

# LEVIERS DE DÉCARBONATION DES NAVIRES

NOTE DE POSITION



## À RETENIR

**Il n'existe pas de solution de décarbonation unique** pour tous les types de navires.

**Les armateurs français sont déjà engagés depuis plusieurs années dans la décarbonation de leurs activités.** Ils étudient toutes les solutions disponibles, investissent dans de nouveaux actifs industriels pouvant consommer des énergies bas carbone et choisissent le mix énergétique et technologique en fonction de leurs activités.

**De nombreux leviers de décarbonation sont déjà utilisés par les armateurs français,** de l'excellence opérationnelle (réduction de la vitesse, écoconduite...) à l'amélioration de l'efficacité énergétique (optimisation des formes de carènes et de l'appareil propulsif des navires, optimisation de l'ensemble de l'énergie consommée à bord).

**Armateurs de France reste résolument engagée pour la réduction de la vitesse des navires** et plus particulièrement des navires de transport de vrac sec et de vrac liquide.

**Plusieurs armateurs français ont, depuis de nombreuses années, misé sur le GNL, comme carburant de transition,** leur permettant d'avoir accès aux biométhane et au méthane de synthèse permettant de sortir d'une énergie fossile sans aucun coût de modification du moteur et du navire. Ils ont aujourd'hui une position de leader au niveau mondial. Les navires exploités au GNL pourront passer sans aucune conversion au biométhane et au méthane de synthèse. Les capacités de production de biométhane sont encore assez limitées, notamment en France, et devront être développées et soutenues dans les années qui viennent au vu de la demande prévue et de la compétition avec les autres industries.

En l'absence aujourd'hui de technologie ou de carburant zéro carbone, **il est crucial que les navires puissent s'approvisionner en biocarburants rapidement et partout dans le monde.**

**Les e-carburants représentent une solution majeure pour satisfaire à terme les besoins énergétiques du secteur maritime,** à condition que les étapes nécessaires à leur production soient décarbonées. Les infrastructures de production, de transport, de stockage, de distribution et de soutage nécessiteront le déploiement de nouvelles filières de production ou d'importation sur le territoire national. C'est une opportunité pour notre industrie, mais c'est aussi un véritable défi en termes d'investissements. Le déploiement de masse à échelle commerciale n'est pas envisagé avant 2030-2035, à l'exception du e-méthanol et du e-méthane. Il est estimé que 30 TWh seront nécessaires pour produire les e-carburants nécessaires à la propulsion des navires d'ici 2050;

- le **e-méthane** pourra remplacer directement le GNL utilisé dans les navires construits pour cette énergie et pourra bénéficier des infrastructures existantes et des réglementations en vigueur;
- le **e-méthanol** pourra profiter d'un déploiement rapide. Plusieurs armateurs français ont déjà fait le choix de cette énergie pour leurs futurs navires. Il est impératif de soutenir sa production;
- le **e-hydrogène**, compte tenu de sa faible densité énergétique, restera limitée aux navires en capacité de s'avitailer fréquemment, ou aux très grands navires;
- l'**e-ammoniac** n'est pas encore suffisamment mature aujourd'hui. S'il présente certains avantages (coût et production), il reste délicat à exploiter dans des endroits confinés comme les navires et requière des études supplémentaires.

Pratiqué depuis les années 1990, **le branchement électrique à quai des navires est une source de décarbonation non négligeable** pour les navires faisant souvent escale. **Son déploiement en France est très attendu** par les armateurs français pour se conformer aux nouvelles réglementations européennes.

**La propulsion électrique est réservée aux petits navires ou pour de courtes traversées.** Les armateurs français se sont déjà engagés dans l'hybridation de leurs navires pour réduire jusqu'à 20% de leurs émissions.

**Plusieurs armateurs français ont fait le choix de la propulsion par le vent pour réduire le recours à d'autres énergies en hybridation de leurs navires.** Cette solution n'est pas adaptable à tous les types de navires, ni d'exploitations et pourrait permettre entre 5 et 20% d'économie de carburant pour les navires rétrofités et jusqu'à 99% pour certaines constructions neuves (notamment portées par la création de nouvelles compagnies).

**Les armateurs français envisagent la capture carbone à bord des navires** pour laquelle des efforts de R&D et de démonstrateurs en milieu marins doivent être soutenus.

La propulsion nucléaire civile présente des atouts certains (compacité, sécurité énergétique, puissance délivrée) mais devra relever de nombreux défis pour être déployée à large échelle (réglementation, sûreté, formation, assurabilité, financement, acceptabilité, etc.)

# INTRODUCTION

Le secteur des transports et des services maritimes représente une très grande variété de navires tant dans leurs tailles et leurs designs que dans leurs usages, entraînant notamment des besoins en autonomie et en manœuvrabilité divers ainsi que différents volumes de stockage disponibles à bord. En conséquence, il n'existe pas de solution de décarbonation unique pour tous les types de navires. De façon générale, les armateurs étudient toutes les solutions disponibles et choisissent le mix énergétique et technologique en fonction de leurs activités.

