méthanol de synthèse, en tant que vecteurs de décarbonation des navires<sup>(3)</sup>.

Il convient toutefois de rester prudent afin de ne pas laisser croire que l'avenir des carburants bas-carbone est déjà tout tracé. Il faut plutôt considérer cette conclusion comme un nouvel argument parmi de nombreux autres en faveur des carburants de synthèse. Concernant en particulier le méthanol, l'analyse des acteurs du marché semble avoir évolué fortement depuis deux ou trois ans. L'étude de Carbone 4 relative

à la décarbonation du secteur maritime<sup>(4)</sup>, datant pourtant de seulement 2019, ne citait même pas le méthanol comme un carburant potentiel. À l'inverse, Maersk et CMA CGM ont tous deux annoncé en 2022 des commandes portant sur plusieurs porte-conteneurs fonctionnant au méthanol. On mesure le chemin parcouru en seulement trois ans.

La technologie la plus mature pour produire ce méthanol de synthèse repose sur la combinaison, dans un réacteur thermocatalytique, d'un hydrogène produit par électrolyse de l'eau avec du CO<sub>2</sub>. Pour que ce méthanol de synthèse présente un intérêt du point de vue environnemental, l'électricité utilisée dans le processus d'électrolyse doit être bas-carbone, c'est-à-dire d'origine nucléaire ou renouvelable. Sur l'ensemble du cycle de fabrication, l'empreinte carbone de ces carburants durables doit être réduite d'au moins 70 %<sup>(5)</sup> par rapport à leurs équivalents fossiles. Pouvant être employé pour alimenter des systèmes de motorisation à combustion existants, ce type de carburant présente un intérêt certain pour le secteur du transport maritime qui, à l'instar de l'aérien, pourra difficilement se décarboner en recourant seulement à l'électrification ou en utilisant l'hydrogène pur. À ce titre, la production de carburants de synthèse pour le transport maritime représente un débouché majeur pour l'hydrogène électrolytique.

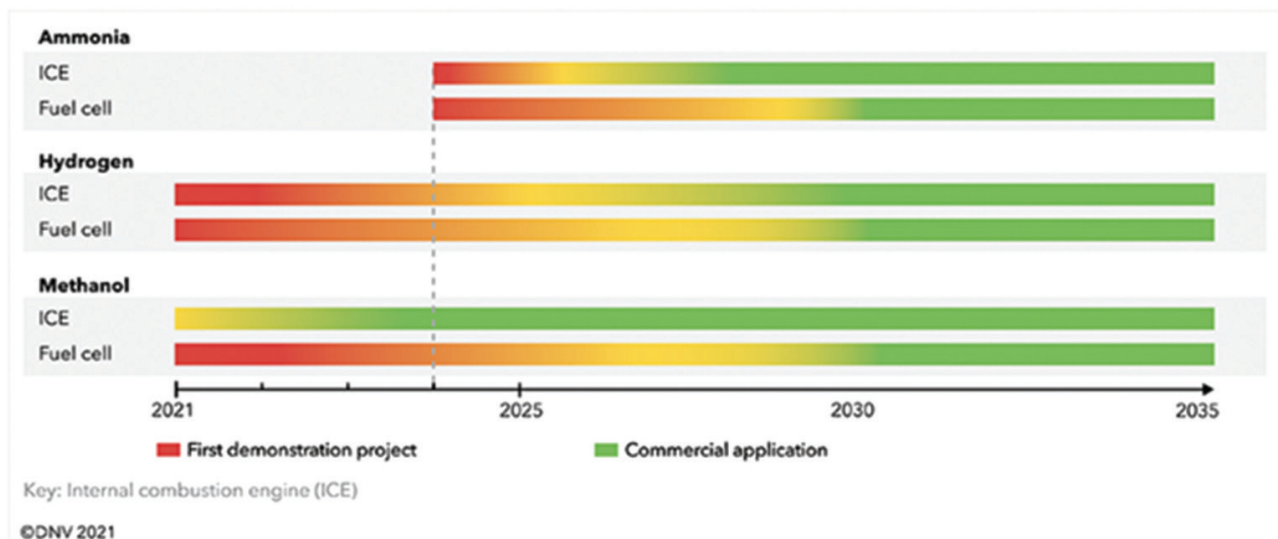
Le méthanol pose évidemment la question du relâchement dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> au moment de la combustion du carburant, et donc de l'origine de l'atome de carbone présent dans sa molécule. La production de méthanol de synthèse doit alors s'adosser à une source de CO<sub>2</sub> abondante, fatale (c'est-à-dire non évitable) et facilement captable.

