

## **Transition énergétique des navires de transport de fret : vers quelles sources de propulsion se tourner pour répondre aux objectifs environnementaux jusqu'en 2050 ?**



**Travail de Bachelor réalisé en vue de l'obtention du Bachelor HES**

par :

**David PAULO**

Conseiller au travail de Bachelor :

**Jérôme Reboulleau, PhD**

**Genève, le 13 juillet 2023**

**Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE)**

**Filière Economie d'entreprise**

## Déclaration

Ce travail de Bachelor est réalisé dans le cadre de l'examen final de la Haute école de gestion de Genève, en vue de l'obtention du titre de Bachelor of Science en économie d'entreprise.

L'étudiant atteste avoir réalisé seul le présent travail, sans avoir utilisé des sources autres que celles citées dans la bibliographie. Il ou elle atteste par ailleurs que le travail rendu est le fruit de sa réflexion personnelle et a été rédigé de manière autonome. Ce travail a, en outre, été soumis pour analyse par le logiciel de détection de plagiat préconisé par la filière.

L'étudiant accepte, le cas échéant, la clause de confidentialité. L'utilisation des conclusions et recommandations formulées dans le travail de Bachelor, sans préjuger de leur valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celle du ou de la conseiller au travail de Bachelor, celle du juré-e ou celle de la HEG.

## Remerciements

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes proches. Leur soutien moral et leurs encouragements constants ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de la réalisation de ce travail. Leur présence m'a permis de me concentrer sur mes études et de donner le meilleur de moi-même.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères à la Haute Ecole de Gestion et les professeurs que j'ai pu côtoyer qui m'ont permis d'acquérir des connaissances précieuses.

Un merci tout particulier à Mr. Reboulleau qui m'a accompagné de manière remarquable tout au long de mon travail de Bachelor. Sa disponibilité, son expertise et ses conseils éclairés ont été d'une valeur inestimable. Je suis reconnaissant de sa patience et de son engagement qui m'ont permis de rebondir par-dessus plusieurs obstacles rencontrés lors de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement les personnes que j'ai eu la chance d'interviewer dans le cadre de mon travail de recherche. Leur participation généreuse et leur volonté de partager leurs connaissances ont enrichi mon travail et apporté une valeur ajoutée significative.

## Résumé

Confrontés aux objectifs environnementaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les armateurs doivent désormais adopter des mesures pour réduire leur empreinte carbonique. Ce travail vise à déterminer quels seraient les potentiels carburants alternatifs qui contribueraient efficacement à la décarbonisation des navires marchands de l'industrie maritime jusqu'à l'horizon 2050.

Le document débute en décrivant la 4ème révolution de propulsion actuelle, les sources de propulsions utilisées à ce jour ainsi que les enjeux de la transition énergétique des navires responsables de 90% du commerce mondial. Ensuite, quatre carburants alternatifs sélectionnés (ammoniac, biocarburants, hydrogène, méthanol) sont analysés en se penchant sur leurs méthodes de production actuelles, leur maturité des infrastructures logistiques et leur application à bord de navires actuels. Le travail ensuite examine la situation macro-économique pouvant influencer la transition énergétique de l'industrie maritime grâce à une analyse PESTEL.

Pour comprendre les coûts d'adoption de certains carburants alternatifs en tant que source de propulsion, une analyse quantitative compare les coûts de voyage d'un Supramax pour un voyage donné. L'impact environnemental est également pris en considération en ajoutant aux coûts une tarification par tonne de carbone émise. Pour mettre en évidence l'évolution du niveau de compétitivité des coûts d'un navire propulsé aux carburants alternatifs, l'analyse quantitative inclut dans un deuxième temps une prévision de prix des carburants à l'horizon 2050.

Ensuite, le travail analyse les barrières à l'adoption des carburants alternatifs, mettant en lumière les principales problématiques allant contre l'adoption de certains carburants à l'horizon 2050. Pour conclure, le travail regroupe les points de vue d'experts interviewés au sujet des futurs carburants au court et long terme, permettant d'avoir des avis directs venant d'acteurs au sein de l'industrie maritime.

A partir de ces analyses, nous avons pu donc déterminer que le transport en eaux profondes utiliserait à court terme le méthanol ainsi que les biocarburants, tandis qu'au long terme, l'hydrogène et plus particulièrement l'ammoniac seraient ajoutés. Le transport en eaux courtes serait lui caractérisé par l'utilisation d'ammoniac et d'hydrogène à court terme et l'utilisation de batteries se fera au long terme.

# Table des matières

<b>Déclaration.....</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>vi</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 L'histoire du transport maritime.....	1
1.2 La 4 <sup>ème</sup> révolution de propulsion .....	3
1.3 Sources de propulsion actuelles .....	5
1.3.1 Fioul.....	5
1.3.2 GNL.....	6
1.4 Les enjeux économiques et sociaux .....	6
1.5 Problématique traitée et objectifs.....	8
1.6 Méthodologie .....	8
1.6.1 Collecte d'informations .....	8
1.6.2 Conduite des entretiens.....	8
1.6.3 Utilisation des données.....	9
<b>2. Analyses .....</b>	<b>10</b>
2.1 Propulsions alternatives .....	10
2.1.1 Ammoniac.....	10
2.1.1.1 Production.....	11
2.1.1.2 Transport et distribution .....	11
2.1.1.3 Navires actuels.....	13
2.1.2 Biocarburants .....	13
2.1.2.1 Production.....	14
2.1.2.2 Transport et distribution .....	15
2.1.2.3 Navires actuels.....	15
2.1.3 Hydrogène.....	16
2.1.3.1 Production.....	16
2.1.3.2 Transport et distribution .....	17
2.1.3.3 Navires actuels.....	18
2.1.4 Méthanol.....	19
2.1.4.1 Production.....	19
2.1.4.2 Transport et Distribution .....	19
2.1.4.3 Navires actuels.....	20
2.2 Analyse PESTEL des tendances macro-économiques influençant la transition énergétique de l'industrie maritime .....	21
2.2.1 Politique et légal .....	21
2.2.2 Techno-économique .....	23
2.2.3 Socio-environnemental .....	24

<b>2.3 Comparaison des coûts totaux de voyage de navires propulsés par différentes énergies .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Barrières contre l'adoption .....</b>	<b>30</b>
2.4.1 Autres mesures non liées aux combustibles .....	30
2.4.2 Contraintes spatiales .....	32
2.4.3 Résultats environnementaux .....	34
<b>2.5 Les carburants et autres mesures l'horizon 2050 : Avis des intervenants 38</b>	
2.5.1 Mr. Alberto Perez.....	38
2.5.2 Mr. Richard Watts.....	38
2.5.3 Mr. Rustin Edwards .....	39
<b>3. Synthèse et recommandations .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Transport maritime en eaux profondes.....</b>	<b>41</b>
3.1.1 Court terme.....	41
3.1.2 Long terme .....	42
<b>3.2 Shipping en eaux courtes .....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Court et long terme .....	44
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>45</b>
4.1 Bilan personnel.....	46
<b>Bibliographie .....</b>	<b>47</b>
<b>Annexe 1 : Tableaux détaillés des coûts de voyage .....</b>	<b>53</b>
<b>Annexe 2 : Tableaux finals d'estimations des coûts de voyage .....</b>	<b>55</b>
<b>Annexe 3 : Tableaux de données utilisés pour la projection de prix des carburants pour les coûts de voyage .....</b>	<b>56</b>
<b>Annexe 4 : Entretien avec Mr. Rustin Edwards – Head of Fuel Oil Procurement (Euronav NV).....</b>	<b>57</b>
<b>Annexe 5 : Entretien avec Mr. Alberto Perez – Head of Commercial Maritime Market (Lloyd's Register).....</b>	<b>61</b>
<b>Annexe 6 : Entretien avec Mr. Richard Watts – Director (HR Maritime).....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe 7: Entretien avec Mr. Jan Hoffmann – Head of Trade Logistics (UNCTAD).....</b>	<b>69</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux d'implémentation de différentes mesures en fonction de leur potentiel d'atténuation et coût marginal d'abattement.....	31
Tableau 2 : Caractéristiques de différents carburants alternatifs selon l'HFO.....	41
Tableau 3 : Récapitulatif des carburants utilisés à court et long terme selon le type de navigation .....	44