La décarbonation du maritime est assez spécifique et identifiée, pour les plus grands navires, comme une des plus complexes à réussir compte tenu des besoins en puissance et en autonomie. De manière générale, les technologies développées dans d'autres domaines, tels que l'automobile, ne sont pas directement adaptables et nécessitent une «marinisation» (batteries, stacks de piles à combustible) ou des développements spécifiques (vélique).

Concernant le type d'énergie, le secteur maritime, qui repose essentiellement sur le gazole et le fuel lourd aujourd'hui, va devoir s'orienter vers de nouvelles molécules. Certaines peuvent être communes avec d'autres mobilités comme le méthane et l'hydrogène, d'autres sont plus spécifiques comme le méthanol ou l'ammoniac.

Des leviers de décarbonation, identifiés depuis longtemps, sont déjà pratiqués par les armateurs. Néanmoins, ni la disponibilité, ni la maturité de ces solutions ne permettent de décarboner massivement le maritime aujourd'hui. Ces leviers sont présentés ci-dessous en trois grandes catégories :

- L'excellence opérationnelle pour réduire les émissions en phase d'exploitation.
- L'efficacité énergétique pour réduire la consommation et les émissions.
- Les énergies et infrastructures.

## EXCELLENCE OPÉRATIONNELLE POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS EN PHASE D'EXPLOITATION

### EXCELLENCE OPÉRATIONNELLE

On entend par excellence opérationnelle, l'ensemble des actions permettant d'optimiser la consommation du navire existant en corrigeant son exploitation et ses interactions avec son environnement : outils d'aide à la décision et à l'écoconduite, routage intégrant les conditions météorologiques (vent, houle, courant), optimisation des interactions avec la terre pour réduire les vitesses de transit (arrivée «juste à temps», réduction des temps d'escale, etc.), monitoring de performance pour identifier les surconsommations, formation des équipages.

Les mesures d'excellence opérationnelle permettent des gains significatifs apportés par une meilleure compréhension du fonctionnement des navires. Certaines sont simples à mettre en place, sans modification majeure du navire. Des freins sont à noter : la bande passante pour les communications satellites navires / terre, la nécessité de standards et de qualité des données, la propriété des données discutée entre les équipementiers, les chantiers et les armateurs (le tout dans le respect de la cybersécurité), enfin le partage des investissements et bénéfices entre armateurs et affrêteurs (notamment «l'arrivée juste à temps»).

Armateurs de France soutient la démarche de « Just in time arrival » associée à une mesure de réduction de la vitesse des navires de transport de vrac sec et liquide. En effet, ce secteur est influencé par un ensemble complexe de facteurs<sup>1</sup> qui encourage le transit rapide des navires pour arriver le plus tôt possible au port

pour ensuite devoir attendre la disponibilité du quai, au lieu d'adapter la vitesse de transit et arriver juste à temps pour la mise à quai. De nombreuses études ont estimé que 15 à 20 % des émissions pourraient être éliminées en modifiant uniquement le processus et le profil de vitesse, sans impact négatif sur la capacité de transport de la flotte (sans avoir à construire de nouveaux navires).

### SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE – RÉDUCTION DE LA VITESSE

La principale mesure identifiée concerne la baisse de la vitesse des navires, la consommation de carburant étant fonction du cube de la vitesse.

Portée par Armateurs de France et particulièrement par Louis Dreyfus Armateurs depuis de nombreuses années, la réduction de la vitesse des navires a été reprise lors du G7 à Biarritz en 2019 par le Président de la République, puis proposée à l'OMI<sup>2</sup>. Cette mesure ne peut être prise qu'au niveau international : ni la France, ni l'Europe peuvent seules imposer cette réglementation. La réduction de la vitesse est une pratique vertueuse, simple et efficace immédiatement, qui peut engendrer jusqu'à 30% de réduction des émissions du navire (GES, SOx, NOx et particules), qui rend la propulsion par le vent plus attractive et qui permet également de protéger la faune marine (baisse significative du bruit sous-marin et des risques de collision avec les cétacés).

<sup>1</sup>- Les chartes parties n'incitent pas à une arrivée optimale, principe de «premier arrivé, premier servi» des grands ports, intérêt minimal des chartes parties à temps pour l'optimisation de la consommation...

<sup>2</sup>- L'Organisation Maritime Internationale a préféré mettre en place des mesures sur objectif (CII) pour réduire les émissions de GES des navires.

