

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

Alain Giacosa*

@ 36836

Mots-clés : transport maritime, GNL, transition énergétique, carburants, gaz à effet de serre

Le transport maritime est engagé dans la transition énergétique visant à réduire les émissions polluantes tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) et dans un contexte de forte croissance du trafic. La réduction de consommation ou les modes de propulsion naturelle comme la voile ne suffiront pas et de nouveaux carburants seront nécessaires. Le GNL (gaz naturel liquéfié) s'avère être le choix de moindres regrets : il est immédiatement disponible, réduit considérablement les polluants et d'environ 20 % les GES. L'incorporation progressive de biométhane puis de méthane de synthèse permettra d'atteindre la neutralité carbone sans rupture, évitant tout risque de coûts échoués.

Introduction

La flotte de commerce mondiale était constituée fin 2018 de 51684 navires de plus de 1000 t de port en lourd pour une capacité totale de 1964 millions de tonnes [Research, 2019]. Entre 2014 et 2019, le nombre de navires a augmenté de 8 % alors que la capacité a augmenté de 17 %, traduisant une augmentation sensible de capacité unitaire des navires neufs.

Environ 45000 navires entre 100 et 1000 t sont également en service pour une capacité additionnelle de seulement 14 millions de tonnes.

L'ensemble de la flotte a consommé en 2018 l'équivalent de 255 millions de tonnes équivalent pétrole et a émis entre 2,5 et 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ces chiffres sont importants en valeur absolue mais ramenés aux quantités transportées, le transport maritime reste l'un des moyens

de transport émettant le moins de CO₂. Par comparaison, la quantité de CO₂ émis pour transporter une tonne de marchandise sur un kilomètre (t.km) est de seulement 3 g/t.km pour un très gros porte-conteneur, alors qu'il est de 80 g pour un poids lourd (>40 t) et de 435 g pour un transport aérien [International chamber of shipping (ICS), 2015]. Le moyen le plus efficace de réduire les émissions globales est donc le transfert modal vers la voie maritime et fluviale. Pour autant, le transport maritime a engagé une ambitieuse transformation pour réduire considérablement ses émissions et rester le moyen de transport le plus respectueux de l'environnement.

Le principal carburant utilisé dans le transport maritime reste le HFO (fioul lourd) qui contenait jusqu'à 3,5 % de soufre. Ce taux maximum vient d'être réduit à 0,5 % voire 0,1 % dans certaines zones pour réduire la pollution. D'autres polluants atmosphériques font l'objet de réglementations internationales contraignantes en constante évolution. La pollution atmosphérique tout comme les gaz à

* Plateforme GNL (cf. biographies p. 71-72).

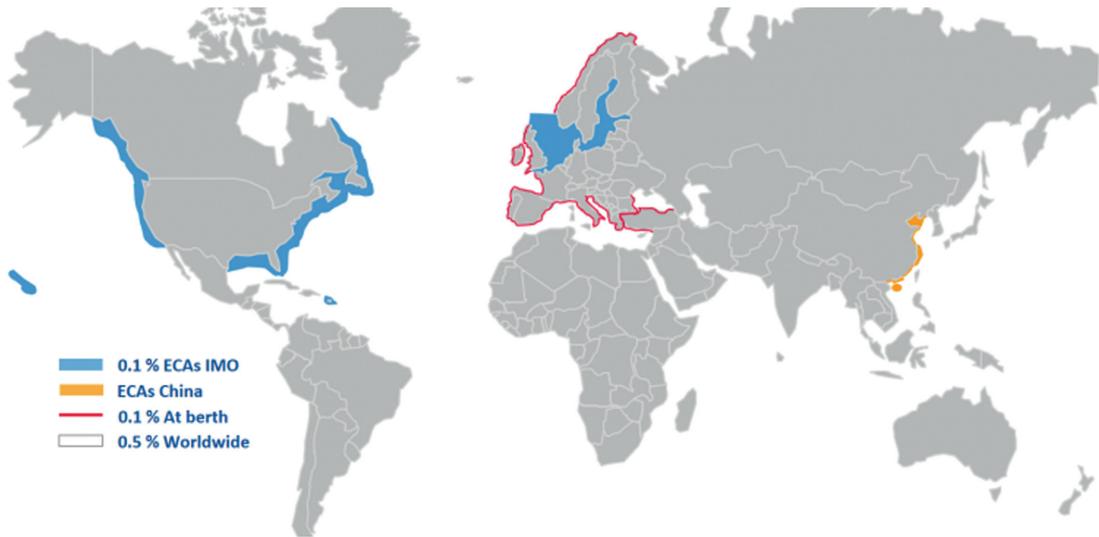


Figure 1. Carte des zones de contrôle des émissions de soufre

Source : Total

effet de serre ont déjà été fortement réduits et les efforts dans ce sens doivent être non seulement poursuivis mais amplifiés.

L'article va explorer une partie des enjeux auxquels sont confrontés les armateurs, en proposant une démarche qualitative de comparaison des divers carburants contribuant à la réduction de ces émissions.

Le transport maritime et son impact environnemental

Parce qu'il est l'un des symboles de la mondialisation, le transport maritime est accusé de nombreux maux et de plus en plus pointé du doigt. L'Organisation Maritime Internationale (OMI) a créé dès 1973 la convention internationale pour la prévention de la pollution des navires complétée par le protocole de 1978 (MARPOL 73/78). Plusieurs annexes ont été établies dans le cadre de cette convention, reflétant les priorités en matière de pollution du secteur maritime. Les annexes IV et V traitent des eaux usées et des ordures des navires. L'annexe VI votée en 1997 traitant de

la pollution de l'air par les navires est entrée en vigueur en 2005.

En matière de prévention de la pollution atmosphérique du transport maritime, on peut distinguer deux enjeux principaux : d'une part les rejets de produits qui affectent la santé (quelquefois appelés polluants locaux) comme les particules fines (PM), les oxydes d'azote ou le soufre et d'autre part les gaz à effet de serre (GES) qui ont une influence sur le changement climatique.

Au titre de l'annexe VI [OMI, s.d.], la teneur maximale en soufre des carburants marins a été réduite depuis le 1^{er} janvier 2020 de 3,5 à 0,5 % pour l'ensemble de la flotte. Un nouveau carburant, ou plutôt une famille de carburants, le VLSFO, a été élaboré par les raffineurs pour répondre à cette nouvelle réglementation. Ce carburant alimente désormais l'essentiel de la flotte de commerce et cette nouvelle réglementation va considérablement réduire les émissions de produits soufrés par le transport maritime. En effet, elle s'applique à l'ensemble des 96 États signataires de

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

cette convention qui représentent 96,72 % de la capacité de la flotte mondiale de commerce.

L'OMI a également fixé des règles plus strictes dans des zones de contrôle des émissions (ECA en anglais) afin de réglementer les émissions de soufre et/ou de NOx. Ces zones sont définies par les États demandeurs et approuvées au sein de l'OMI. À ce jour, deux zones ECA sont en vigueur pour le soufre : une bande de 200 miles le long des côtes nord-américaines et une zone comprenant la Manche, la mer Baltique et une partie de la mer du nord (voir Figure 1). L'OMI a été officiellement saisi d'un projet, soutenu par la France et l'ensemble des pays du bassin méditerranéen, visant à placer la mer Méditerranée en zone de contrôle des émissions [UNEP/MED IG, 2019] pour le soufre et les NOx. Dans ces zones, la teneur maximale de soufre est fixée à 0,1 % depuis 2015.

Enfin, dans le cadre de leur souveraineté dans les eaux territoriales, l'Union européenne a mis en place une réglementation qui fixe des seuils de teneur en soufre inférieurs à ceux de l'OMI sous certaines conditions et la Chine a délimité des zones où la navigation s'effectue obligatoirement avec des carburants à très

faible teneur en soufre. La Figure 1 permet de visualiser ces différentes zones.

