

# La décarbonation du transport maritime : un changement de paradigme

*Alain Bovis*

Président de l'Académie de marine

Par **Alain BOVIS**, président de  
l'Académie de Marine

*Alain Bovis est Ingénieur général de l'armement. Après une première partie de carrière au sein de la direction générale de l'armement, il a occupé différents postes de direction dans la société DCNS (aujourd'hui Naval Group) parmi lesquels directeur de l'établissement de Nantes-Indret (conception et réalisation des systèmes de propulsion) puis directeur des Sciences et Technologies du groupe.*



@AMOPA44

*Docteur en hydrodynamique, il a enseigné l'hydrodynamique et l'architecture navale dans plusieurs écoles d'ingénieurs dont l'École polytechnique et l'École nationale supérieure des techniques avancées. Il est président de l'Académie de Marine et président de l'Association Technique Maritime et Aéronautique.*

*Il est membre de l'AMOPA 44.*

*Cet article reprend la conférence qu'Alain Bovis a prononcée pour l'AMOPA à Nantes le 1<sup>er</sup> décembre 2022.*



héritable circulation sanguine de l'économie mondiale le transport maritime achemine 80 % des marchandises échangées dans le monde. En 2021, quelques 90 000 navires marchands ont transporté plus de 11 milliards de tonnes de marchandises. Beaucoup moins coûteux en carburant et plus économe en émissions polluantes à la tonne au kilomètre transportée que les autres modes, il est resté pendant longtemps en marge des efforts d'optimisation énergétique engagés par d'autres secteurs industriels. Cependant, avec la prise de conscience croissante du dérèglement climatique et sous la pression de réglementations de plus en plus exigeantes, le transport maritime se trouve aujourd'hui engagé dans une révolution énergétique et économique sans précédent depuis la révolution industrielle qui a vu la propulsion à vapeur remplacer la voile.

## La transition énergétique

Jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la combustion d'un produit carboné renouvelable, le bois, a permis à l'humanité de se chauffer, cuire les aliments, s'éclairer et inventer une forme d'industrie artisanale du verre, de la poterie, puis, par réduction par le carbone des oxydes de fer, de la métallurgie. Cependant, la principale source d'énergie mécanique est restée la force musculaire humaine marginalement complétée par l'énergie animale et, à partir du Moyen Âge, les énergies éolienne et hydraulique (moulins).

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle la machine à vapeur remplace progressivement la force musculaire entraînant la Révolution industrielle. Parallèlement l'esclavage disparaît tandis que naît une classe ouvrière dont les conditions de travail seront désormais conditionnées par les progrès de cette mécanisation. Les ressources des forêts s'avèrent alors insuffisantes pour satisfaire des besoins en énergie en forte croissance et on se tourne vers le charbon, combustible carboné non renouvelable pour la production de vapeur. Au XX<sup>e</sup> siècle, de nouvelles sources d'énergie primaires (pétrole, énergie hydraulique des grands barrages, nucléaire et, plus récemment, éolienne et solaire), viennent accroître encore la production d'énergie. Aujourd'hui, charbon et hydrocarbures, représentent toujours 80 % de l'énergie primaire consommée dans le monde. Ces sources énergétiques, carbonées par nature, sont également fossiles, donc épuisables, bien qu'il soit toujours difficile de prévoir le pic d'extraction et la décroissance naturelle de leur production.

Le changement climatique impose de sortir des sources d'éner-



Figure 1 : Pétition lancée par la Mairie de Marseille, juillet 2022

gies fossiles émettrices de gaz carbonique. Il faut déployer rapidement un ensemble de solutions : sobriété et efficacité énergétique d'abord, énergies décarbonées ensuite. Seule une combinaison de différentes solutions technologiques complémentaires, dont beaucoup sont en développement, pourra permettre d'affronter l'immense défi dont l'urgence grandit chaque jour.

### La propulsion des navires

La navigation, pour sa part, a utilisé majoritairement l'énergie éolienne jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle lorsque la vapeur s'est progressivement substituée à la voile. Gagnant en efficacité, la propulsion à vapeur s'est généralisée au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, commençant alors à s'effacer devant les moteurs à combustion interne qui propulsent aujourd'hui la quasi-totalité des navires.