## Liste des figures

Figure 1 : Commerce maritime mondial .....	2
Figure 2 : Evolution de la taille du carnet de commande de navires.....	4
Figure 3 : Carburants marins vendus au Port de Singapour.....	5
Figure 4 : Répartition des stratégies de carburants.....	10
Figure 5 : Infrastructures de transport d'ammoniac .....	12
Figure 6 : Disponibilité de méthanol dans les ports du monde .....	20
Figure 7 : Coûts totaux de 5 vraquiers secs à différentes sources de propulsion. ....	26
Figure 8 : Coûts totaux journaliers selon 3 tarifications de carbone différentes .....	27
Figure 9 : Evolution des coûts totaux journaliers jusqu'à 2050 .....	29
Figure 10 : Densités énergétique volumétrique et gravimétrique de carburants alternatifs par rapport au HFO.....	33
Figure 11 : Émissions annuelles de GES « Tank to Wake » d'un pétrolier VLCC basées sur la consommation annuelle de carburant.....	35
Figure 12 : Émissions annuelles de GES « Well to Tank » d'un pétrolier VLCC basées sur la consommation annuelle de carburant.....	36

# 1. Introduction

## 1.1 L'histoire du transport maritime

Le premier réseau d'échange peut être observé aussi tôt que l'an 3000 av. J.-C. reliant les peuples de Mésopotamie, Bahrain et de l'Inde de l'ouest qui participaient à l'échange d'huiles, dates pour des denrées telles que le bronze ou l'ivoire. C'est au XVIIIe siècle av. J.-C. que nous pouvons observer la première forme de réglementation maritime établie par les Mésopotamiens qui inscrivent dans le « Code of Hammurabi » l'obligation de payer des tarifs fixes de fret en avance en fonction de la capacité de chargement du navire loué.

Jusqu'en 1480 apr. J.-C., nous observons le développement de nouveaux réseaux d'échanges, tout d'abord en méditerranée durant le IVe siècle av. J.-C. et ensuite l'ouverture des pays nordiques à ce réseau durant le Xe siècle apr. J.-C. propulsé par la révolution de l'industrie du textile en Angleterre.

A partir de la fin du XVe siècle, l'Europe marque les premières traces du commerce maritime intercontinental que nous connaissons aujourd'hui grâce à la découverte des Amériques et des Indes. Les deux siècles suivants sont définis par le commerce triangulaire où fabrications et provisions sont expédiées d'Europe pour l'Afrique, partant pour l'Amérique avec des esclaves et retournant vers l'Europe avec des matières premières telles que le sucre, rhum, tabac et coton.

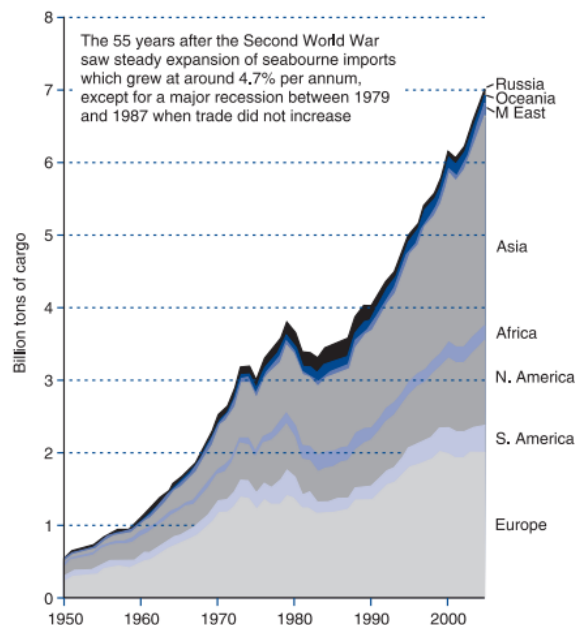
Durant le XIXe siècle, la révolution industrielle de l'ancien continent crée un surplus d'offre de biens manufacturés et l'exportation de ces biens devient donc essentielle. En contrepartie, l'ancien continent importe les matières premières et denrées alimentaires dont elle a besoin pour accompagner la croissance de sa population. Cette révolution se répercute également dans le secteur du transport maritime avec l'amélioration des navires grâce aux moteurs à vapeur, coques en fer, hélices et l'installation de réseaux de câbles en eaux profondes.

L'industrie du transport maritime devient donc intégrée à un vaste réseau de transport international comprenant canaux et chemins de fer, ce qui améliore considérablement la durée et l'efficacité du transport international de marchandises.



De la fin du XIXe siècle jusqu'à la fin du XXe siècle, le commerce maritime grandit à très haute vitesse. Ce développement est tiré majoritairement par l'Europe et le Japon profondément touchés par les guerres mondiales qui poursuivent une expansion vers les industries lourdes<sup>1</sup> impliquant l'importation massive de matières premières (pétrole, charbon, minerai de fer).

Figure 1 : Commerce maritime mondial  
Evolution des quantités importées par région (en milliard de tonnes)



(Martin Stopford, 2009)

Cette croissance massive s'étend sur le XXIe siècle grâce à la flambée du marché de fret où l'industrie du transport maritime marchand devient extrêmement compétitif et atteint un chiffre d'affaires se rapprochant de 426 milliards de dollars. Les industries de la construction navale et des équipements marins suivent cette croissance rapide avec des investissements annuels de nouveaux navires de 20 milliards en 1997 à 187 milliards en 2007.

En 2020, une forte demande pour le transport maritime causée par la pandémie provoque une augmentation sans précédent des taux de fret par conteneur et de vrac sec établissant de nouveaux records en 2021 allant jusqu'à 10'067 dollars par EVP<sup>2</sup> par semaine pour un transport de Shanghai jusqu'à la côte Est américaine. (UNCTAD, 2021)

<sup>1</sup> Les industries lourdes sont des industries à capital élevé utilisant de grandes quantités de matières premières pour les transformant en produits requis par d'autres industries.

<sup>2</sup> Equivalent Vingt Pieds : Conteneur à dimensions standardisées calculé en pieds.

## 1.2 La 4<sup>ème</sup> révolution de propulsion

En 2018, les émissions du commerce maritime et de ses 52'000 navires marchands s'élevaient à 1'076 millions de tonnes de dioxyde de carbone, ce qui représente approximativement 2.9% des émissions globales.<sup>3</sup> Étant la méthode de transport de marchandise la plus efficace en termes d'émissions de dioxyde de carbone par kilomètre parcourus (3g de CO<sub>2</sub>/km)<sup>4</sup>, le transport maritime commercial n'a pas tout de suite été le sujet des conventions internationales pour l'environnement.

Dorénavant concernée par les accords de Paris, l'industrie maritime doit répondre aux objectifs de limitation du réchauffement climatique pour 2050 fixés en dessous de 2°C, idéalement à 1.5°C. Répondre parfaitement à ces objectifs avec l'usage de carburants alternatifs à long terme est un défi de grande envergure qui demande un changement du fonctionnement de l'industrie et d'une coopération totale de toutes les parties prenantes entre elles. La transition énergétique de l'industrie responsable de 90% du commerce mondial a déjà commencé, mais sa complexité retarde l'adoption de mesures concrètes au niveau européen et global. Cette transition est dirigée par l'IMO<sup>5</sup>, l'agence responsable de la sécurité des transports maritimes et de la prévention de la pollution des navires, qui établit l'objectif de réduire les émissions annuelles totales de gaz à effet de serre d'au moins 50% d'ici 2050 par rapport au niveau d'émissions de 2008.

Pour les entreprises liées au transport maritime, la volonté d'atteindre ces objectifs est connue et positive. En effet, ce désir d'accomplir peut être constaté sur le document d'« Appel à l'action pour la décarbonisation du transport maritime » rédigé par Getting to Zero Coalition. Le document, signé par plus de 230 leaders et organisations, invite les gouvernements à :

- S'engager à décarboniser le transport maritime international d'ici 2050.
- Soutenir les projets de transport maritime à zéro émission à l'échelle industrielle par le biais d'une action nationale.
- Mettre en place des mesures politiques qui feront du transport maritime à zéro émission le choix par défaut d'ici 2030.