Les émissions d'oxydes d'azote (NOx) sont également contrôlées dans le cadre de l'annexe VI de la convention MARPOL depuis 2000 (Tier I) pour l'ensemble des navires construits depuis cette date. Les valeurs limites autorisées ont été réduites de 20 % environ en 2011 (Tier II). Les émissions de NOx sont contrôlées dans la zone ECA Amérique du Nord depuis 2016 avec une réduction de 80 % (Tier III) par rapport au Tier I et le seront à partir de 2021 pour la zone ECA d'Europe du Nord. Ces limites s'appliquent uniquement aux constructions neuves dont la pose de la quille est postérieure à la date d'entrée en application de la mesure.

L'impact bénéfique de ces mesures sur la santé humaine est évalué dans un article de la revue *Nature* [Sofiev, 2018] publié en 2018. Alors que 400 000 décès prématurés sont attribués au transport maritime au niveau mondial, la réduction du taux de soufre permettrait à elle seule de réduire d'un tiers cette mortalité prématurée. L'étude ECAMED [Ineris, Cerema, Citepa & Citepa, 2019] réalisée par Ineris sur le bassin méditerranéen évalue l'impact du

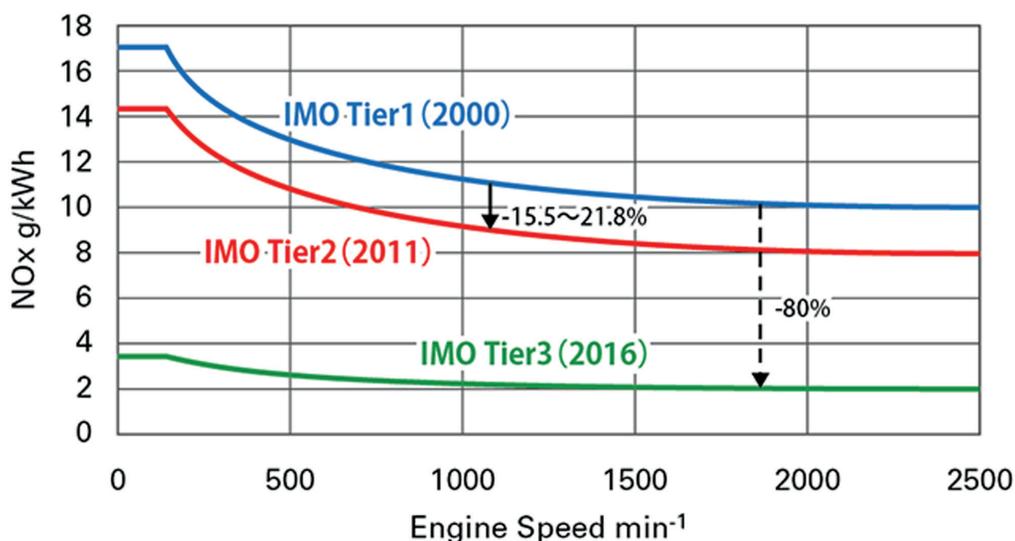


Figure 2. Limites d'émissions de NOx selon l'annexe VI de MARPOL

Réduction des émissions de GES du transport maritime

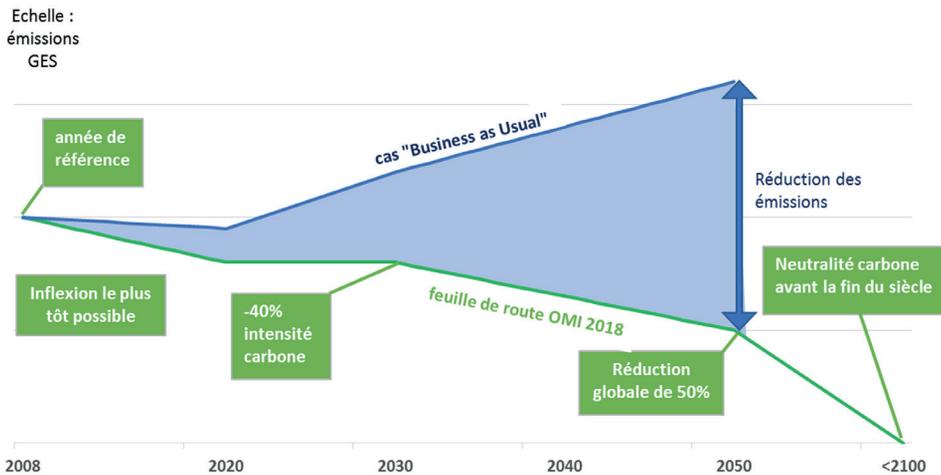


Figure 3. Représentation schématique des objectifs de réduction des GES

classement en zone ECA de la Méditerranée et évalue le bénéfice d'une zone ECA pour le soufre seul ou pour le soufre et les NOx.

L'autre enjeu est celui du changement climatique et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le transport maritime est l'un des moyens de transport les moins émetteurs de GES par t.km (la quantité de CO₂ émise pour transporter 1 tonne sur 1 km) avec moins de 10 g/t.km. Cependant il est responsable d'environ 3 % des émissions globales et du fait de sa croissance rapide et des efforts engagés dans d'autres secteurs cette proportion est appelée à augmenter. D'après la société de services DNV GL [DNV GL, 2019], les émissions sont ainsi passées de 770 Mt en 2013 à 870 Mt en 2018, suivant la croissance des volumes transportés. Une note de synthèse de l'Isemar [Isemar, 2017] analyse les mutations du transport maritime et montre que l'activité de ce secteur augmente deux fois plus vite que le PIB mondial.

C'est pourquoi l'OMI a défini dès 2011 un indice d'efficacité énergétique qui a été mis en application en 2013 (EEDI : *Energy Efficiency Design Index*) en vue d'améliorer

l'efficacité énergétique des navires et de favoriser les conceptions les plus économes en énergie. Exprimé en g CO₂/t.m (quantité de CO₂ rejeté par un navire à pleine capacité pour parcourir un mile nautique), les nouveaux navires doivent obligatoirement consommer moins de carburant. Sur la base d'une référence établie en 2014, l'objectif de réduction de l'indice est incrémenté tous les 5 ans : -10 % sur la période 2015-2020, -20 % pour la période 2020-2025, -30 % au-delà de 2025.

L'OMI a aussi adopté en avril 2018 une stratégie de réduction des émissions de GES et la feuille de route associée. L'objectif cible est une réduction des émissions globales de GES du transport maritime d'au moins 50 % en 2050 par rapport à 2008. Compte tenu de la croissance globale attendue, cet objectif correspond approximativement à une réduction de 70 % de l'intensité carbone à cet horizon.

Cet objectif s'accompagne de plusieurs jalons visant à infléchir le plus tôt possible la courbe des émissions, puis en 2030 à atteindre une réduction de l'intensité carbone (g.CO₂/t.km) de 40 % et le plus tôt possible la

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

neutralité carbone avant la fin du siècle. La Figure 3 illustre l'écart (en bleu) entre l'évolution naturelle des émissions et celles qui sont attendues de cette stratégie.

Plusieurs grandes compagnies privées et certains États comme le Royaume-Uni ou la Norvège ont cependant décidé dans le cadre de leur stratégie interne d'accélérer le calendrier et d'atteindre la neutralité carbone dès 2050. Toutes les solutions pour parvenir à cet objectif ne sont pas encore totalement disponibles mais plusieurs voies sont d'ores et déjà identifiées.

Les deux enjeux de la qualité de l'air et du changement climatique sont indissociables et doivent être pris simultanément. Leur impact économique a été chiffré à plusieurs reprises, par exemple dans l'étude Ecamed précitée. IVL, un organisme suédois mandaté par l'armateur Furetank, a évalué l'impact économique [Erik Fridell, 2017] pour un tanker de moyenne capacité évoluant en zone ECA nord Europe entre la propulsion GNL et celle utilisant du MGO. Trois cas ont été évalués, valorisant la tonne de CO₂ entre 6,6 €/t (scénario

bas), 90 €/t (scénario médian) et 168 €/t (scénario haut).