Jusqu'en 2019, La plupart des navires de commerce utilisaient du fioul lourd ou HFO (Heavy Fuel Oil) résidu de distillation de pétrole, à forte teneur énergétique et faible coût, mais particulièrement polluant, notamment en matière d'oxydes de soufre, d'oxydes d'azote et de particules fines. Dans l'atmosphère, les composés soufrés et azotés émis se transforment en acides qui attaquent les sols, la végétation, les eaux et les bâtiments. Dans les océans, l'acidification entraîne une difficulté accrue pour constituer les habitats calcaires des coquillages et des coraux et réduit la capacité de l'océan à absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique.



Figure 2 : William Turner (1838) *Le dernier voyage du Téméraire*  
National Gallery, Londres

### Une réglementation qui se durcit

Le transport maritime est par nature et depuis l'origine mondialisé. La réglementation du transport maritime relève d'une instance internationale, l'Organisation Maritime Internationale (OMI), créée en 1948 et affiliée à l'ONU. À partir de 1973, l'OMI a émis une série de réglementations pour réduire les différentes pollutions de l'eau et de l'air (convention MARPOL).

En 2015, l'OMI a instauré en Baltique, Manche et Mer du Nord et le long des côtes d'Amérique du Nord des zones de contrôle et de restriction des émissions (zones ECA) des oxydes de soufre et d'oxydes d'azote. La Méditerranée sera zone ECA en 2025. De plus, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2020, la teneur en soufre des émissions est limitée, pour tous navires marchands, sur toutes les mers.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub>, l'OMI a défini en 2018 une stratégie visant à réduire les émissions annuelles de l'ensemble de la flotte mondiale d'au moins 50 % d'ici à 2050. Afin de contrôler la trajectoire vers l'objectif, l'OMI a établi des index d'efficacité énergétique exprimés en grammes de CO<sub>2</sub> par tonne au kilomètre transportée et dont la valeur maximale est imposée. Ce plafond est réduit au fil des ans, imposant aux navires un processus d'amélioration continue. À partir de 2023, les armateurs seront tenus de déclarer la quantité de carbone consommée annuellement par chaque

navire. Les navires seront ainsi classés de A à E. Un navire ayant obtenu la note D pendant trois années consécutives ou la note E devra présenter un plan de mesures pour atteindre la note C. Au-delà d'une période, les navires D et E seront interdits de navigation.

Dans le cadre du Pacte Vert (Green Deal) qui vise à faire de l'Europe en 2050 le premier continent neutre en carbone, l'Europe a durci les exigences de l'OMI pour les navires touchant les ports européens. La Commission a proposé au Par-

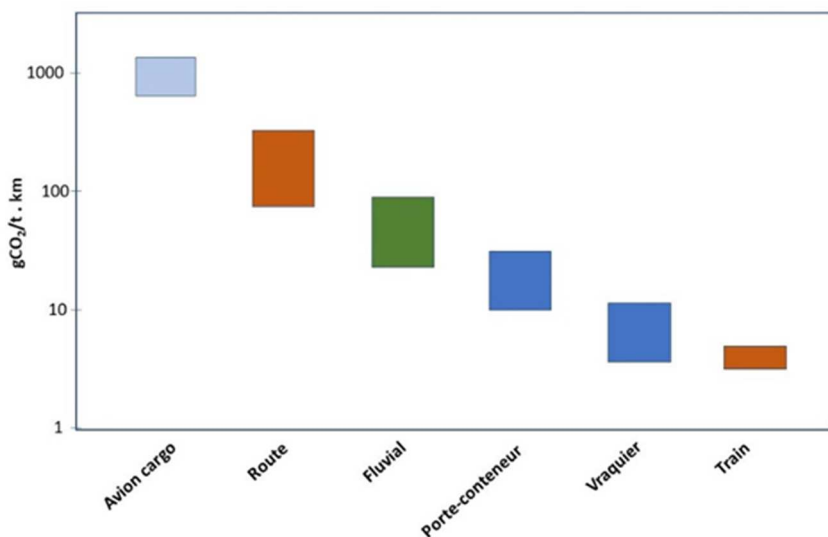


Figure 3 : Efficacité carbone de différents moyens de transport.

@AlainBOVIS d'après : *Information CO2 des prestations de transport - Guide méthodologique du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'énergie, octobre 2012*

En 2021, la flotte mondiale a consommé 330 millions de tonnes de carburant. Selon l'Organisation Maritime Internationale (OMI), les émissions de CO<sub>2</sub> du transport maritime et de la pêche ont atteint 1 076 millions de tonnes, soit 2,89 % des émissions anthropiques totales mondiales. Sans effort spécifique, l'OMI estime que ces émissions pourraient encore augmenter de 30 % d'ici à 2050, dans l'hypothèse admise jusqu'à présent d'un doublement du trafic.

lement un plan intermédiaire (Fit for 55 ou Ajustement pour 55) visant à la réduction de 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> en 2030. Son volet maritime (Fuel UE), en cours de discussion avec le Parlement vise une réduction de 75 % des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050.