Armateurs de France reste résolument engagée pour la réduction de la vitesse des navires et plus particulièrement des navires de transport de vrac sec et de vrac liquide qui représentent 60 à 65% de la flotte mondiale et qui transportent des marchandises dont l'allongement du transit n'aurait pas de grandes conséquences économiques. Cette proposition exclut les navires à passagers, les ferries et les porte-conteneurs pour qui, la réduction de la vitesse peut poser des difficultés, notamment du fait des modèles économiques de ces activités, et des risques de report modal vers des modes de transport plus rapides mais plus polluants. S'agissant des lignes régulières, du fait de la fréquence des rotations, la réduction de la vitesse

pourrait imposer de rajouter des navires<sup>3</sup>, ce qui pourrait être contreproductif si la mesure n'était pas pleinement étudiée, tout comme l'exploitation à vitesse réduite de navires conçus selon un design et une motorisation pour être exploités à une vitesse donnée.

Il faut noter qu'à la suite de l'entrée en vigueur des mesures de court terme de l'OMI (CII<sup>4</sup> et EEXI<sup>5</sup>) en janvier 2023, et alors qu'aucune limitation de vitesse n'est imposée de façon contraignante, on constate qu'elle est finalement adoptée par de nombreux armateurs : c'est en effet la seule solution disponible pour réduire les émissions des navires qui ne peuvent pas investir dans des technologies trop coûteuses.

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE POUR RÉDUIRE LA CONSOMMATION ET LES ÉMISSIONS

### RÉDUCTION DE LA TRAÎNÉE DES NAVIRES

La réduction de la traînée consiste à optimiser la forme du navire pour minimiser la résistance aux vagues et le frottement du navire avec l'eau. Elle implique des calculs complexes via des outils numériques et parfois des vérifications en bassin de carène. Les études peuvent concerner la forme générale du navire ou des parties spécifiques (bulbe, voûte, appendices), selon différents profils opérationnels, qu'il s'agisse de constructions neuves ou en rétrofit. Certaines techniques innovantes contribuent aussi à réduire les frottements comme l'injection d'air sous la carène ou l'usage de certains revêtements de surface.

Cette solution est applicable sur tous les navires et segments de flotte, en rétrofit et en construction neuve avec des gains de l'ordre de 5 à 20% sur la consommation et les émissions.

Les armateurs ont déjà recours à cette solution, car elle est mature et prouvée par de nombreux retours d'expériences très positifs. On peut cependant noter le temps restreint alloué à la phase de conception des navires et la nécessité d'un arrêt technique pour un rétrofit. De plus, les études entraînent un coût additionnel significatif malgré le retour sur investissement rapide (1 à 3 ans sur les grands navires<sup>6</sup>) en rétrofit. Enfin, ces modifications pourraient être prévues pour des missions spécifiques, entraînant la revente du navire plus compliquée du fait de la perte de polyvalence.

### AMÉLIORATION DU RENDEMENT PROPULSIF

Il s'agit d'optimiser l'ensemble de la chaîne propulsive du navire (du moteur à l'hélice) : optimisation du rendement des propulseurs, intégration de propulseurs innovants, optimisation de l'ensemble carène/appendices/propulseur, développement de systèmes d'économie d'énergie pour améliorer les rendements propulsifs.

Cette solution, déjà mis en place sur beaucoup de navires, permet des gains de l'ordre de 3 à 10%, avec un retour sur l'investissement d'un à trois ans en rétrofit<sup>4</sup>. Néanmoins, l'amélioration du rendement propulsif du navire requiert d'abord des études techniques approfondies coûteuses sur la base du profil du navire, mais aussi un coût élevé des propulseurs plus performants (entre 5 et 25% du coût du navire selon le type de propulseur).

### AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES ÉQUIPEMENTS DES NAVIRES

Il s'agit d'optimiser l'ensemble de l'énergie consommée à bord sur un profil de navire et d'exploitation donnée afin d'éviter des consommations superflues ou redondantes : récupération de chaleur (émis par le moteur) ou de froid (émis par les réfrigérants) pour une utilisation à bord, optimisation de l'usage du moteur principal par rapport à celui des auxiliaires ainsi que des points de fonctionnement, dimensionnement optimal de la puissance, optimisation des dépenses énergétiques à bord (ampoules, climatisation, chauffage), amélioration de l'efficacité des équipements de pont et divers appareils.

Ces améliorations sont possibles sur tous les types de navires. Certaines sont déjà très largement pratiquées aujourd'hui car le coût est réduit avec une facilité de mise en place à l'aide d'études au stade du design du navire ou en rétrofit. L'optimisation de ces solutions est très dépendante du profil opérationnel du navire qui est amené à varier au cours de sa durée de vie. Par ailleurs, il est nécessaire de mettre en place à bord des outils de modélisation énergétique et de monitoring du navire encore en développement ou nécessitant encore validation.

3- Notons que la baisse des volumes transportés et donc des échanges internationaux n'est à ce jour que peu crédible.

4- Carbon Intensity Indicator

5- Energy Efficiency Existing Ship Index

6- Ordre de grandeur donnée en 2023, à moduler selon le prix du carburant et de sa taxation.