Cette estimation montre bien que les deux aspects ont un impact sociétal d'importance comparable et le bénéficie pour la société dans son ensemble de promouvoir la transition énergétique du transport maritime avec 2 M€/an d'externalités positives pour le scénario médian.

Une large gamme de solutions pour une flotte très diversifiée

L'examen global du secteur du transport maritime ne doit pas masquer la grande diversité de la flotte qui le constitue. Cette diversité s'exprime d'abord par la fonction des navires qui sont soit des navires de transport soit des navires de service. Pour les navires de transport, on distingue plusieurs familles selon la nature des biens transportés : véhicules, conteneurs, vrac liquide ou solide, passagers. Pour chaque type de bien transporté, l'amplitude de la capacité est de plus en plus grande avec des navires de très petite capacité et des géants des mers qui atteignent jusqu'à 400 m

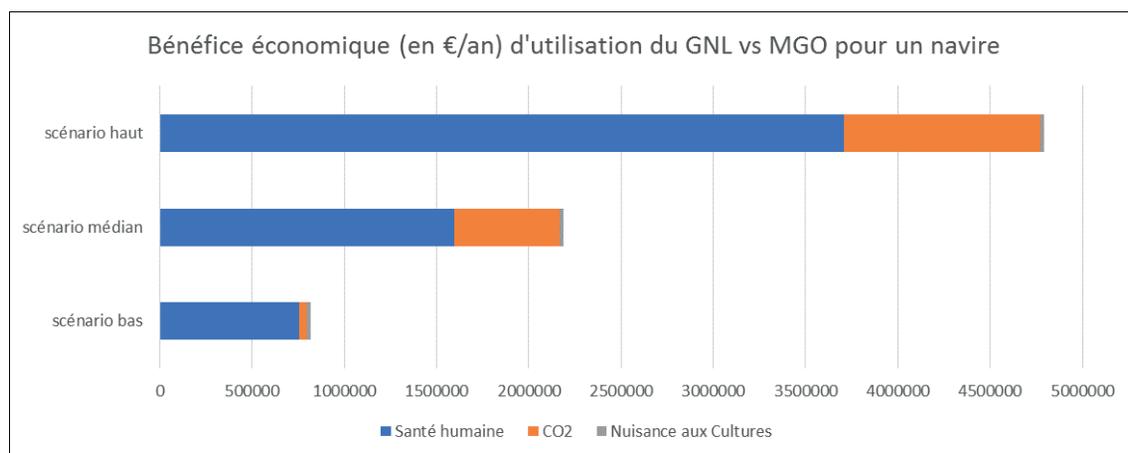


Figure 4. Externalités positives d'un navire GNL vs un navire conventionnel

Source : IVL

% du CO₂ émis

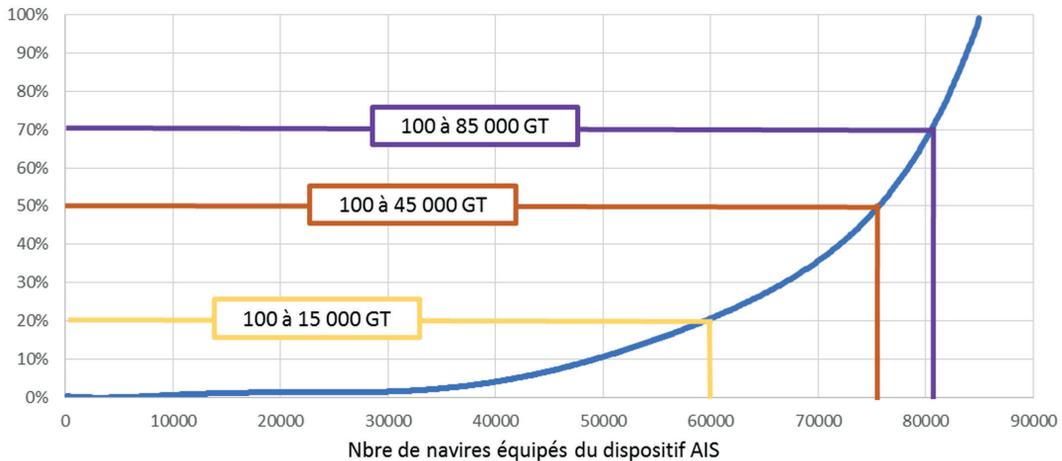


Figure 5. Émissions de CO₂ de 86 000 navires équipés d'AIS et analysé par taille des navires

Source : DNV GL

de longueur. Enfin, les distances parcourues sont très variables selon que le navire opère en navigation côtière — cabotage ou *Short Sea* — ou sur des grandes distances.

Une aussi grande diversité se trouvera dans les navires de services aux fonctions très variées et aux conditions d'exploitation adaptées aux zones de navigation.

Ainsi, les objectifs rappelés précédemment ne seront pas atteints de manière homogène par l'ensemble de la flotte ni avec les mêmes solutions.

Cette grande diversité de la flotte se traduit, en termes d'énergie, par une répartition des consommations que l'on peut, pour simplifier, évaluer en fonction de la taille des navires exprimée par leur jauge. DNV GL [DNV GL, 2019] a ainsi analysé les données de 2018 de tous les navires équipés du dispositif de positionnement AIS et a classé leurs émissions de CO₂ en fonction de leur jauge (GT). Cette analyse montre que 30 % des émissions proviennent de seulement 6 % des navires de plus de 85 000 GT (soit environ 5 000 navires). Ces navires sont principalement les porte-conteneurs,

les vraquiers et les tankers qui transportent de gros volumes sur de grandes voire très grandes distances. À l'inverse, presque 60 000 navires de moins de 15 000 GT soit 70 % de la flotte en nombre n'émettent que 20 % du CO₂ total.

La quasi-totalité de cette flotte utilise aujourd'hui des carburants issus du pétrole et a consommé dans sa globalité de l'ordre de 255 Mtep en 2018. Cette consommation devrait augmenter dans les prochaines années jusqu'à un pic autour de 280 Mtep au milieu de la décennie pour ensuite diminuer jusqu'à 210 Mtep en 2050, malgré une augmentation du trafic de l'ordre de 40 % à cet horizon. Jusqu'à la fin de 2019, cette consommation se répartissait entre les produits raffinés (MGO) et fioul lourd à très faible teneur en soufre (LSFO et VLSFO) pour environ 25 %. Le fioul lourd HFO constituait les trois quarts du carburant consommé. Les carburants alternatifs comme le gaz naturel, le méthanol ou l'électricité (batteries) ne représentent qu'une très faible part du total, de l'ordre de 0,1 % pour l'essentiel du gaz naturel consommé par la flotte de méthaniers et d'environ 200 navires de commerce propulsés au GNL.

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

En 2020, l'application de la nouvelle réglementation sur les émissions de soufre a quasiment inversé la proportion entre les produits faiblement soufrés et le HFO qui ne représenterait que moins de 20 % du total. Malgré une forte croissance, les carburants alternatifs ne représentent pas encore une proportion significative du mix et quelques unités fonctionnant à l'hydrogène commencent à être en opération.

Sur une flotte globale de quelque 60 000 navires (GT > 500 t), seulement 3 000 sont équipés de *scrubbers* et peuvent continuer à utiliser le HFO, environ 700 fonctionnent au gaz dont 500 sont des méthaniers ou autres navires gaziers et un faible nombre utilise le méthanol ou des batteries. 2 000 nouvelles installations de *scrubbers* sont prévues et 250 nouveaux navires-gaz sont en commande. Un projet pilote fonctionnant à l'ammoniac est prévu pour 2024.

La taille des navires ne devrait plus augmenter significativement car ils atteignent déjà des dimensions limites de nombreux ports. Des navires plus gros imposeraient de lourds travaux de dragage ou de travaux d'infrastructures portuaires. L'augmentation du trafic se traduira donc par une expansion de la flotte, avec des navires de plus en plus techniques pour réduire leur intensité énergétique. Les projections actuelles prévoient qu'environ la moitié des consommations proviendra des trafics de conteneurs et des vracs solides et liquides.