Ces dispositions réglementaires sont soutenues par le mécanisme européen de quotas carbone (Emission Trading System) qui inclura le transport maritime à partir de 2023. Les navires devront couvrir leurs émissions par des autorisations, ou quotas, achetées à un prix en augmentation avec la diminution progressive du total des quotas alloués.

**Quelles sont les solutions technologiques disponibles ou envisageables ?**

### L'optimisation énergétique

Comme pour les voitures, la consommation de carburant d'un navire varie en gros comme le cube de sa vitesse. Ainsi pour un porte-conteneur, réduire la vitesse de 27 à 22 nœuds réduit la consommation de 50 %, et de 75 % à 18 nœuds. Il y a des inconvénients à la réduction de vitesse des navires existants : les moteurs optimisés pour la vitesse commerciale initiale sont moins performants à plus faible vitesse, avec une combustion moins complète. Ralentir les traversées réduit l'offre de transport entraînant un besoin accru de navires. La réduction de vitesse appliquée depuis plusieurs années reste néanmoins avantageuse en économies de carburant.

On estime que 20 % du temps d'un navire est passé en attente en rade ou à quai. La « navigation intelligente » consiste à utiliser un ensemble de moyens de simulation numérique pour optimiser la route et l'allure du navire en fonction des états de mer prévus sur le parcours de façon à arriver juste à temps avec une consommation minimale. Par ailleurs, différentes mesures de réglage ou de remplacement de différentes installations du navire (moteurs, carène, hélices, installations électriques, production d'eau, conditionnement d'air) peuvent être prises au neuvage ou en carénage pour économiser jusqu'à 30 % de carburant.

### L'élimination des oxydes de soufre et d'azote

La réglementation instaurée au 1<sup>er</sup> janvier 2020 a contraint



Figure 4 : Soutage au GNL du porte-conteneur Jacques Saadé (CMA-CGM)

tous les armateurs à adapter leur flotte en se tournant vers d'autres carburants (fuel à faible teneur de soufre ou gaz naturel) ou en équipant leurs navires de dispositifs de filtrage des fumées.

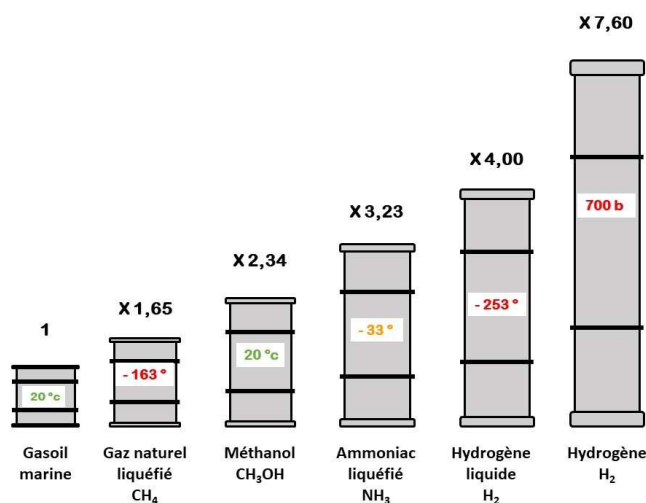


Figure 5 : Volume occupé par divers carburants pour une même quantité d'énergie

@AlainBOVIS d'après des données du Bureau Veritas)

La propulsion au gaz naturel (méthane) est la solution aujourd'hui privilégiée pour la construction de nouveaux navires car éliminant totalement les polluants en oxydes ou particules. Développée depuis plusieurs décennies pour les méthanières, la technologie de stockage en cuves cryogéniques du gaz liquéfié à -163 °C est aujourd'hui maîtrisée par la société française Gaz Transport et Technigaz qui jouit d'un monopole de fait mondial.

Le nombre de navires avec propulsion au GNL ou mixte est en augmentation constante. En 2022, on compte près de 600 navires en service ou en commande. Trois fois plus chère que la propulsion traditionnelle, la propulsion au GNL n'est appliquée aujourd'hui que pour le transport à haute valeur ajoutée de conteneurs et de passagers.