<sup>(2)</sup> <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/fuels/future-fuels.html>

<sup>(3)</sup> C'est aussi la conclusion d'une étude récente de l'IRENA. Voir : <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/A-Pathway-to-Decarbonise-the-Shipping-Sector-by-2050>

<sup>(4)</sup> <https://www.carbone4.com/publication-decarbonation-secteur-maritime>

<sup>(5)</sup> Taux minimum de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixé par la directive européenne sur les énergies renouvelables RED II et le paquet « Hydrogène et gaz décarboné » pour pouvoir être considéré comme carburant renouvelable ou bas-carbone, selon l'origine de l'électricité utilisée.



Calendrier prévisionnel de disponibilité des technologies de carburants alternatifs pour le secteur maritime (Nb : contrairement à l'ammoniac et à l'hydrogène, le méthanol constitue une solution qui est, dès aujourd'hui, commercialement déployable).

## Un besoin de disposer de volumes importants de CO<sub>2</sub> pour produire les carburants de synthèse : l'intérêt du captage sur des sites cimentiers

### Les synergies entre les processus d'électrolyse de l'eau et le captage du CO<sub>2</sub> fossile non évitable des cimenteries

Avant de pouvoir valoriser le CO<sub>2</sub> présent dans les fumées (il représente entre 15 et 20 % de la composition de celles-ci) rejetées par une source industrielle comme une cimenterie, il faut le capturer et le séparer des autres composants de ces gaz de fumée (azote, oxygène, dioxyde de soufre, oxydes d'azote...). Les technologies les plus matures pour effectuer cette séparation sont celles du lavage aux amines et de la capture par technologie membranaire (à noter qu'Air Liquide propose depuis peu sa technologie de séparation des gaz par cryogénie).

Pour éviter de devoir séparer puis concentrer le CO<sub>2</sub>, certaines technologies privilégient une approche visant à obtenir une concentration maximale de CO<sub>2</sub> directement dans les fumées de combustion. C'est l'objectif du projet de recherche européen Oxyfuel, qui fait appel au principe dénommé « oxy-combustion » : l'air utilisé au niveau de la tuyère dans le four de cimenterie pour assurer la production de chaleur est remplacé par de l'oxygène pur. Les fumées issues de la combustion sont ainsi quasi exclusivement constituées de CO<sub>2</sub>, ce qui facilite considérablement son captage et son utilisation ultérieure.

C'est l'approche adoptée dans le cadre du projet Hynovi conduit par le groupe cimentier Vicat et Hynamics, filiale du groupe EDF spécialisée dans la production d'hydrogène par électrolyse. Ce projet vise à la production industrielle de méthanol de synthèse sur le site de la cimenterie de Montalieu en Auvergne Rhône-Alpes. L'installation se compose de trois briques principales : une plateforme d'électrolyse pour produire l'hydrogène, une unité permettant le captage du CO<sub>2</sub> directement à l'embouchure de la cheminée de la cimenterie et une unité de méthanolisation. D'une puissance de 330 MW, l'électrolyseur, en plus de servir à la production d'hydrogène, présente l'avantage de fournir, en tant que coproduit du processus d'électrolyse, l'oxygène pur qui servira à l'oxycombustion qui facilite le captage du CO<sub>2</sub> dans les fumées. Afin de produire 200 kt de méthanol de synthèse par an à partir de 2027, 300 kt de CO<sub>2</sub> devront être captées chaque année, soit près de 40 % du CO<sub>2</sub> émis par la cimenterie de Montalieu. Ce dimensionnement industriel est considéré comme nécessaire pour obtenir des effets d'échelle sur les différents éléments technologiques du procédé chimique.

### Un gisement limité de CO<sub>2</sub> biogénique

Une solution alternative au CO<sub>2</sub> industriel régulièrement mise en avant est l'utilisation de CO<sub>2</sub> biogénique, c'est-à-dire du CO<sub>2</sub> issu du procédé de méthanisation.

Il est à cet égard utile de rappeler quelques ordres de grandeur : une unité de méthanisation typique produit environ 55 % de biométhane et 45 % de CO<sub>2</sub>, que l'on qualifie de biogénique, étant entendu que son origine est biologique. La taille moyenne des installations d'injection de biométhane dans le réseau de gaz naturel en France était en 2020 de 176 Nm<sup>3</sup>/h<sup>(6)</sup>, ce qui correspond à environ 1 850 tonnes de CO<sub>2</sub> émises en moyenne par site et par an. Par rapport au projet Hynovi, cela représente moins de 0,5 % de la quantité de CO<sub>2</sub> entrant dans le processus de production de méthanol de synthèse. Un défi évident est donc la question de l'accès, en très grandes quantités (plus de 200 fois la moyenne des installations actuelles), à du CO<sub>2</sub> biogénique. Cela suscite évidemment d'autres réflexions plus globales, comme le fléchage des ressources agricoles vers des unités de méthanisation, et ce alors que le décret pris pour l'application de l'article L. 541-39 du Code de l'environnement interdit aux installations de méthanisation d'utiliser plus de 15 % des principales cultures agricoles. Par ailleurs, augmenter fortement la taille des installations de méthanisation pose la question de l'acceptabilité de ces mégaprojets par les riverains (on pense, par exemple, au trafic accru des camions acheminant la matière première).