Pour atteindre les objectifs de l'OMI, les armateurs peuvent poursuivre les efforts déjà engagés dans plusieurs domaines. En premier lieu, la conception de navires avec de meilleures performances hydrodynamiques, des propulseurs plus performants et des revêtements de coque réduisant la traînée combinée à des mesures d'efficacité énergétique utilisant l'énergie éolienne (assistance vélique), solaire (PV), cinétique (stabilisateurs) ou thermique (ORC), des moteurs plus performants et une hybridation avec des packs de batteries, permet d'envisager des réductions de l'ordre de

15 à 20 %. La plupart des technologies sont existantes et déjà opérationnelles au stade de pilote industriel.

À ces améliorations techniques, l'optimisation de l'exploitation des navires par le choix des routes, l'ajustement de la vitesse, les taux de remplissage ou une maintenance optimale permettent un gain du même ordre de grandeur.

Ces améliorations sont nécessaires et contribueront fortement à réduire les émissions de polluants locaux, mais ne seront pas suffisantes pour atteindre l'objectif de réduction de moitié des émissions en 2050 et encore moins pour la neutralité carbone. Il est donc indispensable de rechercher des carburants alternatifs et de revoir les modes de propulsion des futurs navires.

La durée de vie d'un navire, de l'ordre de 20 à 30 ans, implique également de prendre en compte l'état de la flotte. Les navires commandés aujourd'hui seront livrés en 2022 au plus

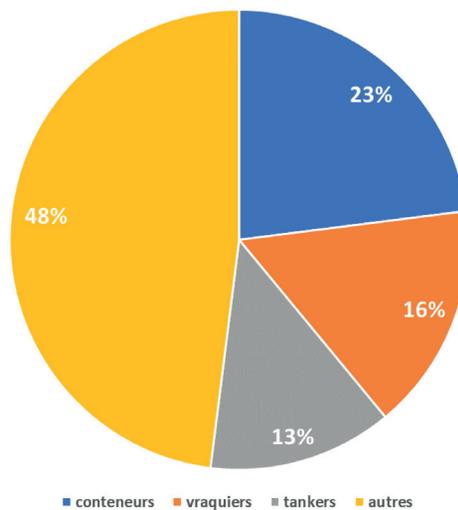


Figure 6. Répartition des consommations globales en 2050

Source : DNV GL

tôt et seront toujours en service, pour nombre d'entre eux, en 2050. Si certaines évolutions peuvent être installées facilement sur l'ensemble des navires, d'autres ne pourront l'être que sur des constructions neuves ou moyennant de gros travaux. La majorité des navires utilisant des modes de propulsion alternatifs sont aujourd'hui des navires neufs, qui ont l'avantage d'être conçus pour le mode de propulsion choisi. La conversion d'un navire existant pose de nombreux défis techniques et économiques qui exigent une parfaite maîtrise des technologies mises en œuvre. Sur le plan technique, l'implantation des réservoirs ou de la salle des machines ne doit pas compromettre la stabilité du navire. Sur le plan économique, un arrêt prolongé peut rapidement constituer un frein majeur à toute transformation en profondeur du navire. La transformation globale de la flotte ne peut s'envisager que sur une longue période (en première approche une dizaine d'années) avec pour chaque technologie les phases d'expérimentation, d'élaboration des codes et normes, d'apprentissage pour les chantiers de construction et de formation des équipages puis de déploiement des infrastructures nécessaires à l'exploitation (chantiers de réparation, production et distribution des carburants) et enfin diffusion à grande échelle sur constructions neuves et rétrofit de navires existants.

Pour établir la comparaison entre énergies, la seule mesure des émissions à l'échappement n'est plus suffisante. La méthode de l'analyse du cycle de vie dite du puits à l'hélice (W-t-W ou *Well-to-Wake* en anglais) est nécessaire pour tenir compte de l'ensemble du cycle de vie des produits. Ainsi, les piles à combustibles hydrogène ne rejettent que de l'eau mais les émissions lors de la production de l'hydrogène peuvent varier considérablement selon qu'il est fabriqué par vaporeformage de méthane (environ 9,3 kg CO₂/kg de H₂) ou à partir d'électricité renouvelable (entre 2 kg CO₂/kg pour le solaire et 0,5 pour l'éolien). Une comparaison complète devrait également tenir compte de l'utilisation des ressources, en particulier des plus critiques comme les métaux rares ou précieux par exemple. Nous nous

limiterons ici à une comparaison sommaire et qualitative des principaux carburants envisageables pour le secteur maritime :

- Les biocarburants liquides [IFPEN, 2015], aussi connus sous le terme de HVO (*hydrotreated vegetable oil*) produits à partir de produits agricoles. Ils présentent l'avantage d'une grande densité énergétique et de fonctionner avec la flotte existante moyennant de faibles adaptations du navire. En revanche, la première génération de ces carburants utilise des produits cultivés mobilisant des terres arables et des ressources en eau, en conflit potentiel avec l'alimentation humaine ou animale et susceptible d'accélérer la déforestation. Une deuxième génération de produits issus des résidus ligno-cellulosiques est en développement industriel mais reste faible au regard de la demande. Une troisième génération de carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène est aussi envisagée au stade du laboratoire mais ne sera pas disponible avant plusieurs années. Par souci de simplification, le terme HVO regroupera par la suite l'ensemble de ces carburants.

- L'électricité stockée en batteries est d'ores et déjà disponible pour des navires de taille modeste et parcourant de faibles distances. Les ferries scandinaves pour traverser les fjords sont déjà en service. Cette technologie reste limitée à un type d'usage qui représente un grand nombre de navires mais une faible part de la consommation globale d'énergie. L'accès aux batteries de type Li-ion risque d'être limité du fait de la compétition avec d'autres secteurs industriels comme l'automobile ou le stockage statique d'électricité. Quelques projets envisagent l'usage de batteries à flux qui n'ont à ce jour aucune application dans le secteur de la mobilité. Le principal inconvénient des batteries est leur faible densité énergétique. Elles joueront cependant un rôle important en matière d'hybridation avec l'ensemble des motorisations thermiques.

- L'hydrogène faiblement carboné, produit à partir d'électricité, offre un bilan environnemental très satisfaisant tant en termes de

pollution que de GES. Mais sa faible densité énergétique ne lui permettra pas de propulser les navires parcourant de grandes distances. Par ailleurs, il n'existe pas de piles à combustibles (PAC) de grande puissance, et la multiplication de PAC dans une salle de machines occuperait un espace très supérieur à celui des moteurs à combustion interne. En revanche l'hydrogène est déjà utilisé pour quelques navires de navigation côtière où il trouvera une place dès que son coût de production sera compétitif. Comme pour les batteries, un grand nombre de navires est susceptible de fonctionner avec l'hydrogène mais pour une faible part de la consommation globale.

- Le GNL est aujourd'hui le carburant le plus utilisé car il est disponible en abondance, compétitif et il respecte — et même bien au-delà — les seuils d'émission des polluants locaux. Son impact sur les émissions de GES dépend du type de motorisation utilisée. Le cabinet Thinkstep [Al O. S., 2019] a analysé le cycle de vie complet et conclut à un gain de 7 à 21 % par rapport à une propulsion HFO.

Le principal constituant du GNL est le méthane. Il est donc possible de substituer ce carburant par du méthane produit à partir de biomasse ou par synthèse. Pour distinguer ces productions, on utilise les termes de bioGNL, de biométhane liquide ou de méthane de synthèse liquide (en anglais, LBM pour *Liquefied BioMethane* et LSM pour *Liquefied Synthetic Methane*).

Très récemment, le transport du GPL a commencé à adopter des motorisations fonctionnant avec le gaz transporté. Par simplification, ces navires seront assimilés au GNL car les caractéristiques sont très proches et que seuls les navires gaziers sont concernés à ce jour.