### L'objectif d'élimination des Gaz à Effet de Serre

Si la propulsion au GNL résout le problème des principaux polluants elle ne résout que très partiellement la question du CO<sub>2</sub>. De plus, la réduction estimée de 20 % des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux fuels traditionnels est partiellement compensée par les fuites de méthane qui est un gaz environ 30 fois plus nocif en termes d'effet de serre que le CO<sub>2</sub>.

De nombreuses recherches sont aujourd'hui consacrées à la définition et à l'industrialisation de fuels alternatifs neutres en carbone.

Les e-carburants sont des carburants de synthèse obtenus par combinaison d'hydrogène : le e-méthane est produit par recombinaison de CO<sub>2</sub> capturé et d'hydrogène. Le CO<sub>2</sub> émis par la combustion est recyclé. Le processus peut donc être considéré comme neutre en carbone. La chaîne logistique cryogénique et les moteurs sont identiques à ceux utilisés pour le GNL.

Le e-méthanol est produit, de la même façon par combinaison de CO<sub>2</sub> capturé, d'hydrogène et d'eau. Il est sous forme liquide donc sans risque de fuite atmosphérique mais ce produit est fortement toxique et inflammable, et son énergie massique n'est que de 40 % celle du méthane. De plus, sa production de 78 millions de tonnes par an est aujourd'hui limitée aux besoins de la chimie, loin des besoins maritimes de 330 millions de tonnes d'équivalent pétrole.

Beaucoup d'espoirs sont fondés sur l'ammoniac, gaz sans carbone, produit à partir d'azote atmosphérique et d'hydrogène vert. L'ammoniac est déjà largement produit pour les besoins de l'agriculture, notamment. Cependant les moteurs à ammoniac sont encore en développement et il n'y a pas de chaîne logistique maritime. Et l'ammoniac est également hautement toxique, inflammable, et corrosif. Si elle ne produit pas de CO<sub>2</sub>, la combustion de l'ammoniac produit des NOX et du N<sub>2</sub>O qui est 300 fois plus néfaste que le CO<sub>2</sub> pour l'effet de serre.

Armateurs, pétroliers et motoristes coopèrent pour le développement de ces différentes filières, dont aucune, pour l'instant, ne semble être privilégiée.

Tous les e-carburants nécessitent de combiner de grandes quantités d'hydrogène, gaz très léger qui n'existe pas à l'état naturel sur terre. Il faut donc le produire. Actuellement on en produit 74 millions de tonnes par an pour les besoins de l'industrie chimique essentiellement par réformage d'hydrocarbures (séparation moléculaire à haute température). Ce procédé produit également du CO<sub>2</sub>. On appelle le résultat hydrogène « noir ». Pour obtenir des carburants décarbonés, il est nécessaire d'utiliser de l'hydrogène « vert », c'est-à-dire obtenu par électrolyse de l'eau. Ce procédé nécessite beaucoup d'électricité qui doit être elle-même issue de sources décarbonées.

L'hydrogène peut également être utilisé directement comme carburant. Son utilisation directe se fait par piles à combustible, qui est un mode de production d'électricité par électrolyse inverse.

De faible densité énergétique (entre 15 et 30 fois moins que le diesel), l'hydrogène se prête mal aux applications de mobilité. En revanche, il peut être un moyen efficace de stockage de l'énergie électrique intermittente et la production de e-carburants.

### La revanche de la propulsion à voile

La voile, symbole de l'aventure nautique, n'a jamais été abandonnée. Voiles, mâts, gréements, n'ont cessé de progresser grâce, notamment, aux sports nautiques et aux grandes courses au large. Les années 1980 ont vu la construction de l'*Alcyon* à turbovoiles du Commandant Cousteau et de grands voiliers de croisière de type *Wind Star* et *Club Med*.

Aujourd'hui, la voile s'inscrit parmi les solutions permettant de réduire la consommation d'hydrocarbures et les émissions polluantes dont le CO<sub>2</sub>. Cependant, l'efficacité des gréements diminue avec la taille des navires. Deux approches sont donc suivies en parallèles.