(Global Maritime Forum, 2021)

Du côté des gouvernements, l'Union Européenne, les Etats-Unis ainsi que certains pays d'Asie visent à mettre en place des systèmes et mesures pour inciter les acteurs à réduire leur empreinte carbone. Parmi ces régions, c'est principalement l'Union Européenne qui

---

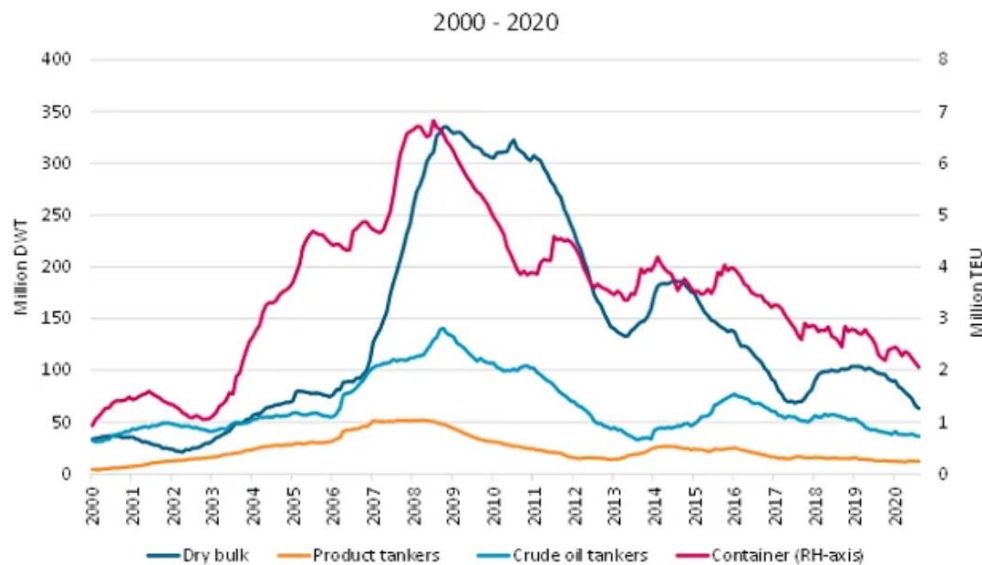
<sup>3</sup> Fourth IMO GHG Study 2020 Executive-Summary

<sup>4</sup> Jørgen Villy Fenhann, CO<sub>2</sub> Emissions from International Shipping

<sup>5</sup> International Maritime Organization

ouvre la voie en cherchant à instaurer des systèmes d'échange de quotas d'émissions mais également des taxations sur l'énergie. Pour directement inciter l'adoption de carburants alternatifs, le règlement « FuelEU Maritime » verra son entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2025 et devrait augmenter la part des carburants renouvelables et à faible émission de carbone dans le mix énergétique utilisé pour le transport maritime international au sein de l'Union européenne.

Figure 2 : Evolution de la taille du carnet de commande de navires



(BIMCO & Clarksons, 2020)<sup>6</sup>

Désormais lancé dans cette 3<sup>ème</sup> décennie, les armateurs des différents segments de navires dont les vraquiers, porte-conteneurs, pétroliers, navires-citernes, rouliers, ferrys et navires de croisière doivent établir une stratégie de décarbonisation pour répondre aux objectifs environnementaux. Sur la figure 2, nous pouvons voir que depuis 2016, en raison des incertitudes futures liées à la sélection des futurs carburants alternatifs, l'industrie maritime a considérablement réduit son carnet de commandes de navires jusqu'à 2020. Les armateurs, conscients que la construction d'un nouveau navire nécessite d'importants investissements, ont retardé leurs décisions et peu de commandes de navires ont été faites.

Alors que les carburants alternatifs étudiés depuis 1997 par l'IMO commencent à être envisagés et adoptés par un nombre très faible d'armateurs, la majeure partie du carburant consommé par l'industrie maritime reste des carburants à base d'énergie fossile.

<sup>6</sup> <https://maritime-executive.com/article/dramatic-decline-in-2020-shipbuilding-orderbook-increased-demolitions>

## 1.3 Sources de propulsion actuelles

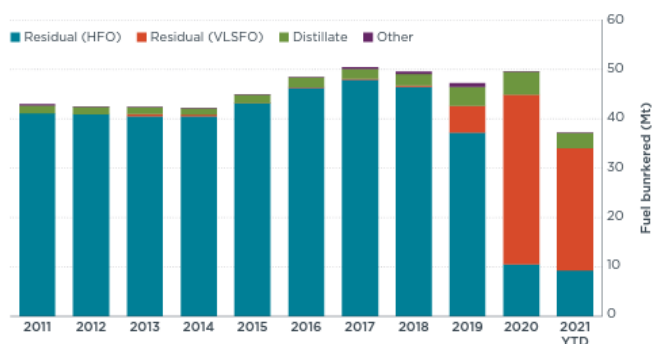
### 1.3.1 Fioul

Suite à l'utilisation de l'énergie humaine, éolienne ainsi que des moteurs à vapeur alimentés au charbon, les navires de transport de marchandises commencent au début du XXe siècle à se convertir à une nouvelle source d'énergie demandant moins de place de stockage et possédant une densité et un rendement énergétique plus élevé : le pétrole. (Takahiro, 2021)<sup>7</sup>

A ce jour, le transport maritime utilise "plus de 300 millions de tonnes de combustibles fossiles chaque année, soit environ 5 % de la production mondiale de pétrole". (Camille Bourgeon, 2022)<sup>8</sup>. Les combustibles produits provenant du pétrole brut se distinguent en 2 types : les combustibles dits distillés provenant de la distillation atmosphérique, et les combustibles dits résiduels, les restes de ce procédé de faible qualité. (Monique B. Vermeire, 2021) Les combustibles principalement utilisés par les navires commerciaux à jauge brute égale ou supérieur à 5'000 sont les combustibles résiduels HFO, LFO ou MFO, mais également les distillés IFO, MDO, MGO ou LSFO. Selon un rapport publié par l'IMO<sup>9</sup>, la consommation totale estimée pour ces mêmes navires en 2020 de ces combustibles s'est montée à 191 millions de tonnes.<sup>10</sup>

Figure 3 : Carburants marins vendus au Port de Singapour

Evolution des quantités de carburant vendues par le Port de Singapour par type



(Maritime Port Authority of Singapore, 2021)

L'année 2020 a également été marquée par la transition massive du HFO au LFO passant de 172.5 millions de tonnes de HFO consommées en 2019 à 100.5 millions de tonnes en 2020, laissant place à l'utilisation du LFO pour répondre aux nouvelles réglementations mondiales mises en place le 1er janvier 2020 par l'IMO sur la teneur en soufre des

<sup>7</sup> <https://www.mol-service.com/blog/transition-in-ships-fuel>

<sup>8</sup> (Mitch Jacoby, 2022)

<sup>9</sup> International Maritime Organisation

<sup>10</sup> (MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE, 2020)

carburants dans l'annexe XI révisée de MARPOL.<sup>11</sup> Ce changement peut être visible sur les ventes totales de carburants marins d'un des plus grands ports dans la figure 3.

### 1.3.2 GNL

Utilisé comme carburant depuis plus de 40 ans, le gaz naturel liquéfié provenant du refroidissement de gaz naturel à -162°C est une source d'énergie qui s'est grandement développée au début de cette 3ème décennie suite à l'introduction d'un plafond mondial d'émissions de soufre mis en place par l'IMO. En effet, le GNL en tant que carburant est devenu populaire pour sa capacité à répondre aux restrictions des ECA's<sup>12</sup> grâce à sa faible émission de soufre et d'oxydes d'azote.

Grâce à sa meilleure disponibilité que d'autres carburants alternatifs, le nombre de navires marchands utilisant du GNL comme carburant continue d'augmenter sainement avec un total de 923 navires en exploitation<sup>13</sup> et 781 navires commandés pouvant utiliser du GNL en 2022.<sup>14</sup> La consommation de GNL a évolué passant d'environ 10.5 Mt en 2019 à environ 12 Mt en 2020 dont 75% par trois types de navires en particulier : les pétroliers, porte-conteneurs et vraquiers.