- L'ammoniac qui est déjà produit en grandes quantités pour la fabrication d'engrais ou la chimie. Son usage comme carburant reste à développer mais l'absence de carbone dans sa composition le rend compatible avec l'objectif de neutralité carbone lorsqu'il est produit à partir d'hydrogène vert. Il est utilisable aussi bien dans des moteurs à combustion que des PAC, mais ces dernières ne sont pas encore

industrialisées pour les grandes puissances. L'ammoniac a l'avantage de pouvoir être stocké à température ambiante mais a une faible densité énergétique en volume. Les principaux inconvénients sont sa toxicité et une forte production de NOx lors de son utilisation, imposant un traitement post combustion.

- Le fioul lourd HFO associé à des dispositifs de lavage des fumées ou *scrubbers*. L'OMI a autorisé l'usage de carburants soufrés à condition d'éliminer le soufre dans les produits de combustion par des dispositifs de lavage des fumées. Il existe des dispositifs en boucle ouverte qui utilisent l'eau de mer pour précipiter le soufre, en boucle fermée avec l'addition d'un produit pour précipiter le soufre ou hybride pour utiliser l'une ou l'autre solution. Une expérimentation avec un procédé de traitement sec a été réalisée avec succès par l'armateur français La Méridionale, mais ce procédé reste marginal à ce jour, malgré des résultats excellents en termes d'efficacité. L'installation de ces dispositifs sur les parties hautes du navire est parfois complexe voire impossible sur des navires existants. L'avantage de ces dispositifs est d'utiliser l'ensemble de la chaîne de propulsion existante du navire tout en bénéficiant d'un carburant connu et disponible. En revanche, une incertitude demeure sur l'impact environnemental réel de ces dispositifs qui sont interdits dans certaines zones. L'OMI a engagé un travail d'évaluation sur le sujet. Une autre incertitude porte sur la rentabilité de ces équipements fondée uniquement sur la prévision d'un écart de prix important avec le VLSFO. Les premiers mois de 2020 n'ont pas validé cette hypothèse.

Un panorama complet de l'état de certains de ces carburants a été réalisé par SEA LNG [SEA LNG, 2019] permettant de visualiser les principaux paramètres de comparaison entre ces carburants et notamment leur disponibilité commerciale.

Ce panorama donne une vision de la situation telle qu'elle est en 2019. Une analyse prospective présentée ci-après permet d'imaginer comment évoluera la situation dans les

KEY TAKE AWAYS

ENERGY SOURCE FUEL	FOSSIL (WITHOUT CCS)								
	HFO + SCRUBBER	LOW SULPHUR FUELS	LNG	METHANOL	LPG	BIO HVO (Advanced biodiesel)	AMMONIA	RENEWABLE ⁽³⁾ HYDROGEN	FULLY ELECTRIC
Highest priority parameters									
Energy density	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Technological maturity	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Local emissions	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GHG emissions	●	●	● ⁽²⁾	●	●	●	●	●	●
Energy cost	●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁴⁾
Capital cost	Converter	●	●	●	●	●	●	●	●
	Storage	●	●	●	●	●	●	●	●
Bunkering availability	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Commercial readiness ⁽¹⁾	●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁵⁾
Other parameters									
Flammability	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Toxicity	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regulations and guidelines	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Global production capacity and locations	●	●	●	●	●	●	●	●	●

(1) Taking into account maturity and availability of technology and fuel. (2) GHG benefits for LNG, methanol and LPG will increase proportionally with the fraction of corresponding bio or synthetic energy carrier used as drop-in fuel. (3) Results for ammonia, hydrogen and fully-electric shown only for renewable energy sources since this represents long term solutions with the potential for decarbonizing shipping. Production from fossil energy sources without CCS (mainly the case today) will have a significant effect on results. (4) Large regional variations. (5) Needs to be evaluated case-by-case. Not applicable for deep-sea shipping.

Figure 7. Comparaison des différents carburants marins selon plusieurs paramètres

Source : SEA LNG

prochaines années, dans le respect des objectifs fixés par l'OMI. Elle portera sur trois horizons de temps :

- Le court terme, pour les 5 prochaines années. À cet horizon, seules les technologies matures et les carburants déjà disponibles pourront être sélectionnés par les armateurs.
- Le moyen terme, en 2030, qui correspond au premier jalon fixé par l'OMI. À cet horizon, de nouveaux carburants commenceront à apparaître et quelques technologies nouvelles atteindront le stade de l'industrialisation, offrant de nouveaux choix.
- Le long terme, au-delà de 2040, où tous les carburants alternatifs pourraient être fabriqués en volume et les technologies nouvelles industrialisées.

Compte tenu de la constitution de la flotte, l'analyse ne portera que sur la navigation au long cours et les navires de grande taille qui représentent 80 % de la consommation de carburant. De ce fait, les solutions électriques à batteries et l'hydrogène ne seront pas analysés. Ces solutions restent néanmoins valables pour les usages côtiers et de cabotage et pourront concerner un grand nombre de navires.

Tous les paramètres ne peuvent être analysés de manière prospective. L'analyse portera sur l'impact environnemental par un indice pondéré pour moitié sur les polluants locaux et pour moitié sur les GES. L'autre paramètre retenu sera la VAN (valeur actuelle nette), évaluée de manière qualitative à partir des

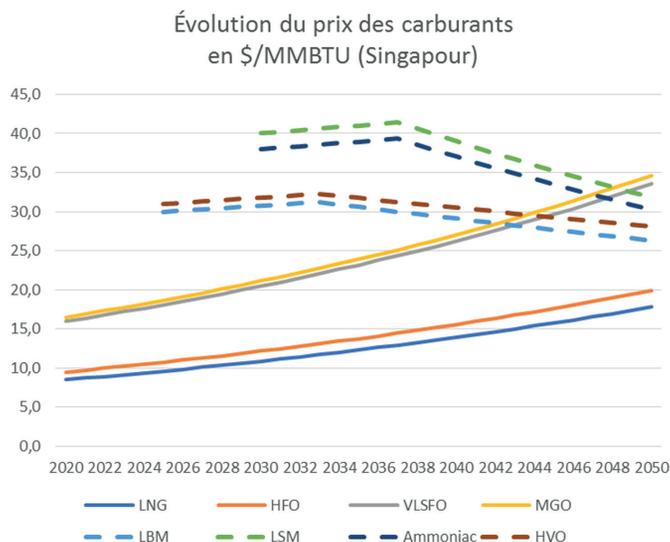


Figure 8. Hypothèse d'évolution des prix des carburants marins

résultats d'études menées par SEA LNG¹ pour le court terme et extrapolées pour le moyen et long terme. Cette valeur représente un critère important de prise de décision pour l'armateur qui, *in fine*, sera l'acteur économique qui décidera des évolutions futures par ses choix d'investissements. L'effet de la crise Covid-19 n'est pas pris en compte et les évaluations ont été faites avant l'apparition de cette crise.

Les résultats seront présentés (Figure 9 et suivantes) en valeurs relatives sur un graphique à deux axes. L'axe horizontal représente la valeur actuelle nette (VAN) des différents carburants par rapport au carburant de référence de la période. L'axe vertical représente l'impact environnemental par rapport aux seuils de la période considérée. Pour chaque période, l'origine de chacun des axes est la même et correspond au carburant de référence actuel, le VLSFO. Afin de tenir compte de l'évolution des situations réglementaires et économiques, la position de ce carburant évoluera au fil du temps.

Pour les estimations de la VAN, les hypothèses retenues pour les carburants déjà disponibles sont celles de la dernière étude publiée

par SEA-LNG en février 2020 portant sur les transports de vrac solide. Les prix sont les moyennes observées à Singapour en janvier 2020 inflatées de 2,5 % par an. Les prix des nouveaux carburants (et 2^e génération pour le HVO) sont très difficiles à estimer et ne représentent qu'une tendance. Ils évoluent de 0,5 % par an pendant 10 ans puis baissent rapidement par l'augmentation des volumes. Ils sont représentés en pointillé sur la Figure 8.