En propulsion auxiliaire, pour les grands navires, il est attendu

de la voile une réduction allant jusqu'à 40 % de consommation, sur certaines sections de parcours avec conditions de vent favorables. Les gains peuvent être maximisés avec l'optimisation du routage. En moyenne sur une traversée, le gain espéré est de l'ordre de 20 %. C'est la démarche proposée par plusieurs architectes navals. Plusieurs projets basés sur différentes technologies de voilures sont en expérimentation ou en construction comme le cargo roulier *Ville de Bordeaux* affrété par Airbus équipé d'un cerf-volant Airseas, ou le *Canopée* d'Ariane Group en cours de gréement avec des voiles rigides OceanWings, ou encore le projet WISAMO d'installation sur un roulier porte-conteneurs d'une voile gonflable conçue par Michelin.



Figure 6 : Roulier canopée de Zéphyr et Borée équipé de voiles OceanWings d'Ayro

En propulsion principale, la voile reste limitée à des applications spécifiques marginales, car fortement dépendantes des conditions météorologiques. La société havraise TOWT affrète des vieux gréements, pour transporter des marchandises à haute valeur ajoutée (cacao, rhum, thé, café) sur différentes lignes transatlantiques. La chocolaterie *Grain de Sail* créée à Morlaix en 2013 suit une démarche identique avec une première goélette lancée en 2020, suivie d'un voilier-cargo de 52 m livrable en 2023.

Ce type de navires, sur les routes utilisées, peuvent prétendre jusqu'à 90 % de réduction de consommation de carburant et donc d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Au total, en propulsion principale ou propulsion auxiliaire, la propulsion vélique pourrait apporter, selon les études, une réduction de 5 % à l'échelle de 2050 des émissions de CO<sub>2</sub> du transport maritime.

### Autres pistes

Malgré le spectaculaire tour du monde réalisé par le *Turanor Planet Solar* en 2019, l'énergie solaire a peu de chances de fournir une solution réaliste à la propulsion navale. L'extrapolation homothétique de ce prototype à un navire de transport nécessiterait en l'état actuel de la technologie six ou sept fois la surface totale du navire en panneaux solaires. Cependant certains projets proposent de combiner panneaux solaires et un stockage en batterie à haute capacité pour alimenter une propulsion combinée vélique-électrique.

La propulsion nucléaire a été expérimentée dès le début des années 1960, d'abord sur des brise-glaces par les soviétiques (onze brise-glaces ont été construits à ce jour) puis sur trois cargos, le *Savannah* américain en 1962, le *Mutsu Maru* japonais en 1970 et le *Otto Hahn* allemand en 1979. Ces navires ont été affectés par de nombreux problèmes de fuites et de radioprotection et finirent par être refusés dans beaucoup de ports.

Cependant, depuis plus de 50 ans, la technologie de propulsion nucléaire a été maîtrisée sur les navires militaires, sous-marins et porte-avions, notamment aux États-Unis et en France. Par ailleurs se développent actuellement dans le monde de nombreux projets de petits réacteurs terrestres dont la puissance, la compacité et la sûreté intrinsèque pourraient les rendre adaptables à la propulsion de grands navires. Le coût et la difficile acceptabilité par l'opinion publique restent des obstacles importants.

Les batteries Li-ion sont activement étudiées pour les applications de mobilité qu'elles soient terrestres, aériennes ou maritimes. Elles présentent cependant encore certains risques qui empêchent leur généralisation. Elles contiennent notamment de l'électrolyte inflammable et même explosif, d'autant plus dangereux que cette technologie est susceptible d'emballerment thermique.

### **Reste la question du modèle économique**

Des investissements majeurs en Recherche et développement sont donc encore nécessaires. L'Europe, les États-Unis, le Japon, la Corée, la Chine ont engagé des programmes mais nombre d'initiatives sont aujourd'hui prises par les industriels : armateurs, énergéticiens, motoristes et chantiers navals.

Nous sommes à une durée de vie de navire de l'échéance de 2050. La quasi-totalité de la flotte marchande mondiale devra alors avoir été remplacée. Les solutions technologiques retenues conduiront inévitablement à des navires plus complexes et plus chers. C'est d'ailleurs une révolution technologique et industrielle qui pourrait relancer la construction navale européenne. Les carburants eux-mêmes seront plus chers et demanderont de nouvelles infrastructures lourdes pour leur production et leur distribution. Mais un coût de plus en plus élevé de la taxation du carbone, permettra d'éliminer transporteurs et navires qui ne se plieraient pas à cette transformation.

Le résultat en sera inévitablement un renchérissement significatif du transport maritime qui pourrait accélérer les relocalisations de certaines activités industrielles. C'est donc toute une recomposition de l'économie mondiale qui est à l'horizon.

*Alain Bovis*