Même si le GNL contient moins de carbone par unité d'énergie que les combustibles marins classiques, sa composition de 85 à 95 pourcents de méthane ne lui permettrait pas à long terme à elle propre d'être un candidat fiable à la diminution de gaz à effet de serre, pour cause : la libération de méthane non brûlé tout au long de la chaîne d'approvisionnement, un phénomène appelé le glissement de méthane. Dû à son potentiel de réchauffement planétaire 36 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>, le méthane présent dans le GNL en fait de ce dernier un important carburant de transition dans l'attente de développement d'autres carburants alternatifs. (Oliver Sachgau, 2022)

## 1.4 Les enjeux économiques et sociaux

L'industrie du transport maritime marchand joue un rôle crucial dans le négoce des matières premières. De son envergure internationale, elle est responsable de 90% du volume du commerce à travers le monde et représente en valeur environ 7 trillions de dollars de marchandises expédiées par voie maritime, des chiffres qui rendent la population et l'économie mondiale largement dépendantes de cette industrie.<sup>15</sup>

---

<sup>11</sup> <https://www.statista.com/statistics/1266963/amount-of-fuel-consumed-by-ships-worldwide-by-fuel-type/>

<sup>12</sup> Zones de contrôle des émissions (Emission Control Area)

<sup>13</sup> <https://www.statista.com/statistics/1364303/ships-operation-using-alternative-fuels-by-fuel-type-global/>

<sup>14</sup> <https://gaspathways.com/record-orders-for-lng-fuelled-ships-seen-in-2022-1293>

<sup>15</sup> <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/11/Catalysing-the-fourth-propulsion-revolution.pdf>

Les acteurs de l'industrie du transport maritime sont en grande majorité établis dans des zones portuaires clés appelées les « hubs » tels que Dubai, Rotterdam, Los Angeles, Busan mais également de nombreuses villes portuaires chinoises comme Shanghai par exemple. Se trouvant au carrefour de routes maritimes importantes, ces villes portuaires sont caractérisées par la présence d'infrastructures développées et faisant partie de grandes chaînes d'approvisionnement intégrées.

Même si l'industrie du transport maritime représente le moyen le moins énergivore de transporter des marchandises autour du globe, la menace climatique générée par la population toujours grandissante de 8 milliards d'habitants demande à l'industrie de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre, un changement avec des enjeux majeurs.

Le négoce de matière première étant étroitement lié à l'industrie maritime, le changement des navires vers le zéro net doit se faire de manière viable et progressive puisque l'économie actuelle en dépend énormément. De plus, ce changement demande également à ce que d'importants fonds soient investis dans la recherche et le développement des carburants de demain, des sommes cumulatives estimée par l'UMAS<sup>16</sup> et l'ETC<sup>17</sup> allant jusqu'à 1.4 billions de dollars pour l'horizon 2050.<sup>18</sup>

Avec les quelques 200<sup>19</sup> millions de tonnes de carburants consommés par année, le remplacement complet des carburants provenant d'énergies non-renouvelables pour des carburants alternatifs provenant purement d'énergies renouvelables soulève également un défi énergétique à grande échelle.

L'industrie du transport maritime marchand est directement concernée par la crise climatique. Responsable de 1.7%<sup>20</sup> des émissions mondiales de gaz à effet de serre, l'industrie maritime devra elle aussi procéder à la transition énergétique pour répondre aux enjeux environnementaux avancés par les rapports alarmants du GIEC.

---

<sup>16</sup> University Maritime Advisory Services

<sup>17</sup> Energy Transitions Commission

<sup>18</sup> <https://www.ship-technology.com/news/decarbonisation-in-shipping/>

<sup>19</sup> <https://www.statista.com/statistics/1266963/amount-of-fuel-consumed-by-ships-worldwide-by-fuel-type/>

<sup>20</sup> <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/11/Catalysing-the-fourth-propulsion-revolution.pdf>

## 1.5 Problématique traitée et objectifs

Comme vu précédemment, l'envie de transitionner vers un modèle économique moins dépendant aux énergies fossiles est désiré par nombreux des acteurs de l'industrie maritime dans le but de répondre aux objectifs environnementaux. Cependant, la transition n'est pas évidente et est loin d'être faite à l'horizon puisque l'industrie fait face à de nombreuses barrières techniques et politiques.

L'objectif de ce travail est d'analyser les carburants alternatifs actuellement envisagés pour la décarbonisation par les acteurs de l'industrie maritime, et de déterminer quels seraient les carburants à utiliser à l'horizon 2050 selon le type de navigation maritime. Ce travail répond en particulier aux questions suivantes :

1. Quels sont les carburants alternatifs envisagés pour la décarbonisation de l'industrie maritime ?
2. Comment les objectifs de décarbonisation sont-ils impactés par l'environnement externe ?
3. Quel est le niveau de compétitivité des carburants alternatifs avec les carburants conventionnels ?
4. Quelles sont les barrières retardant l'adoption des carburants alternatifs ?
5. Selon le type de transport, quels seraient les carburants à adopter au court et long terme ?

## 1.6 Méthodologie

Dans cette section, la méthodologie appliquées ainsi que l'approche abordées pour collecter les informations essentielles à la réalisation de ce travail sont expliquées.

### 1.6.1 Collecte d'informations

Pour trouver des informations pertinentes, j'ai collecté des informations à travers plusieurs manières. Tout d'abord, j'ai consulté la bibliothèque pour comprendre le fonctionnement de l'industrie maritime ainsi que le négoce de matières premières.

Deuxièmement, je me suis rendu sur Internet pour trouver tous les documents et rapports récents couvrant les sujets de la décarbonisation de l'industrie maritime.

### 1.6.2 Conduite des entretiens

Dans le but d'apporter des sources primaires à mes recherches, je suis rentré en contact avec des entreprises et organisations concernées par la décarbonisation de l'industrie maritime. Pour récolter des informations précises et pertinentes, j'ai réalisé un questionnaire de sept questions destinées à des experts dans le domaine. Les questions

posées sont ouvertes et ont permis d'obtenir des informations précieuses et complètes sur les sujets traités. Les échanges avec les interlocuteurs se sont déroulés durant le mois de juin 2023 et ont été conduits par email, téléphone et appel vidéo.

### **1.6.3 Utilisation des données**

Pour mes principales analyses, des sources d'informations secondaires ont été utilisées. Dans un deuxième temps, les personnes interviewées disposant d'une connaissance globale sur l'industrie maritime et les enjeux de décarbonisation, l'expertise apportée par mes interlocuteurs m'ont permis d'établir mes recommandations et d'affirmer les éléments avancés.

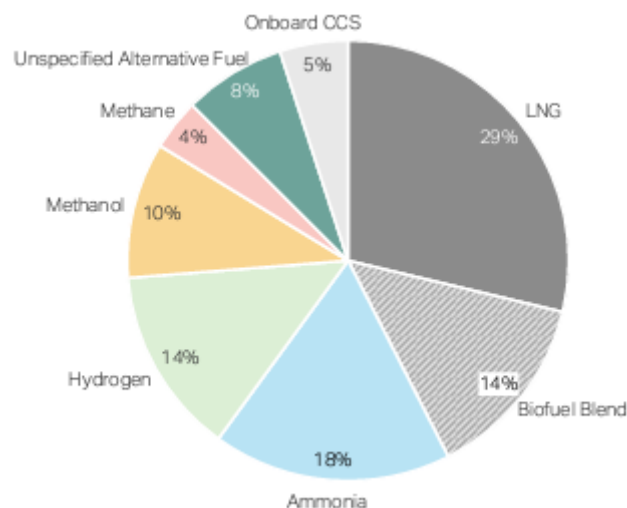


## 2. Analyses

### 2.1 Propulsions alternatives

Plusieurs sources de propulsions alternatives sont envisagées par les entreprises. Une étude conduite par Mærsk Mc-Kinney Møller Center en 2022 a évalué les stratégies de décarbonisation publiquement disponible et parmi 94 entreprises comprises, les sources de carburant les plus citées seront celles analysées dans cette section.<sup>21</sup> Sur la figure 4, nous pouvons retrouver les 4 carburants les plus cités et analysés étant les biocarburants, l'ammoniac, l'hydrogène et le méthanol.