En conclusion, il ressort que la filière du CO<sub>2</sub> biogénique souffre, pour un éventuel usage dans des projets de développement de carburants de synthèse, de certains freins majeurs, comme la faible disponibilité à court terme de grandes quantités de CO<sub>2</sub>, lesquelles sont pourtant nécessaires pour assurer la viabilité même de ces projets. Il serait à bien des égards préférable de capter et de valoriser d'abord le CO<sub>2</sub> industriel non évitable, comme celui inhérent au processus de fabrication du ciment et de la chaux, avant de recourir à des sources de CO<sub>2</sub> biogénique.

## Des projets de production de carburants de synthèse répliquables et à fort impact environnemental

C'est dans cette optique d'industrialisation de la production de carburants de synthèse qu'Hynamics développe avec ses partenaires plusieurs projets en Europe pour faire le lien entre ces sources de CO<sub>2</sub> non évitables, que représentent les cimenteries, et les futurs consommateurs de ces carburants, tout particulièrement les armateurs, dont le besoin de disposer de volumes importants de carburants alternatifs justifie la mise à l'échelle de ce type d'installations. En France, le projet Hynovi, avec 200 kt de méthanol de synthèse produites par an à partir de 2027, a pour ambition de produire l'équivalent du tiers de la consommation nationale de méthanol, laquelle est aujourd'hui exclusivement d'origine fossile et est intégralement importée. En plus de son application dans le maritime en tant que carburant de synthèse pour les navires, ce méthanol décarboné pourra être utilisé dans la chimie et permettra ainsi

<sup>(6)</sup> <https://bibliographie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4778-chiffres-cles-du-parc-d-unites-de-methanisation-en-france-au-1er-janvier-2021.html>



d'éviter au global jusqu'à 500 kt de CO<sub>2</sub> par an. Hynovi représente ainsi une première mondiale de transformation « du CO<sub>2</sub> en méthanol » à l'échelle industrielle.

Ce type de projet présente l'intérêt d'être répliquable auprès de toutes les sources de CO<sub>2</sub> industrielles non évitables n'ayant pas accès à des infrastructures de transport et de stockage permanent du CO<sub>2</sub>. C'est le cas du projet Hyscale que développe en parallèle la filiale allemande d'Hynamics dans le Länder du Schleswig-Holstein. Avec l'installation d'un électrolyseur de 500 MW, l'oxygène coproduit sera utilisé pour de l'oxycombustion dans une cimenterie voisine et facilitera le captage du CO<sub>2</sub> qui sera combiné avec de l'hydrogène pour produire du méthanol de synthèse, dont une partie sera utilisée comme carburant décarboné.

Par leur envergure et leur caractère particulièrement innovant, ces deux projets sont respectivement soutenus par la France et l'Allemagne dans le cadre de leurs stratégies Hydrogène respectives et s'inscrivent dans les projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC), dispositif dérogatoire au regard des règles d'encadrement des aides d'État. Ce financement public est essentiel pour soutenir l'industrialisation de la filière hydrogène électrolytique et le déploiement massif des carburants de synthèse.

## Les obstacles à lever pour libérer le potentiel de la filière

### Des enjeux réglementaires déterminants pour l'essor de la filière française et la viabilité des projets de production de carburants de synthèse

En complément du nécessaire soutien public, la différence de compétitivité entre les carburants de synthèse et leurs équivalents fossiles doit être compensée par des objectifs ambitieux de décarbonation qui doivent être assortis d'une incitation financière forte. C'est notamment l'objet du paquet Climat européen, ou « ajustement à l'objectif 55 », qui impose des objectifs sectoriels contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de pénétration des carburants renouvelables aussi bien dans les transports que dans l'industrie. Ces objectifs sont essentiels pour fournir aux producteurs et aux consommateurs la visibilité nécessaire pour investir à la fois dans les actifs de production de carburants de synthèse et dans les navires qui les utiliseront.