# ÉNERGIES ET INFRASTRUCTURES

## LE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ (GNL)

La France et plusieurs armateurs français ont, depuis de nombreuses années, misé sur le GNL, comme carburant de transition. Aujourd'hui, les armateurs français sont ceux qui se sont les plus engagés dans le GNL et ont une position de leader au niveau mondial :

- CMA CGM : 63 navires dual-fuel en exploitation, 49 navires en commande pour des livraisons s'échelonnant de 2023 à 2028;
- Brittany Ferries : 2 navires en exploitation, 2 navires en commande (2025);
- Corsica Linea : 1 navire en exploitation, 1 navire en commande (2026);
- Ponant : 1 navire en exploitation;
- La Méridionale : 2 navires en commande (2027).

Le GNL permet une amélioration de la qualité de l'air des échappements des navires (réduction de 99% des oxydes de soufre, 91% des particules fines et 92% des oxydes d'azote). Le GNL, même s'il reste d'origine fossile, et ne peut être considéré que comme un carburant de transition, apporte une première réponse au défi du changement climatique. En effet, le GNL permet une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à 20% selon le type de motorisation et l'origine du GNL. En revanche, les premières années d'expérience acquise montrent que le GNL peut entraîner des émissions fugitives de méthane lors de son utilisation, selon la technologie de moteur retenue. Le méthane a un pouvoir réchauffant 28 fois supérieur au CO<sub>2</sub> sur 100 ans.

Ces fuites fugitives réduisent l'impact positif de la consommation de GNL sur l'effet de serre, selon le type de moteur concerné. Des travaux menés par les motoristes en lien avec les armateurs produisent déjà des résultats sur la réduction de ces fuites. Les armateurs français se sont également impliqués dans l'approvisionnement et la distribution de ce carburant. D'abord, techniquement, les armateurs se sont assurés d'une exploitation sûre pour les navires et les marins qui reçoivent une formation spécifique pour maîtriser un combustible cryogénique à bord. Utilisé par les navires méthaniers depuis les années 1970, le GNL est une technologie mature à bord, dans sa chaîne d'approvisionnement, et les infrastructures de ravitaillement existent dans les principaux ports dans le monde (notamment en France : Dunkerque, Fos, Le Havre et Saint Nazaire). Permettant également de satisfaire aux contraintes liées aux réglementations en matière de pollution atmosphérique, notamment dans les zones de contrôle des émissions (zones ECA), le GNL est adopté sur un nombre croissant de constructions neuves de navires de charge et de navires à passagers. Le GNL présente une densité énergétique intéressante comparativement aux autres carburants alternatifs mais la taille et le poids des réservoirs cryogéniques en réserve l'usage aux navires d'une certaine taille (>100m).

Le GNL est un carburant de transition car les navires qui l'utilisent peuvent passer sans aucune conversion au biométhane et au méthane de synthèse qui, eux, sont totalement neutres en carbone, lorsque leur production est verte.

Les armateurs, ayant investi massivement dans le GNL, ont pris le risque de faire évoluer les pratiques. Un navire propulsé au GNL coûte environ 20% plus cher qu'un navire propulsé conventionnellement. Alors que ce surcoût devait être compensé par le prix du GNL, ce dernier a été multiplié par trois ces dernières années. Cette évolution doit pouvoir entrer dans les modèles des armateurs lors de leurs prises de décision et permettre une meilleure prédictibilité.

## LES BIOCARBURANTS

En l'absence de technologie ou carburant zéro carbone aujourd'hui, il est crucial que les navires puissent s'approvisionner en biocarburants rapidement et partout dans le monde. Des compagnies maritimes françaises ont déjà souté des biocarburants, mais ces carburants restent minoritaires, chers, et pouvant être approvisionnés dans peu de ports dans le monde.

Les biocarburants liquides représentent une gamme très variée de carburants alternatifs produits à partir de biomasse issue de ressources à usage alimentaire (huiles végétales, plantes sucrières, céréales...) pour les carburants dits de première génération, et de ressources lignocellulosiques (bois, feuilles, pailles, etc.) pour les carburants de seconde génération. Certains biocarburants sont déjà utilisés depuis longtemps pour la mobilité routière, mais leur usage dans le maritime reste embryonnaire.

Il est à noter qu'en ce qui concerne les biocarburants issus de la biomasse, il est capital de ne pas remplacer leur usage alimentaire par la consommation de carburant dans les navires. Armateurs de France insiste pour que l'approvisionnement de ces biocarburants se fasse dans le respect des réglementations européennes<sup>7</sup> en vigueur.

Autre type de biocarburant, le biométhane est un gaz 100% renouvelable produit à partir de déchets issus de l'industrie agroalimentaire, de la restauration collective, de déchets agricoles et ménagers, ou encore de boues de stations d'épuration. Ce biogaz épuré a les mêmes propriétés que le gaz naturel, et donc les mêmes usages. Il peut ensuite être liquéfié pour faire du bioGNL et remplacer du GNL fossile.