Figure 4 : Répartition des stratégies de carburants



(Mærsk Mc-Kinney Møller Center, 2022)

#### 2.1.1 Ammoniac

Parmi les différentes énergies alternatives possédant un potentiel de carburant zéro carbone, la première est l'ammoniac. Utilisé pour la première fois en tant que combustible dans le moteur « The Delaporte Ammonia »<sup>22</sup> en 1859, l'ammoniac est un composé d'azote et d'hydrogène (NH<sub>3</sub>) et est largement utilisé dans de nombreux produits chimiques, pharmaceutiques mais également dans la production de réfrigérants et produits de nettoyage. Ce carburant est un candidat à long terme puisqu'il n'émet aucun dioxyde de carbone. Dans sa forme concentrée, l'ammoniac est une substance qualifiée d'extrêmement dangereuse dû à sa nature caustique. Sa manipulation industrielle en

<sup>21</sup> <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Ready-Set-Decarbonize-Assessment-Report-May-2022.pdf>

<sup>22</sup> <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/museum.htm>

grande quantité est donc sujette à l'établissement de rapports rigoureux.<sup>23</sup> Selon l'Agence Européenne pour la Sécurité Maritime, cette toxicité serait le risque de sécurité primordial à atténuer.

#### **2.1.1.1 Production**

La production d'ammoniac peut se diviser en trois catégories distinctes : l'ammoniac gris produit par le reformage du méthane à la vapeur, l'ammoniac bleu suivant le même procédé tout en captant et stockant le dioxyde carbone coproduit, et l'ammoniac vert, obtenu à partir de dihydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau à l'aide d'électricité obtenue à partir d'énergie renouvelables (hydrogène vert). Contrairement à l'ammoniac gris et bleu qui dépendent des combustibles fossiles pour les produire, l'ammoniac vert provient d'énergie renouvelable et serait donc la source d'énergie finale pour la future décarbonisation et production d'ammoniac. La production est menée par 4 pays qui produisent à eux plus de la moitié de la production mondiale : Chine, Etats-Unis, Russie et Inde.<sup>24</sup> En 2019, la production mondiale de ce carburant se montait à 142 millions de tonnes avec une capacité mondiale de production de 235 millions de tonnes<sup>25</sup>. Connaissant une faible croissance depuis 2010 de 8.39%<sup>26</sup>, ces quantités restent tout de même produites à partir d'hydrogène produit d'électricité provenant en partie de la combustion d'énergies fossiles, des méthodes qui ont émis en 2022 approximativement 149.5g de dioxyde de carbone par mégajoule produites d'ammoniac gris.<sup>27</sup> Pour un scénario 2050 visant le zéro-net d'émissions, la production projetée prévue serait de 228 millions de tonnes, une quantité qui devra être atteinte uniquement depuis la production d'ammoniac bleu et vert. Même si les technologies nécessaires à la production d'ammoniac bleu et vert sont présentes et largement démontrées dans des conditions commerciales, la production de cet ammoniac décarbonisé demande un investissement conséquent estimé à plus de 850 milliards de dollars. Cet investissement est nécessaire non seulement à la production mais également à la transportation et la distribution de cette énergie. (World Economic Forum, 2022).

#### **2.1.1.2 Transport et distribution**

Grâce à son utilisation importante dans la fabrication de produits fertilisants, les infrastructures ainsi que les échanges mondiaux d'ammoniac sont déjà présentes autour du globe. Une adoption à grande échelle de cette énergie en tant que carburant serait

---

<sup>23</sup> [http://edocket.access.gpo.gov/cfr\\_2008/julqtr/pdf/40cfr355AppA.pdf](http://edocket.access.gpo.gov/cfr_2008/julqtr/pdf/40cfr355AppA.pdf)

<sup>24</sup> <https://www.statista.com/statistics/1266244/global-ammonia-production-by-country/?locale=en>

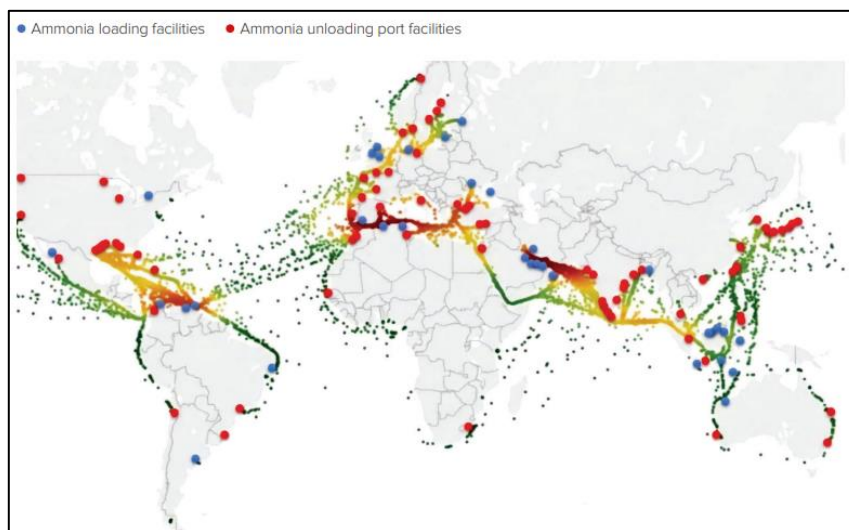
<sup>25</sup> <https://www.statista.com/statistics/1065865/ammonia-production-capacity-globally/>

<sup>26</sup> <https://www.statista.com/statistics/1266378/global-ammonia-production/?locale=en>

<sup>27</sup> <https://www.statista.com/statistics/1367299/ghg-emissions-production-grey-ammonia-blue-ammonia/?locale=en>

envisageable grâce à ses routes maritimes internationales déjà établies et au réseau complet de ports traitant l'ammoniac à grande échelle.

Figure 5 : Infrastructures de transport d'ammoniac  
Carte thermique des transporteurs d'ammoniac liquide et des installations portuaires existantes



(The Royal Society, 2020)

Une des forces principales de ce carburant repose sur son niveau de maturité en termes de stockage et de distribution. En effet, entre 25 à 30 millions de tonnes d'ammoniac ont été transportées par route, train, pipeline et bateau en 2022, dont 18 à 20 millions depuis ce dernier. (IRENA, 2022).

En revanche, nous pouvons observer sur la figure 5 le nombre d'infrastructures limitées sur les continents du sud (Afrique, Amérique du Sud). Ce manque constitue un réel problème pour certains navires opérants dans ces zones qui se verraient en difficulté pour nourrir suffisamment leur moteur à ammoniac.

De plus, même si la production d'électricité à partir d'énergie renouvelable est en théorie faisable dans toutes les parties du monde, le manque de capital disponible ou de main-d'œuvre compétente dans ces continents freinerait considérablement le développement de projet vers la production d'ammoniac vert. Le développement de ce potentiel carburant pour l'industrie maritime se confronte également aux autres industries qui utilisent ce composé chimique comme l'agriculture pour ses fertilisants. Nous pourrions observer une hiérarchisation de la production d'ammoniac renouvelable en faveur d'une industrie jugée plus importante qui assure les besoins physiologiques de la population. (Laursen, R, 2022)

### 2.1.1.3 Navires actuels

Le 10 janvier 2022, l'armateur grec « Avin International » a pris livraison du premier navire prêt à fonctionner à l'ammoniac. Approuvé par le « American Bureau of Shipping » comme étant conforme aux exigences « ABS Ammonia Ready Level 1 », ce vraquier de 156,700 DWT a été conçu pour être converti à l'avenir pour fonctionner à l'ammoniac, un atout important puisqu'il permettra à son propriétaire d'effectuer une transition vers le carburant renouvelable plus facilement. (Naida Hakirevic Prevljak, 2022)