Toutefois, le cadre réglementaire régissant les carburants de synthèse, du fait de sa non-stabilisation, représente aujourd'hui une source d'incertitude importante de nature à ralentir le développement des projets. Il s'agit notamment de la détermination de l'origine du CO<sub>2</sub> qui pourra être utilisé pour produire des carburants de synthèse, notamment afin de s'assurer que les projets de capture et de valorisation de CO<sub>2</sub> industriels ne permettent pas de prolonger l'activité d'actifs émetteurs de CO<sub>2</sub> disposant de solutions de décarbonation directe. Une définition juridique des émissions de CO<sub>2</sub> inhérentes aux procédés industriels,

comme celui de la production de ciment que l'on peut qualifier de non évitable, doit être élaborée pour caractériser le CO<sub>2</sub> qu'il est souhaitable de valoriser en tant que carburant de synthèse. Sans cette possibilité de valorisation de leurs émissions non évitables, l'Ademe estime que 80 % des sites cimentiers français devraient être contraints de fermer ou de délocaliser leur production, faute de disposer d'un accès à un site de stockage permanent du CO<sub>2</sub>.

Une autre difficulté réside dans la place singulière qu'occupe au sein de l'Union européenne le mix électrique français, lequel est largement décarboné grâce à la part importante de la production nucléaire. Cette spécificité, qui donne à la France un avantage compétitif naturel pour produire massivement des carburants de synthèse à partir d'hydrogène électrolytique grâce à l'électricité du réseau, n'est aujourd'hui pas valorisée dans les textes européens. En effet, les objectifs communautaires de décarbonation sectoriels, notamment des transports, ne tiennent compte pour leur atteinte que des carburants qualifiés de renouvelables, soit des carburants de synthèse produits exclusivement à partir d'électricité renouvelable. Si cette approche permet de s'assurer d'une réduction effective des émissions liées à l'utilisation des carburants de synthèse dans des pays où le mix électrique est fortement carboné, c'est-à-dire la plupart des pays européens, elle s'avère inadaptée pour les pays, comme la France, ayant investi très tôt dans la décarbonation de leur mix électrique via le développement du nucléaire. Afin d'accélérer la décarbonation des transports, qu'ils soient routiers, maritimes ou même aéronautiques, l'ensemble des moyens de production d'électricité décarbonée doivent pouvoir être mobilisés pour participer à la production d'hydrogène et de carburants de synthèse. Pour ce faire, il est impératif que la mesure de la contribution des différentes solutions de décarbonation à l'atteinte des différents objectifs européens s'appuie sur une analyse des émissions réelles par type de carburants en raisonnant sur l'ensemble de leur cycle de vie. Étant donné la nécessité d'accélérer la production d'hydrogène pour atteindre la neutralité climatique et dans un souci d'efficacité du soutien public, le cadre réglementaire et les objectifs sectoriels associés doivent inciter à l'utilisation des carburants permettant d'obtenir le coût le plus faible de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

### Un défi industriel et énergétique de grande ampleur

Face aux objectifs de décarbonation ambitieux qui lui sont assignés, le transport maritime s'oriente vers un « mix énergétique », aujourd'hui exclusivement fossile, et qui, demain, sera constitué de plusieurs types de carburants alternatifs. La filière fait dès lors face à un défi industriel et énergétique majeur, tenant au fait que les volumes de carburants alternatifs nécessaires pour atteindre ses objectifs climatiques requièrent des quantités d'électricité très importantes. En 2020, la consommation de carburant dans le secteur maritime représentait en France près de 0,1 exajoule (EJ), soit l'équivalent de 2,4 Mt de mazout lourd, le

carburant majoritairement utilisé dans les navires. Si l'on substituait, dans un cas théorique, l'ensemble de cette consommation de mazout par du méthanol de synthèse, il faudrait, compte tenu de sa densité énergétique, disposer d'un volume deux fois plus important de méthanol pour délivrer la même quantité d'énergie, soit un besoin d'environ 5 Mt de méthanol. En reprenant les caractéristiques du projet Hynovi, une puissance d'électrolyse de 8,5 GW serait nécessaire pour produire un tel volume. Ce besoin en électrolyse dépasse largement l'objectif de la stratégie hydrogène française qui prévoit de déployer d'ici à 2030 6,5 GW d'électrolyse, ce qui représente la capacité de production d'électricité de 5 EPR.

Du fait du volume limité de biomasse disponible pour alimenter les transports, notre capacité à décarboner le transport maritime dépendra de notre faculté à déployer rapidement et massivement des capacités de produc-

tion d'électricité décarbonée. C'est d'ailleurs une des conclusions du récent rapport de RTE<sup>(7)</sup>. À plus court terme, un autre enjeu industriel de taille réside dans la capacité des fabricants d'équipements d'électrolyse à les fournir en quantités requises. Le niveau d'industrialisation à atteindre pour réduire les coûts de production ainsi que l'innovation technologique nécessaire pour permettre la mise sur le marché de systèmes d'électrolyse plus performants sont des conditions essentielles à la mise en service de véritables « usines » de production de carburants de synthèse.

---

<sup>(7)</sup> <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>