Relativement simples à utiliser et disponibles dès à présent, les biocarburants (et biométhanes) ont des potentiels de réduction des émissions de gaz à effet de serre variables selon leur origine et leur niveau d'incorporation. En effet, avec la solution « drop-in », les biocarburants peuvent être incorporés directement dans les soutes des navires, en mélange aux carburants fossiles, sans retrofit majeur. Notons que les gains énergétiques des biométhanes seront significativement plus élevés (20 à 25%). La disponibilité des stocks, compte tenu des besoins à venir, est un enjeu majeur. En effet, les capacités de production sont encore assez limitées et devront être développées dans les années qui viennent au vu de la demande prévue et de la compétition avec les autres industries.

7- Notamment des biocarburants respectant l'usage des sols agricoles, ne venant pas de zones de haute biodiversité, respectant les critères pour minimiser le risque d'utilisation de la forêt, etc.



En l'absence de technologie ou carburant zéro carbone aujourd'hui, il est crucial que les navires puissent s'approvisionner de biocarburants rapidement et partout dans le monde et à des prix compétitifs. En France, il est attendu que les quantités de biocarburant suffisantes soient adressées au maritime. Pour autant, la production de biocarburants est limitée par l'accès aux feedstocks de biomasse avancée. D'après le scénario de l'Institut MEET2050, utilisé pour la rédaction de la feuille de route décarbonation, autour de 15TWh de biocarburants seront nécessaires en 2035, et ce malgré d'importants efforts de réduction de la consommation énergétique des navires.

La France doit accompagner la production verte de biométhane et l'adresser au maritime, de façon subventionnée, en particulier dans le cadre des garanties d'origine<sup>8</sup>, pour soutenir les investissements de ces armateurs et permettre la neutralité carbone de leurs navires.

## LES E-CARBURANTS : E-HYDROGÈNE, E-MÉTHANE, E-MÉTHANOL, E-AMMONIAC

Avec les biocarburants, les e-carburants représentent une solution majeure pour satisfaire à terme les besoins énergétiques du secteur maritime. Les e-carburants sont une classe de carburants fabriqués à partir d'électricité. Ils peuvent représenter une solution neutre en matière de GES à condition que les étapes nécessaires à leur production, notamment l'électricité utilisée, le soient également. Rappelons qu'aujourd'hui, 90% de l'hydrogène est d'origine fossile.

La production d'e-carburants nécessite d'énormes quantités d'énergie, compte tenu des rendements faibles lors des phases de transformation. Leur production passe par une étape de production d'hydrogène, lui-même pouvant être produit par électrolyse de l'eau (pour assurer son caractère décarboné), cet hydrogène pouvant ensuite être transformé en d'autres molécules par différents processus chimiques.

Le **e-hydrogène**, produit par électrolyse de l'eau et pouvant ensuite être utilisé dans une pile à combustible voire, dans certains cas, dans un moteur à combustion. Du fait de sa très faible densité énergétique (0,09kg/m<sup>3</sup>), l'hydrogène doit être comprimé à très haute pression (42kg/m<sup>3</sup> à 700 bars) voire liquéfié à environ -252°C (71kg/m<sup>3</sup>). Du fait des contraintes techniques qu'imposent la taille et le poids des réservoirs, l'utilisation de l'e-hydrogène restera limitée aux navires en capacité de s'avitailer fréquemment, ou aux très grands navires. La durée de vie limitée des piles à combustible et leur coût sont également une contrainte.

Le **e-méthane** produit par différents procédés industriels regroupés sous le concept de «power to gas», permet de tendre progressivement vers la neutralité carbone. Le e-méthane pourra remplacer directement le GNL fossile utilisé dans les navires construits pour cette énergie. Il peut ainsi bénéficier des infrastructures existantes et des réglementations en vigueur.

La production de **e-méthanol** est déjà industrialisée, notamment pour l'industrie chimique. Ce carburant est liquide à température ambiante ce qui facilite sa manipulation et son soutage (contrairement au GNL et carburants associés). Le e-méthanol peut être utilisé en rétrofit de navires existants. Des navires-citernes fonctionnant et transportant du méthanol sont déjà en opération, et des premiers navires – hors navires-citernes – utilisant le méthanol comme carburant seront très bientôt en opération. Certains armateurs français misent sur cette technologie, notamment Socatra (commande de 4 pétroliers), Zéphyr et Borée (4 navires porte-conteneurs en commande) et CMA CGM (24 navires en commande pour livraison d'ici 2027). Utilisé dans les moteurs «dual fuel» pour le maritime, le e-méthanol permet également un déploiement rapide. Le méthanol présente toutefois un certain niveau de toxicité qui nécessite des précautions particulières lors de son utilisation. Le coût du méthanol vert est aujourd'hui six fois plus cher que du diesel conventionnel (MDO) et restera plus de deux fois plus cher d'après les projections<sup>9</sup>. Le méthanol «gris», dérivé du gaz naturel, est plus émetteur que les carburants fossiles, la décarbonation des modes de production est donc essentielle.