À ce jour dans l'industrie maritime, ces navires équipés de moteurs convertissables représentent la seule forme de navire pouvant utiliser de l'ammoniac en tant que carburant puisqu'aucun navire n'est actuellement propulsé à 100% à l'ammoniac. La course pour concevoir ce premier navire est devancée par la start-up américaine « Amogy » qui dévoilera son premier « tugboat » à zéro-émission alimenté à l'ammoniac à la fin de l'année 2023. En étroite collaboration avec DNV, la start-up a levé plus de 70 millions de dollars auprès d'investisseurs dont Amazon et Aramco pour réaliser son projet de petite envergure. (Amogy, 2023)

Nous avons également le projet « The Nordic Green Ammonia Powered Ships (NoGAPS) » dirigé par l'organisation Mærsk Mc-Kinney Møller Center qui prépare la production d'un navire « Handy-size » (22,000m<sup>3</sup> de capacité) propulsé à l'ammoniac. Ce projet prometteur se lance désormais en phase de conception initiale afin d'intégrer les décisions clés et les résultats de la première phase de faisabilité et vise à incorporer parfaitement dans son design les aspects tels que la sécurité, l'efficacité énergétique et le choix technologique. (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2023)

Ces projets sont cruciaux pour l'industrie maritime car ils sont les premiers pas vers le développement de ce carburant à potentiel de réduction élevé. En revanche, la présence insatisfaisante d'ammoniac en tant que combustible dans l'industrie maritime ternit sa crédibilité et la positionne uniquement comme une alternative à long terme.

### 2.1.2 Biocarburants

Depuis 15 ans, les bio-carburants plus connus sous leur nom anglophone « biofuels » ont été largement recherchés, produits et consommés par le monde et sont largement considérés comme une source d'énergie renouvelable susceptible de contribuer à la diminution du changement climatique.<sup>28</sup> En effet, en comparaison avec les carburants fossiles, la combustion de biocarburants émet en général moins d'émissions de particules,

---

<sup>28</sup> [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN\\_Full\\_Report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf)

de dioxyde de soufre et de substances toxiques dans l'air.<sup>29</sup> Ces énergies produites à base de ressources biologiques renouvelables telles que les algues, terpènes, déchets de graisse animales, sucres et huiles végétales sont utilisées sous plusieurs formes solides, liquides et gazeuses principalement pour le transport mais également pour l'électricité et le chauffage. Pour l'industrie maritime, les principaux biocarburants intéressants sont divisés en quatre groupes selon l'EMSA<sup>30</sup> : les biodiesels, les bio-alcools, les biocrudes ainsi que les biocarburants gazeux.

#### **2.1.2.1 Production**

Actuellement, les principaux biocarburants produits pour le secteur maritime sont des carburants dits « drop-in » qui bénéficient d'être fonctionnellement équivalents aux carburants pétroliers et entièrement compatibles avec les infrastructures de raffinage existantes et de distribution du pétrole. Ces carburants de la catégorie des biodiesels sont le FAME (Fatty acid methyl ester), le FT diesel (Fischer-Tropsch) et le HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). Ces carburants utilisés en mélange avec des carburants pétroliers ou à 100% sont considérés uniquement pour un usage à court terme puisque même si leurs processus de productions sont les plus aboutis, leur utilisation en termes de durabilité n'est pas assez suffisante pour les objectifs environnementaux futurs. Pour un usage de grande envergure comme l'industrie maritime, la biomasse faite à partir de cultures vivrières utilisée pour produire les biocarburants de nos jours limite leur potentiel pour des raisons de durabilité. (R. Laursen, 2022)

Pour obtenir de meilleurs résultats durables, les biocarburants produits devraient se baser sur une biomasse non alimentaire composée principalement de déchets organiques, ce qui nécessite des processus plus développés et coûteux. Tandis que la production mondiale de FAME est en baisse depuis 2019 se fixant à 38 millions de tonnes en 2021<sup>31</sup>, la production de HVO considéré comme un biocarburant avancé également appelé « diesel renouvelable » voit sa production augmenter massivement depuis 2014 se fixant à 7 millions de tonnes en 2021.<sup>32</sup> Ces évolutions démontrent un intérêt des industries à se tourner vers un biodiesel plus durable.

Concernant d'autres biocarburants prometteurs, le biométhane également appelé « RNG » pour « Renewable Natural Gas » pouvant remplacer le GNL voit sa production s'accroître passant de 0.5 milliards de m<sup>3</sup> en 2010 à 4 milliards en 2019. En revanche, sa production

---

<sup>29</sup> <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/biofuels-and-the-environment.php#:~:text=When%20burned%2C%20pure%20biofuels%20generally,that%20do%20not%20contain%20biofuels.>

<sup>30</sup> European Maritime Safety Agency

<sup>31</sup> <https://www.statista.com/statistics/1297288/fame-biodiesel-production-worldwide/>

<sup>32</sup> <https://www.statista.com/statistics/1297290/hvo-biodiesel-production-worldwide/>

actuelle par méthode de digestion anaérobie de déchets et résidus végétaux n'offre pas un potentiel de réduction de gaz à effet de serre supérieur au GNL. La production de ce carburant par la méthode de gazéification de biomasse lignocellulosique serait plus concluante mais le niveau de maturité de production de cette méthode moins avancée repousse l'usage de celle-ci. (R. Laursen, 2022)

Pour conclure, la production des biocarburants actuels majoritairement à base de cultures répond aux réglementations IMO à court terme mais reste une source d'inquiétude face à son impact sur la production de nourriture et ne permet pas de répondre aux exigences à long terme. Si les biocarburants doivent figurer parmi les carburants alternatifs futurs, le passage à d'autres sources de biomasse entièrement durables est nécessaire.

### **2.1.2.2 Transport et distribution**

L'utilisation de biocarburants dans l'industrie du transport a été principalement dirigée vers la transition énergétique des véhicules automobiles légers. En effet, les gouvernements ont largement concentré par le passé leurs mandats et subventions sur le développement de biocarburants pour l'industrie routière plutôt que pour le transport maritime ou même aérien, ce qui rend la chaîne d'approvisionnement de biocarburant maritime très peu établie. Même si certains biocarburants dits « drop-in » bénéficient d'être compatibles sans changements majeurs avec les infrastructures de raffinage et de distribution de produits pétroliers, la faible utilisation de biocarburants dans l'industrie maritime ralentit l'adoption et le développement de chaînes d'approvisionnement dédiées au transport et la distribution de biocarburants. (Chia-wen Carmen Hsieh, 2017)

### **2.1.2.3 Navires actuels**

A ce jour, l'industrie maritime a déjà commencé à utiliser les biocarburants en tant qu'énergie de propulsion. Grâce à la levée d'un obstacle qui demandait de prouver que le passage à un biocarburant ne dépassait pas les limites d'émissions de Nox, l'IMO a autorisé l'usage de mélanges de biocarburants sans évaluations supplémentaires.<sup>33</sup>

Ce changement a grandement libéré l'usage à grande échelle du carburant puisque multiples mouvements vers l'utilisation de biocarburants peuvent être constatés. L'entreprise CMA CGM's International Shipping Company Pte. Ltd. avait déjà misé sur les biocarburants en 2019 en testant les capacités des biocarburants et possède actuellement 32 porte-conteneurs utilisant un mélange de biocarburants jusqu'à 30%. Ce projet de 6 mois visant à mesurer et évaluer les émissions de ces navires est en collaboration étroite avec l'autorité maritime et portuaire de Singapour. Les essais conduits par des porte-

---

<sup>33</sup> <https://www.dnv.com/news/use-of-biofuels-in-shipping-240298>

conteneurs allant de 2'200 à 10'640 TEU ont utilisés nombreuses voies commerciales telles que Asie-Amérique du Sud, Asie-Afrique, Asie-Océanie, Asie-Méditerranée, Europe du Nord-Océanie et Europe du Nord-Amérique du Nord. (Jasmina Ovcina Mandra, 2023)

L'entreprise NORDEN, un des plus grands transporteurs de vrac sec au monde, s'est également associé à l'armateur Spar Shipping AS pour l'avitaillement de biocarburant durable de l'entreprise GoodFuels. Ce projet basé à Rotterdam vise à avitailler deux navires affrétés à destination d'Asie et d'Afrique pour un total d'environ 1'100 tonnes de biocarburant, une première pour l'entreprise qui considère ce carburant comme celui qui parviendra à l'entreprise d'atteindre son devoir d'émissions nulles pour 2050. (GoodFuels, 2023) D'autres entreprises majeures telles que Eagle Bulk Shipping ou NYK LINE ont également mené des essais aux biocarburants.