À court terme, le GNL offre le meilleur bilan global

Pour le court terme, les carburants disponibles et disposant d'une infrastructure de distribution sont le HFO, le VLSFO (fioul lourd à moins de 0,5 % de soufre et MGO) et le GNL tels que figurant sur la Figure 9.

Pour cette période, le VLSFO est carburant de référence et par définition sa position est à l'origine des deux axes.

L'utilisation de HFO avec des *scrubbers* ne réduit ni les émissions de polluants locaux ni les GES, mais au contraire augmente

TRANSPORT MARITIME

	VLSFO *	HFO + Scrubbers	GNL
Polluants locaux	100	90	180
GES	100	90	115
impact environnemental **	100	90	147,5
VAN	100	125	120

* carburant de référence pour la période court terme

** pondération 50/50 entre polluants locaux et GES

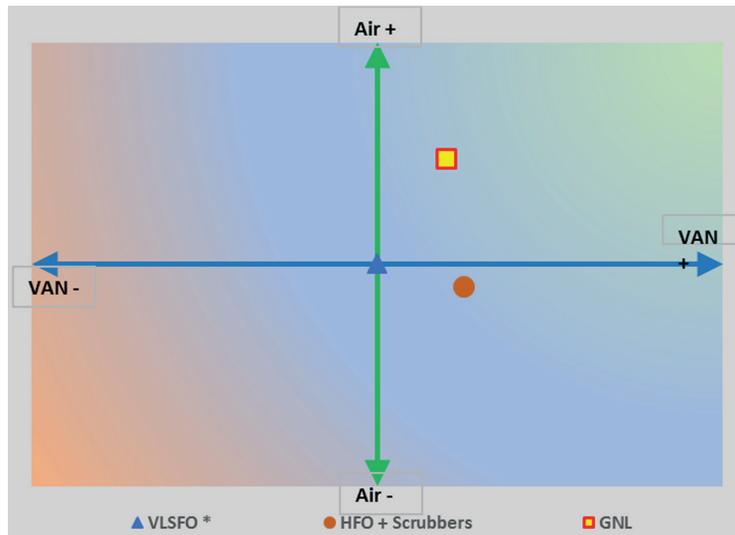


Figure 9. Comparaison économique et environnementale à horizon 2025

légèrement — de 2 à 3 % — la consommation du navire du fait du fonctionnement des pompes. Si les suies sont entraînées par le lavage, la réduction des PM et des NOx n'est pas avérée. Le GNL présente un bilan environnemental bien meilleur. Les polluants locaux sont réduits dans de grandes proportions, avec une suppression presque totale des PM et du soufre et une réduction de plus de 80 % des NOx. La réduction de GES est moins importante mais réelle et évaluée en moyenne à 15 % sur l'ensemble du cycle de vie.

Sur le plan économique, le prix du HFO est plus faible que le carburant de référence du fait de l'effondrement de la demande au 1^{er} janvier 2020, date d'entrée en application des nouveaux seuils de teneur en soufre rendant l'opération plus économique. Il reste cependant légèrement plus élevé que le GNL. Le GNL procure aussi un bilan économique

positif car, malgré un surcoût significatif du navire à l'achat, le prix du GNL devrait rester sensiblement moins élevé que celui du carburant de référence, procurant un meilleur bilan économique.

Le GNL est clairement l'option qui permet tout à la fois de réduire sensiblement l'impact environnemental et de procurer un retour sur investissement positif à l'armateur. Plusieurs témoignages d'armateurs opérant déjà des navires fonctionnant au GNL confirment ce constat. De même, les prises de commandes de nouveaux navires se poursuivent avec en particulier la commande des deux premiers VLCC (*Very Large Crude Carrier*) GNL affrétés par Total ou celle de 12 tankers pour Shell.

Le choix du HFO + *scrubber* peut présenter un avantage économique avec un retour sur investissement légèrement meilleur mais

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

	VLSFO *	HFO + Scrubbers	GNL	HVO	LBM	FO + 20% HVO	GNL + 10% LBM
Polluants locaux	100	90	180	110	180	102	180
GES	60	50	80	180	190	84	91
impact environnemental **	80	70	130	145	185	93	135,5
VAN	90	90	120	60	60	84	114

* carburant de référence pour la période court terme

** pondération 50/50 entre polluants locaux et GES

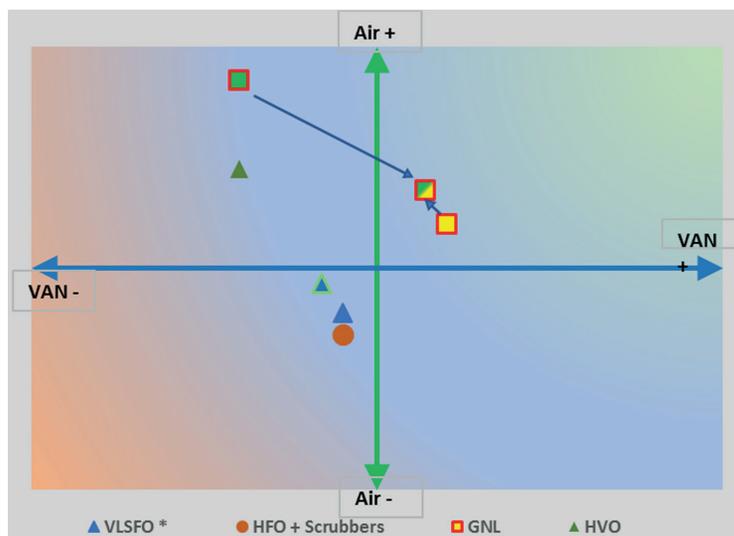


Figure 10. Comparaison économique et environnementale à horizon 2030

au détriment des émissions atmosphériques. Les premières cotations du VLSFO en début d'année ont cependant montré un écart de prix bien plus faible que prévu, susceptible de rapidement remettre en cause l'avantage économique.

Le risque d'interdiction des *scrubbers* dans certaines zones de navigation ne peut pas être écarté. Dans ce cas, la consommation de HFO serait remplacée par du MGO dans ces zones, réduisant considérablement l'avantage économique.

À moyen terme, le GNL s'inscrit bien dans la trajectoire de réduction des GES

En se projetant en 2030, aucun nouveau carburant n'apparaîtra, hormis les productions

de biométhane et de biocarburant HVO. L'état actuel des publications nous laisse penser que les carburants de synthèse comme le méthane ou l'ammoniac ne seront disponibles pour le secteur maritime qu'en très faibles quantités à cet horizon.

En 2030, l'utilisation généralisée du VLSFO ne permettra pas d'atteindre l'objectif de l'OMI de réduction des émissions de GES. Alors qu'il servait de référence à court terme, il présentera un bilan environnemental négatif en 2030 du fait de l'évolution du cadre de référence.

En l'absence de nouvelle réglementation sur les polluants locaux, le GNL conserve son avantage. En revanche, l'objectif de réduction des GES n'est pas garanti.

Pour atteindre les objectifs environnementaux, de nouveaux carburants devront

apparaître et il est probable que seuls les carburants directement utilisables par les navires en service seront disponibles à cet horizon, c'est-à-dire les biocarburants type HVO ou le biométhane.

Les HVO ont déjà été utilisés pour des tests sur des navires de commerce et ont montré leur capacité à remplacer tout ou partie des carburants fossiles. D'ici 2030, les carburants de 2^e génération commenceront à être disponibles avec un bilan carbone très faible. L'impact sur les polluants locaux sera en revanche faible.

Le biométhane issu de la valorisation des déchets et cultures intermédiaires (couverture végétale en dehors des périodes de cultures agricoles) est équivalent au GNL pour les

polluants locaux et présente un bilan carbone très faible. Un taux d'incorporation de 10 % de biométhane dans le GNL est suffisant pour garantir le respect des objectifs.