L'**e-ammoniac** est produit en très petite quantité contrairement à l'ammoniac synthétisé d'origine fossile pour les besoins industriels (industrie des engrais, explosifs). L'ammoniac présente l'intérêt majeur d'être dépourvu de chaîne carbonée et ainsi de ne pas émettre de CO<sub>2</sub> à sa combustion. C'est un carburant de synthèse plus économique et simple à produire que d'autres carburants de synthèse, en partie car il repose sur l'utilisation de l'azote naturellement présent dans l'atmosphère. L'e-ammoniac est étudié avec attention par le transport maritime, car c'est un carburant de synthèse économique et simple à produire. Cependant sa forte toxicité et les dangers qu'il représente pour l'environnement restent un obstacle à son déploiement massif, en particulier dans des endroits confinés comme les navires. Des efforts de R&D et une réglementation spécifique sont encore nécessaires pour une exploitation sûre dans ce type d'environnement.

Les flux logistiques tant en matière d'intrants (électricité renouvelable, hydrogène, CO<sub>2</sub>, azote...) que d'infrastructures de production, de transport, de stockage, de distribution et de soutage, nécessiteront le déploiement de nouvelles filières de production ou d'importation sur le territoire national. C'est une opportunité pour notre industrie, mais c'est aussi un véritable défi en termes d'investissements. L'économie industrielle des e-fuels est entièrement à construire, nécessitant des investissements très lourds avec des retours sur investissement difficiles à évaluer. Les analyses en cycle de vie doivent être systématisées pour mesurer l'impact des émissions sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Le prix des e-carburants, dont la production est quasi nulle à ce jour hormis pour la mobilité lourde, dépendra grandement des prix de l'électricité. On peut estimer qu'à terme et hors mécanisme de taxe carbone, les e-carburants seront entre deux et quatre fois plus chers que leurs équivalents fossiles. Il faut ajouter à ce prix, les investissements nécessaires en infrastructures et les surcoûts des navires dont le design est différent

8- Les garanties d'origine sont des certificats électroniques. Ils sont émis au moment de la production et l'injection de chaque MWh de gaz dans le cadre d'une production d'énergies renouvelables. Le dispositif des garanties d'origine (GO) assure la traçabilité du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel et des transactions associées.

9- Étude Ricardo (2022) Technological, Operational and Energy Pathways for Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050. OGCI and Concave.

des navires conventionnels. Un porte-conteneur de 9000 EVP propulsé au méthanol coûte 103 millions de dollars (au lieu de 90 millions pour un navire propulsé de façon conventionnelle).

Le déploiement de masse à échelle commerciale n'est pas envisagé avant 2030-2035, à l'exception du e-méthanol (en plus du e-méthane) dont certains projets commencent à se déployer. Il est estimé d'après le scénario de MEET2050 que 30 TWh seront nécessaires pour produire les e-carburants nécessaires à la propulsion des navires d'ici 2050.

## HYBRIDATION ET ÉLECTRIFICATION DU NAVIRE ET DES QUAIS

L'alimentation des navires à quai est une pratique mise en œuvre depuis de nombreuses années : depuis les années 1990 pour les navires de L'Express des îles à Pointe-à-Pitre et Fort-de-France. Orange marine branche son câblage à la Seyne-sur-mer depuis 20 ans. À Marseille, les ferries de La Méditerranéenne se branchent à quai depuis 2017. Ceux de Corsica Ferries se branchent à quai depuis l'automne 2023 à Toulon. Compte tenu des exigences de la directive européenne Fuel EU maritime (et de son pendant portuaire le règlement AFIR - Alternative Fuels Infrastructure Regulation) et avec le développement à venir de l'électrification des navires, le déploiement d'infrastructures de raccordement devrait s'accélérer. Pour autant, l'engagement de plusieurs ports en France se fait attendre alors que la mise en œuvre sera longue compte tenu des lourds travaux et investissements associés. De plus, certains ports français ne sont pas soumis aux exigences européennes ne permettant pas aux armateurs de brancher leurs navires.

L'équipement d'un navire de croisière ou d'un ferry d'une prise de raccordement coûte entre 1 et 1,5M€ selon la puissance nécessaire. Des frais conséquents sont également à déterminer côté quai pour le raccordement du navire. Des aides publiques aux financements tant du côté quai, que du côté navire, sont des leviers d'accélération intéressants. Pour permettre le retour sur investissement des armateurs, la tarification de l'électricité fournie devrait être compétitive et mise en adéquation avec le modèle opérationnel des navires, ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui. Les armateurs ont également besoin de visibilité sur les modèles de tarification de l'électricité et ont des craintes sur la multiplication des partenariats public-privé qui rendraient les marges de facturation pour l'accès à l'électricité d'autant plus onéreuses.