### **2.1.3 Hydrogène**

L'utilisation d'hydrogène ( $H_2$ ) en tant que carburant n'est pas nouveau dans l'histoire de la motorisation. En effet, l'hydrogène a été la source d'énergie utilisée pour la toute première forme de moteur à combustion interne, crée par l'ingénieur suisse Isaac de Rivaz en 1806. Suivant son remplacement par l'essence durant le XX<sup>ème</sup> siècle, l'hydrogène refait surface durant les années septante face aux premières préoccupations environnementales.<sup>34</sup> L'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant a été d'abord largement déployée durant la deuxième décennie pour l'industrie routière grâce au développement des « piles à combustible », plus connues sous leur appellation anglaise « fuel cells ». Ce combustible considéré comme un candidat viable à la réduction d'émissions pour l'industrie maritime peut être utilisé sous deux formes : l'utilisation de piles à combustible ou sous la forme d'un moteur à combustion interne. En pratique, l'efficacité énergétique ainsi que le niveau de maturité technologique supérieur des piles à combustibles en fait de cette méthode une meilleure option. De plus, l'hydrogène utilisé sous forme de moteur à combustion interne demande un réaménagement complet de la motorisation d'un navire conventionnel, ce qui rend sa possibilité de carburant purement substituable impossible. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020)

#### **2.1.3.1 Production**

La production d'hydrogène est divisée en trois catégories similairement à l'ammoniac vu précédemment. L'hydrogène gris est la première forme d'hydrogène produite en majorité à travers le monde et se crée à partir du reformage du méthane à la vapeur, un procédé rejetant d'importantes quantités de  $CO_2$ . Le processus de production de l'hydrogène bleu est similaire que le gris mais les émissions de  $CO_2$  sont quant à elles capturées.

---

<sup>34</sup> <https://www.fastechus.com/blog/the-surprising-history-of-hydrogen-vehicles>

L'hydrogène vert en revanche est produit à partir d'énergies renouvelables grâce au processus renouvelable d'électrolyse et il est la forme d'hydrogène la plus viable puisque l'ensemble de son cycle de vie produit des émissions nettes nulles. (Jean-Marc Leonhardt, 2022)

En 2020, 87 millions de tonnes d'hydrogène ont été produites dont uniquement 0.3% d'hydrogène vert, le reste représentant une production d'hydrogène gris.<sup>35</sup> Produit à partir de combustibles fossiles, d'eau ou de biomasse, l'hydrogène est principalement utilisé de nos jours par les raffineries pour leur capacité à réduire la teneur en soufre de produits pétroliers et les usines chimiques pour la production d'ammoniac destiné au secteur agricole. En 2019, la consommation du secteur du transport représentait moins de 0.01% de la consommation mondiale d'hydrogène de 73<sup>36</sup> millions de tonnes, un pourcentage qui devrait augmenter jusqu'à 28% selon les projections de demande mondiale 2050.<sup>37</sup> Pour répondre à la demande de la flotte mondiale actuelle, l'hydrogène serait l'énergie qui nécessiterait l'augmentation de production la plus faible avec 171%, une valeur atteignable comparé à 391% pour l'ammoniac ou 859% pour le méthanol mais qui viendrait avec un grand coût environnemental si le développement de la production d'hydrogène vert ne viendrait pas à progresser assez rapidement. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020).

### **2.1.3.2 Transport et distribution**

Dans le monde, cette énergie est majoritairement transportée par gazoducs tout comme le gaz naturel aujourd'hui et possède un réseau d'environ 5'000 km au total autour du globe. Ce moyen de transport est le moins coûteux et le plus efficace pour une distance de 2'500 à 3'000 km. En revanche, pour que l'utilisation globale d'hydrogène par l'industrie maritime puisse se faire, son transport par navire doit encore se développer, puisque qu'actuellement aucun navire ne peut transporter de l'hydrogène pur.<sup>38</sup> Par bateau, l'hydrogène pourrait être transporté liquéfié ou converti en carburant hydrocarbure synthétique mais également sous la forme d'ammoniac ou LOHC<sup>39</sup>. Cette deuxième méthode de transport représenterait une option économiquement avantageuse pour de longues distances (>3000 km). L'hydrogène pourrait également bénéficier de la réutilisation des actuels gazoducs destinés au transport de gaz naturel pour accélérer le déploiement de l'hydrogène autour du monde. En effet, 9 projets dans ce but ont été planifiés en Europe pour la fin de cette décennie. (International Energy Agency, 2022)

---

<sup>35</sup> <https://www.statista.com/statistics/1200503/global-hydrogen-production-share-by-type/>

<sup>36</sup> <https://www.rechargenews.com/energy-transition/a-net-zero-world-would-require-306-million-tonnes-of-green-hydrogen-per-year-by-2050-iea/2-1-1011920>

<sup>37</sup> <https://www.statista.com/statistics/1105664/hydrogen-demand-share-by-end-user-worldwide/>

<sup>38</sup> International Energy Agency: The Future of Hydrogen, 2019

<sup>39</sup> Transporteurs d'hydrogène organique liquide



Pour l'instant, la demande quasi-inexistante d'hydrogène pour l'industrie maritime fait qu'aucune infrastructure pour l'avitaillement d'hydrogène n'a été développée. L'hydrogène en tant que carburant peut-être stocké sous forme de gaz comprimé ou liquide cryogénique mais il est actuellement considéré comme coûteux et dangereux puisqu'il est un carburant facilement inflammable. L'hydrogène étant inodore, non-toxique et invisible, les possibles fuites de ce carburant à haut risque seraient difficiles à détecter. De plus, même si l'hydrogène détient le meilleur potentiel de décarbonisation grâce à l'abondance de ses sources de production renouvelables, il pourrait possiblement être une alternative écartée due à sa faible densité énergétique volumétrique perçue ainsi que sa difficulté de stockage. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020)

### **2.1.3.3 Navires actuels**

Actuellement, l'usage d'hydrogène en tant que carburant pour navire est très faible. En effet, les seuls navires ayant vu le jour sont des navires de petites tailles tels que des ferry, barges, catamarans utilisant la technologie de « piles à combustibles ».

Un des premiers navires modernes fonctionnant à partir d'hydrogène est le MF Hydra, un ferry de l'opérateur norvégien « Norled » qui assure désormais une liaison entre plusieurs ports de la région ouest du pays capable d'embarquer jusqu'à 80 véhicules et 299 passagers. Pour sa propulsion, le navire utilise deux piles à combustible alimentées à l'hydrogène liquide. (Ajsa Habibic, 2023)

Côté américain, le projet de « All American Marine, Inc » et « SWITCH Maritime » a été réalisé en créant le tout premier ferry de passagers à pile à combustible 100% alimentées à l'hydrogène.<sup>40</sup> Un projet chinois a également vu le jour avec le catamaran « The Three Gorges Hydrogen Boat No. 1 ». Ce transporteur de passagers est propulsé à pile à combustible hydrogène et un système de batteries au lithium. Ce projet local est vu comme une initiative positive vers la décarbonisation des navires à courtes distances en Chine.<sup>41</sup>

En revanche, selon la société de normalisation DNV, l'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant ne jouerait pas un rôle majeur dans le transport de longue distance. En effet, la faible densité énergétique volumétrique de l'hydrogène ainsi que la difficulté à le stocker à bord d'un navire rend son utilisation pour des voyages intercontinentaux complexe.<sup>42</sup> C'est ce qu'a pu constater le premier navire transporteur d'hydrogène au monde, le « Suiso

---

<sup>40</sup> <https://www.allamericanmarine.com/hydrogen-vessel-launch/>

<sup>41</sup> <https://www.marineinsight.com/shipping-news/chinas-first-hydrogen-fuel-cell-powered-boat-three-gorges-hydrogen-boat-no-1-successfully-launched-in-guangdong/>

<sup>42</sup> <https://www.rechargenews.com/energy-transition/dnv-rules-out-pure-hydrogen-as-a-future-long-distance-shipping-fuel/2-1-1292932>