Sur le plan économique, une valorisation du CO₂ est probable et pénalisera les carburants fossiles. Le bilan économique des VLSFO, du HFO et du GNL va donc se dégrader pour compenser les émissions de GES. Les nouveaux carburants issus de la biomasse ont un bon bilan carbone mais leur coût de production est élevé. Le scénario d'une incorporation de ces biocarburants liquides ou gazeux dans les carburants fossiles permettra d'atteindre ou d'approcher les objectifs. Nous avons calculé l'impact d'un taux d'incorporation de 20 % pour les liquides et 10 % pour le gaz.

	VLSFO *	HFO + Scrubbers	GNL	HVO	LBM	LSM	Ammoniac
Polluants locaux	75	60	120	80	120	120	120
GES	20	10	40	180	180	170	180
impact environnemental **	47,5	35	80	130	150	145	150
VAN	50	30	140	70	100	80	80

* carburant de référence pour la période court terme

** pondération 50/50 entre polluants locaux et GES

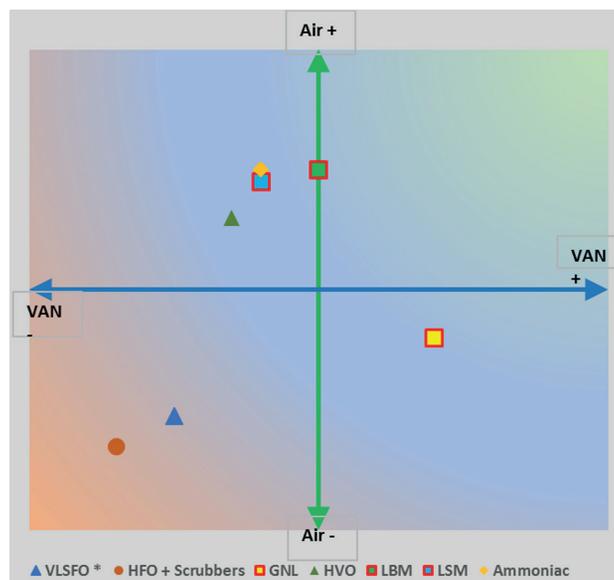


Figure 11. Comparaison économique et environnementale à horizon 2050

Le GNL : le meilleur choix pour la transition énergétique du transport maritime

Avec ces hypothèses, le mélange GNL + 10 % biométhane permet de respecter l'objectif de 40 % de réduction des émissions des GES tout en préservant un bilan économique favorable. Les carburants issus de la biomasse ont un surcoût important tandis que les carburants traditionnels ne sont ni économiques (avec une valorisation du CO₂) ni capables d'atteindre les objectifs.

Sur le long terme, le GNL est le choix de moindres regrets

Les projections à long terme sont naturellement plus incertaines. Aux carburants déjà mentionnés, de nouveaux carburants fortement décarbonés et peu polluants pourront apparaître, comme l'ammoniac ou le méthane de synthèse ou des carburants liquides de 3^e génération. À cet horizon, les émissions de polluants locaux seront plus encadrées. Sans préjuger des décisions qui seront prises, l'hypothèse est faite de généraliser le taux de NOx au niveau Tier III et d'imposer une limite pour les particules fines.

De la même façon que cela a été abordé pour le moyen terme, les performances du VLSFO et du HFO + *scrubbers* se dégradent du fait d'un changement du référentiel. Ils ne contribuent pas à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES et s'éloignent des limites autorisées pour les polluants locaux du fait des nouvelles réglementations à venir.

Le GNL subira la même évolution de référentiel mais sera toujours conforme aux seuils de polluants locaux, sans post traitement. En revanche, le bilan GES se dégrade dans les mêmes proportions.

La production de biocarburants sera plus importante et ils sont fortement décarbonés. En revanche, les biocarburants liquides, à l'instar des FO, ne respecteront plus les exigences en matière de rejets polluants imposant un dispositif de traitement post combustion.

L'ammoniac produit à partir d'hydrogène vert ne contient que peu de carbone et sa combustion est donc faiblement carbonée. Cependant, ce produit est toxique et sa combustion produit de grandes quantités de NOx qu'il faudra traiter.

La production de méthane de synthèse à partir d'hydrogène vert et de CO₂ capturé dans l'atmosphère offre un impact environnemental comparable à l'ammoniac en termes de GES et au GNL en termes de polluants.

Au niveau économique, la compensation des GES, l'ajout de traitements post combustion et les projections de prix du pétrole brut à long terme à la hausse vont fortement pénaliser les navires utilisant le VLSFO et le HFO. Le GNL le sera dans une moindre mesure car il n'aura qu'à compenser les émissions de GES mais en contrepartie, le coût de construction des navires bénéficiera de l'absence de traitements post combustion et de coûts de construction en baisse du fait de la compétition entre chantiers et d'un effet de série sur les équipements cryogéniques.

Les coûts de production des biocarburants liquides et gazeux baisseront à la faveur d'une forte augmentation des volumes produits. Le prix de production de l'ammoniac et des produits de synthèse à partir d'hydrogène sera essentiellement influencé par celui de l'électricité.

L'approche qualitative retenue dans cet article peut être complétée par d'autres approches chiffrées, notamment le rapport publié par le consultant CE Delf [Al D. N., 2020] sur la disponibilité du biométhane et du méthane de synthèse. Chaque lecteur pourra aussi se livrer à sa propre estimation en utilisant un modèle simple mais représentatif.

Le GNL reste la solution économique mais ne respecte plus les objectifs de GES. L'incorporation de biométhane ou de méthane de synthèse est nécessaire en grande proportion, de l'ordre de 50 %. Le choix entre biométhane et méthane de synthèse se fera en fonction

de la disponibilité et du prix de ces carburants. L'interchangeabilité totale du GNL et du biométhane ou méthane de synthèse offre à l'armateur un moyen de piloter ses achats de carburant pour réconcilier au mieux le respect de l'environnement avec les impératifs économiques.

Tous les investissements réalisés sur la période sont utilisables indifféremment pour le GNL, le biométhane et le méthane de synthèse. Il n'y a donc aucun coût échoué. Sur la route d'un impact environnemental minimum, tant pour les polluants locaux que pour les gaz à effet de serre, le chemin qui passe par l'étape GNL permet d'atteindre plus rapidement les objectifs, avec un minimum d'investissements cumulés. Selon la méthode des regrets (algorithme de Balas-Hammer), le GNL constitue assurément la meilleure voie, celle de moindres regrets.

Les FO en revanche seront fortement pénalisés par le durcissement probable des réglementations et l'évolution attendue des prix du pétrole auquel le GNL est bien moins sensible.

Enfin les carburants à faible intensité carbone, liquides ou gazeux, sont conformes aux exigences environnementales mais auront un coût bien plus élevé.

La transition énergétique s'avère possible mais imposera une adaptation du modèle économique du transport maritime avec des navires plus technologiques et des modes de propulsion plus variés. Plus qu'une probable augmentation du prix du service de transport, la concurrence entre transporteurs s'exercera au travers de la vitesse, des impacts environnementaux ou de la flexibilité des opérations. Les premiers signaux faibles d'une telle évolution peuvent se voir dans l'application d'une surcharge «IMO 2020» pour répercuter le surcoût carburant aux transporteurs ou par des commandes de navires rapides pour répondre à l'émergence d'une offre ferroviaire (locomotives diesel pour les longues distances).

Quelles mesures doit-on prendre en France?

La France apparaît au 12^e rang des pays européens en capacité de flotte avec 6,967 millions de tonnes de port en lourd et 547 navires en 2017, et au 30^e rang mondial.

Elle a une place significative dans le domaine de la transition énergétique du secteur maritime et s'est très récemment dotée² d'un dispositif fiscal pour encourager l'investissement des armateurs dans des navires neufs.