Outre les investissements à l'équipement des navires et des ports, plusieurs freins restent à lever : côté navire : difficultés de retrofit pour les navires existants du fait de l'exiguïté à bord, absence de standardisation des branchements (prise, électricité fournie, automates...) entre les ports, contrainte d'accostage des navires selon l'emplacement des prises à quai, etc. La contrainte la plus coûteuse est de loin celle se situant côté quai avec le redimensionnement du réseau de distribution dans les grands ports pour fournir l'électricité aux navires. Peu de ports sont aujourd'hui équipés en France métropolitaine (Marseille, Toulon, Dunkerque) pour accueillir le branchement des navires, alors que c'est une solution très attendue par les armateurs pour réduire leur impact carbone.

Comme dans d'autres mobilités, l'électrification des modes de propulsion se déploie progressivement sur les navires depuis plusieurs années (notamment par l'emport de packs de batteries pour écarter les besoins de puissance et limiter la charge des groupes électrogènes - Louis Dreyfus Armateurs a ainsi été le pionnier de cette technologie avec les Wind of Change et Wind of Hope; maintenant largement adoptée sur de nombreux navires de service). Les navires de taille modeste peuvent déjà opter pour une propulsion électrique alimentée par des batteries. C'est aussi une option intéressante pour des petits navires à passagers ou de servitude, en fluvial ou eaux abritées, qui bénéficient de capacité de recharge à quai et n'ont pas des besoins d'autonomie élevés. Sur les plus grands navires, ces applications restent limitées à quelques usages spécifiques, comme l'électrification des auxiliaires qui peut représenter jusqu'à 20% de la consommation énergétique du navire, ou pour des ferrys assurant de courtes traversées et pouvant se recharger souvent à quai (jusqu'à 95% de la consommation énergétique des navires selon les lignes). Certains navires sont déjà dotés de packs de batteries importants à l'instar du navire Le Commandant Charcot de la compagnie Ponant qui peut fonctionner en mode tout électrique sur de courtes périodes (1 à 2h).

La solution électrique présente l'avantage de n'émettre aucune émission (directement). Elle est accessible en retrofit, mais son encombrement reste important. La technologie est déjà mature avec une bonne efficacité énergétique, selon le mix énergétique utilisé pour produire l'énergie électrique utilisée à bord. Elle est particulièrement pertinente pour les faibles puissances, mais aussi pour les plus grosses puissances à condition d'avoir des rotations courtes. Les batteries peuvent être installées en hybridation avec, par exemple, un moteur thermique. La technologie batterie s'adapte aux usages et aux différents fonctionnements des briques technologiques. Enfin, les batteries présentent un risque non négligeable lié aux incendies à bord et le coût des infrastructures d'électrification pour les ports pour le branchement et la recharge reste important.

## LA PROPULSION PAR LE VENT ET LES AUTRES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Le vent est une énergie renouvelable, gratuite et abondante en mer, notamment dans certaines zones géographiques et prédictible au large depuis une dizaine d'années. Le vent permet ainsi de transporter des quantités de marchandises non négligeables sur de longues distances. Notons qu'aucune transformation, transport ou stockage à terre de cette énergie n'est nécessaire, ni soutage ou stockage à bord ce qui évite d'obérer la capacité d'emport ou d'entreposage. Sa production verte n'est pas non plus à démontrer.

L'énergie éolienne peut être utilisée en assistance à une propulsion principale, sur des navires neufs ou en retrofit de navires existants, ou sur certaines lignes particulières (selon la disponibilité de vent) en propulsion principale.

Son exploitation directe à bord des navires à l'aide de systèmes de propulsion dédiés (voiles, ailes rigides, rotors, kites, etc.) permet de réduire significativement le recours à d'autres formes d'énergies. Les dispositifs de routage sont disponibles pour optimiser l'usage et l'hybridation avec un autre mode de propulsion.

La propulsion par le vent fait l'objet de nombreuses propositions et brevets d'innovation dans la sphère nationale, l'industrialisation des équipements et de leur intégration pour son déploiement à grande échelle sur des navires commerciaux reste encore à accélérer.

Néanmoins, cette solution n'est efficace que pour des vitesses de navires adaptées, souvent plus faibles que les vitesses traditionnelles, et seulement à certaines lignes maritimes du fait de la force du vent. La performance et la fiabilité des équipements véliques de nouvelle génération restent à démontrer à l'usage, tout comme leur durabilité et leur efficacité. La solution vélique est plus efficace pour les constructions neuves car une adaptation de la carène et de ses appendices est nécessaire pour remonter au vent efficacement et l'ensemble du design doit être pensé pour intégrer la propulsion par le vent et l'hybridation des moyens de propulsion pour obtenir de forts gains d'efficacité énergétique. Son utilisation en rétrofit est possible mais peut poser des contraintes fortement impactantes pour certains types de navires (renforts structurels, diminution de la stabilité du fait de l'élévation du centre de gravité du navire, renforcement des appareils d'amarrage à cause d'une prise au vent plus élevée, etc.) Enfin, cette solution ne peut pas s'adapter à tous les types de navires car elle impose un impact sur le pont de chargement entraînant des conséquences sur la stabilité et la visibilité depuis la passerelle ainsi que des contraintes opérationnelles d'encombrement pour le déchargement de certains types de navires et le passage des ponts pour certaines technologies.