Dans le domaine du GNL, les armateurs français ont 26 navires GNL en opération et en commandes : 3 ferries pour Brittany ferries et un pour Corsica Linea, deux dragues pour le GIE dragages ports, un paquebot pour la Cie du Ponant, 20 porte-conteneurs pour CMA CGM dont 9 géants de 23000 EVP (Équivalent Vingt Pieds, unité de capacité pour les transports par conteneurs), 5 de 15000 EVP et 6 *feeders* de 2000 EVP pour la filiale Containership, la plupart étant sous pavillon français. S'y ajoutent deux pétroliers affrétés par Total, les premiers de la catégorie des VLCC à fonctionner au GNL.

ENGIE fait partie du consortium qui a construit le premier navire au monde destiné au soutage GNL, le ENGIE Zeebrugge, puis CFT a construit la barge LNG London affrétée par Shell à Rotterdam. Total affrète les deux plus grands navires de ce type, d'une capacité de 18600 m³ chacun, le premier à Rotterdam dès 2020, le second à Marseille à partir de 2022.

Total est le numéro deux mondial dans le domaine du GNL et sa filiale Total Marine fuels GS tient un rang parmi les leaders mondiaux.

Sur le plan industriel, quelques entreprises françaises conçoivent et produisent des équipements très appréciés, comme GTT pour les cuves installées à bord des navires ou Air Liquide pour la gestion des gaz d'évaporation. Les chantiers de Saint-Nazaire ont plusieurs paquebots en commande et ceux de

Dunkerque et Boulogne ont construit les dragues du Groupement Dragages.

À ce jour, un seul navire est en service en France et il faudra attendre 2022 pour disposer à Marseille d'un premier navire souleveur.

Dans le domaine de la propulsion vélique, en assistance ou principale, plusieurs entreprises françaises sont en pointe. L'armateur Neoline a lancé la construction d'un grand voilier pour des liaisons transatlantiques de même que TOWT. Le dossier publié par le site Les Horizons [Les Horizons, 2020] permet de faire un bilan complet sur le sujet.

Des projets de navires-hydrogène électriques sont aussi nombreux et témoignent du dynamisme des industries nautiques.

Quelques mesures pourraient accélérer la transition énergétique du secteur portant sur :

- Une plus forte incitation à transformer les navires existants. Avec une durée de vie de l'ordre de 30 ans, le renouvellement complet de la flotte ne sera pas achevé en 2050. Il faut donc transformer les navires existants pour réduire plus rapidement la pollution et amorcer la réduction des émissions de GES.
- Des plans ambitieux de production de biocarburants liquides et gazeux à destination du transport maritime doivent voir le jour. Ces biocarburants ont aussi l'avantage de soutenir l'agriculture et de réduire nos importations d'énergie.
- Le plan de développement de la filière hydrogène doit être étendu à la production de carburants de synthèse, qu'il s'agisse d'ammoniac, de méthane ou de carburant liquide.
- Tout en préservant l'autonomie de gestion des ports, l'accueil des navires utilisant des carburants alternatifs doit être favorisé par des tarifs attractifs.

Une coalition menée par le Cluster Maritime Français et de nombreuses entreprises a été lancée et fera des propositions dans ce sens très prochainement.

Conclusion

La transition énergétique et environnementale du transport maritime est déjà engagée et pourra atteindre les objectifs fixés par l'OMI si certaines actions sont rapidement engagées. Elle aura cependant pour conséquence une adaptation des modèles économiques afin de préserver la compétitivité du secteur.

Compte tenu de la diversité des solutions, et de l'objectif global de lutte contre le réchauffement climatique, seule l'analyse du cycle de vie permet d'établir des comparaisons. Il est donc essentiel d'élaborer une méthode de référence tenant compte des émissions polluantes et de GES.

La majorité des navires de petite taille dispose d'un large choix de carburants alternatifs mais n'a qu'un effet limité sur l'ensemble du secteur. Les navires de grande taille (> 45 000 GT) parcourant de grandes distances qui ne représentent que 13 % des navires mais consomment plus de 50 % de l'énergie n'ont à court et moyen terme que peu d'options. À long terme, de nouveaux carburants seront disponibles mais les dates de disponibilité restent très incertaines et dépendront largement des efforts de R&D engagés.

Le GNL apparaît comme la meilleure option sur l'ensemble de la période 2020-2050 et présente la stratégie la plus efficace pour répondre aux exigences environnementales. Elle peut s'engager immédiatement et se poursuivre jusqu'à la neutralité carbone sans coûts échoués.

RÉFÉRENCES

- (Ineris), L. R., (Cerema), C. R., (Citepa), J.-M. A. & N. A. (Citepa), (2019). *ECAMED: a Technical Feasibility Study for the Implementation of an Emission Control Area (ECA) in the Mediterranean Sea*. Ineris.
- Al, D. N. (2020). *Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane – the maritime shipping perspective*. CEDELIF.
- Al, O. S. (2019). *Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel*. Sphera.
- DNV GL. (2019). *Maritime forecast to 2050 Energy transition Outlook 2019*. Hambourg : DNV GL.
- Erik Fridell, K. Y. (2017). *Environment assessment of LNG tankers for Furetank – Emissions to air and external costs* N° U 5863. IVL.
- IFPEN. (2015). *Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie*. Rueil-Malmaison : IFPEN.
- Isemar. (2017). *20 ans de transport maritime. Analyse des grandes mutations*. Nantes : Isemar.
- Les Horizons. (2020, 30 mars). *La propulsion vélique, avenir du commerce maritime?* Consulté sur Les Horizons : <https://leshorizons.net/pro-pulsion-velique-avenir-commerce-maritime/>
- OMI. (s.d.). *Prevention of air pollution from ships*. Consulté sur le site officiel OMI : <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>
- Research, C. (2019). Consulté sur UNCTAD : <https://stats.unctad.org/handbook/MaritimeTransport/MerchantFleet.html>
- SEA LNG. (2019). *Comparison of alternative Marine Fuels*. Consulté sur SEA LNG : <https://sea-lng.org/our-work/>
- Sofiev, M. W. (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. *Nature Communications* 9, 406 (2018).
- UNEP/MED IG, 2. (2019). *Decision IG.24/8: Road Map for a Proposal for the Possible Designation of the Mediterranean Sea, as a whole, as an Emission Control Area for Sulphur Oxides Pursuant to MARPOL Annex VI, within the Framework of the Barcelona Convention*.

ABRÉVIATIONS

- AIS : *Automatic Identification System*
- ECA : *Emission Control Area* – zone de contrôle des émissions
- EEDI : *Energy Efficiency Design Index*
- EVP : équivalent vingt pieds
- FO : *Fuel Oil*, regroupe l'ensemble des produits issus du raffinage du pétrole brut
- GES : gaz à effet de serre
- GNL : gaz naturel liquéfié
- GT : gros tonnage (jauge brute)
- HFO : *Heavy Fuel Oil* (teneur en soufre <3,5 %)
- HVO : *Hydrotreated Vegetable Oil*
- LSFO : *Low Sulfur Fuel Oil* (fuel lourd à teneur en soufre entre 0,1 et 0,5 %)
- MARPOL : *Marine Pollution*
- MGO : *Marine Gasoil*
- MTEP : million de tonnes équivalent pétrole
- OMI/IMO : Organisation Maritime Internationale/*International Maritime Association*
- ORC : *Organic Rankine Cycle*
- PAC : pile à combustible
- PM : *Particle Matter* (particules fines)
- PV : photovoltaïque
- VAN : valeur actuelle nette
- VLCC : *Very Large Crude Carrier*
- VLSFO : *Very Low Sulfur Fuel Oil* (fuel lourd à teneur en soufre <0,5 %)

NOTES

- SEA LNG a réalisé des études économiques pour des porte-conteneurs, tankers et transporteurs de voitures disponibles sur leur site internet www.sea-lng.org dans la rubrique our work.
- Article 48 de la loi N° 2019-1479 du 28/12/2019 de finances pour 2020.