De nombreux armateurs français se sont déjà engagés dans la propulsion par le vent, que ce soit en construction neuve ou en rétrofit : Neoline, Jifmar, Zéphyr et Borée et TOWT, Ponant, la Compagnie maritime nantaise, Louis Dreyfus Armateurs, Socatra, Marfret, Vela et Windcoop. Et les autres suivent de très près le développement des différentes technologies.

La France doit se réjouir d'un tissu industriel important en la matière qu'il faut continuer de développer. Pour promouvoir cette solution de décarbonation, il est nécessaire, par exemple, aux côtés de l'association Wind Ship, de former les marins, de défendre cette solution à l'OMI et d'accompagner financièrement les risques pris par les armateurs qui investissent dans ces prototypes.

La propulsion assistée par le vent permet des économies de carburant entre 5 et 20% en rétrofit et jusqu'à 50-80%<sup>10</sup> pour une construction neuve en propulsion principale. Les voiliers-cargos de TOWT et VELA justifient de plus de 90% de réduction des émissions par rapport à une propulsion conventionnelle. De plus, le transport par la voile crée de l'attractivité pour les métiers de la mer et il est favorisé par certains chargeurs et consommateurs en quête de transparence. Plus d'informations sur la propulsion par le vent dans le livre blanc de Wind Ship. ([www.wind-ship.fr/livre-blanc](http://www.wind-ship.fr/livre-blanc))

D'autres énergies renouvelables peuvent dans certains cas être exploitées à bord des navires, en particulier le photovoltaïque et l'énergie hydrolienne.

#### CONTACT

**Pierre-Antoine Rochas**, Responsable Environnement, Sécurité, Sûreté & Ports d'Armateurs de France  
[pa-rochas@armateursdefrance.org](mailto:pa-rochas@armateursdefrance.org)

## LA CAPTURE DU CO2 À BORD

La capture à bord des émissions de CO<sub>2</sub>, son stockage et sa séquestration ultérieure permettrait de réduire les émissions des navires utilisant un carburant carboné. La technologie est déjà relativement mature à terre et déployée sur certains sites industriels. On pourrait même imaginer un cycle complet qui verrait ce carbone capturé ensuite utilisé pour la production de carburants de synthèse, puis réutilisé à bord.

La capture carbone à bord des navires nécessite encore des efforts de R&D et la mise en place de démonstrateurs en conditions marines. Son déploiement peut être envisagé sur les plus gros navires, mais reste coûteux. C'est une technologie qui peut venir en complément des fuels alternatifs et serait particulièrement pertinente pour les navires disposant de source froide à bord, tels que les navires au GNL, pour liquéfier le CO<sub>2</sub> et le stocker. Néanmoins, de nombreuses modifications sont nécessaires pour un rétrofit de navire existant avec un encombrement lié aux systèmes de captage et de stockage de CO<sub>2</sub> à bord. Enfin, la capture carbone connaît des incertitudes réglementaires quant à la nature du CO<sub>2</sub>.

Il est urgent de créer un cadre réglementaire à la capture carbone à bord des navires, sans quoi il est entendu que la décarbonation du maritime ne sera pas atteignable dans le temps imparti.

## LA PROPULSION NUCLÉAIRE

L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la propulsion de navires civils connaît un certain intérêt dans le secteur maritime alors que cette technologie est déjà largement utilisée dans le domaine militaire. L'intégration de petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) à bord de navires nécessitant des apports énergétiques importants présente plusieurs atouts : compacité, sécurité énergétique et puissance délivrée. La France dispose en la matière d'une filière stratégique et d'une expertise reconnue.

Toutefois, de nombreux défis restent à relever pour permettre le déploiement industriel de solutions utilisant le nucléaire à bord de navires de commerce, en particulier : l'adaptation de la réglementation internationale pour la sécurité des navires nucléaires (peu détaillée, inusitée depuis son adoption dans les années 1980 et restreinte aux seuls réacteurs à eau pressurisé), les enjeux de sûreté nucléaire, la formation des navigateurs, la définition d'un cadre pertinent de responsabilité, d'assurance des risques, de financement des projets, la mise en œuvre d'infrastructures de construction et de maintenance adaptées. Un tel développement serait également conditionné à l'acceptabilité de cette technologie et à une prise en compte des enjeux relatifs à la fin de vie des navires et des réacteurs embarqués. Il devrait s'appuyer sur l'important retour d'expérience de l'industrie navale qui intègre des réacteurs nucléaires pour la propulsion de bâtiments militaires depuis plusieurs décennies.



10- Source : Livre blanc de Wind Ship.