Frontier », qui pendant son voyage test entre l’Australie et le Japon a expérimenté une fuite provoquant une brève flamme.<sup>43</sup>

#### **2.1.4 Méthanol**

Le méthanol (MwOH) est un composé organique faisant partie des quatre produits chimiques de base essentiels et est utilisé pour la production de plastiques, peintures ou matériaux de constructions.<sup>44</sup> En tant que carburant, le méthanol a vu son plus grand développement durant les années 90 aux Etats-Unis où environ 6 millions de gallons de méthanol à 100% et de mélanges à 85% avaient été utilisés chaque année dans des véhicules à carburant alternatif.<sup>45</sup> Considéré comme un carburant alternatif depuis les années 70, son rapport élevé d’hydrogène par carbone en tant que combustible liquide en fait de lui une énergie essentielle en tant que carburant alternatif pour le transport maritime. Ce carburant peut être utilisé dans des moteurs à combustion diesel et Otto, mais également pour alimenter directement une « pile à combustible ». (MAN Energy Solutions, 2023)

##### **2.1.4.1 Production**

De nos jours, la production totale de méthanol des 90 usines autour du monde s’élève à plus de 106 millions de tonnes (2021)<sup>46</sup> et est en majeure partie produite à partir de charbon ou de gaz naturel. Pour une meilleure durabilité, le méthanol peut également être produit à partir de biomasse ou de dioxyde de carbone capturé d’énergies renouvelables et d’hydrogène vert, dès lors appelé bio-méthanol et e-méthanol. Ces énergies font parties des méthanol dits « verts » entièrement renouvelables et sont les meilleures options au long terme. En revanche, la production de méthanol vert est complexe et plus coûteuse que les méthodes de productions actuelles. De plus, la production de méthanol 100% renouvelable étant hautement dépendante des futures sources de CO<sub>2</sub> renouvelables, le développement de ces carburants serait difficile sans une grande disponibilité d’hydrogène vert et de dioxyde de carbone à faible coût. (IRENA, 2021)

##### **2.1.4.2 Transport et Distribution**

Sur la figure 6, nous pouvons constater que le méthanol est une matière première avec un réseau de stockage et distribution déjà établi au niveau mondial. Chaque mois, ce sont des millions de tonnes de méthanol qui sont transportées mondialement par camion, train, barge, bateau. En plus d’être également transporté par pipeline, le méthanol bénéficie

---

<sup>43</sup> <https://www.h2-mobile.fr/actus/fuite-hydrogene-suisso-frontier-securite-revue-hausse/>  
<sup>44</sup>

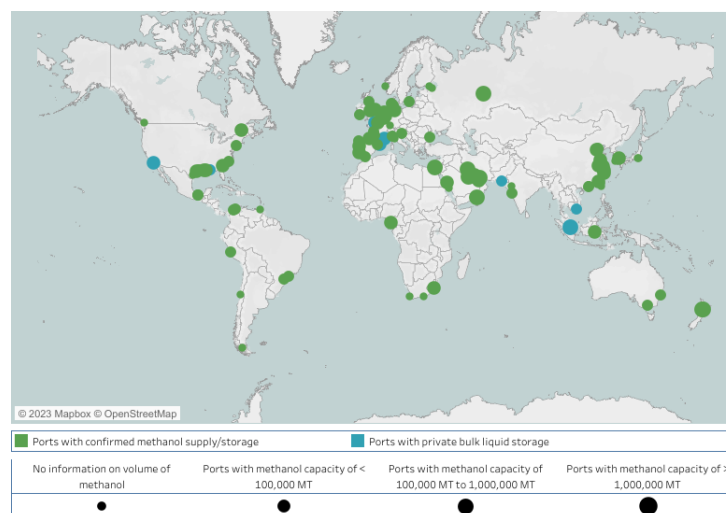
[https://www.methanol.org/#:~:text=Methanol%20E2%80%94%20the%20simplest%20alcohol%20\(CH3OH,c ells%2C%20boilers%20and%20cook%20stoves.](https://www.methanol.org/#:~:text=Methanol%20E2%80%94%20the%20simplest%20alcohol%20(CH3OH,c ells%2C%20boilers%20and%20cook%20stoves.)

<sup>45</sup> [https://afdc.energy.gov/fuels/emerging\\_methanol.html](https://afdc.energy.gov/fuels/emerging_methanol.html)

<sup>46</sup> <https://www.statista.com/statistics/1323406/methanol-production-worldwide/>

d'être un combustible compatible avec les infrastructures existantes de combustibles liquides fossiles. (IRENA, 2021)

Figure 6 : Disponibilité de méthanol dans les ports du monde



(Methanol Institute, 2022)<sup>47</sup>

En effet, son avitaillement ne nécessite pas de méthode complexe de stockage particulière puisque le méthanol reste liquide à pression et température ambiante. Même si les coûts de manutentions sont relativement faibles grâce à la compatibilité du méthanol aux infrastructures des carburants liquides fossiles, la faible densité en énergie de ce carburant signifierait que le volume de stockage de carburant à bord pourrait doubler, limitant l'espace utilisé pour le transport de cargaison. De plus, le haut niveau de toxicité et d'inflammabilité de cette énergie demande la mise en place de mesures supplémentaires pour stocker le méthanol, ce qui augmente les challenges et risques pour l'adoption de ce carburant. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020).

#### 2.1.4.3 Navires actuels

Selon les données de DNV, le nombre total de navires actuellement en service propulsés au méthanol est de 25, une augmentation de 15 navires depuis 2019. (Liu Ming, 2021)

La majorité de ces navires sont des pétroliers grâce à la forte compatibilité du méthanol aux énergies pétrolières. En 2022, ce sont 35 navires propulsés au méthanol qui ont été commandés, soit 13% du nombre total de navires commandés cette année. Actuellement, un total de 81 navires propulsés au méthanol a été commandé et devrait être livrés d'ici 2028. (The Maritime Executive, 2023)

<sup>47</sup> <https://www.methanol.org/marine/>

Le tout premier navire commercial fonctionnant au méthanol a été lancé par Stena Line en 2015 qui a converti un navire RoPax<sup>48</sup> pour fonctionner au méthanol ainsi qu'au diesel. En collaboration avec le plus grand producteur de méthanol « Methanex Corporation », cette entreprise de ferry suédoise avait lancé pour la première fois son navire pour un voyage entre Göteborg (SE) et Kiel (DE), un projet qui a démontré les capacités du méthanol en tant que carburant maritime. (Methanex Corporation, 2021)

Même si la production de méthanol vert n'a pas encore été faite à grande échelle, de nombreux armateurs majeurs comme CMA CGM, HMM, MSC ou A.P. Møller-Mærsk ont commencé l'investissement dans le développement et l'utilisation de méthanol en tant que carburant. En effet, A.P. Møller-Mærsk a conclu en décembre 2022 une lettre d'intention avec l'entreprise américaine SunGas Renewables et d'autres partenaires pour le développement d'installations produisant du méthanol vert en grandes quantités dans le but d'accélérer la production mondiale de ce carburant. (Maersk, 2022)

Les entreprises HMM, CMA CGM et MSC, également engagées dans la course à la décarbonisation, ont commandés début 2023 des navires alimentés au méthanol. (The Maritime Executive, 2023)

L'investissement de ces grandes entreprises dans le méthanol est crucial puisqu'il accélère son adoption et rassure l'industrie maritime marchande. L'entreprise « Waterfront Shipping », leader dans l'usage de méthanol pour navire, possède une flotte de 30 navires modernes dont plus de la moitié seraient alimentés au méthanol. Selon son président Paul Hexter, « *lorsque les mesures de sécurité appropriées sont respectées, nous savons que le méthanol peut être transporté, stocké, manipulé et avitaillé en toute sécurité, selon des procédures similaires à celles des carburants conventionnels.* » (Methanex Corporation, 2021)

## **2.2 Analyse PESTEL des tendances macro-économiques influençant la transition énergétique de l'industrie maritime**

### **2.2.1 Politique et légal**

L'analyse de cette première partie regroupe les facettes politiques et légales puisque les deux couvrent les aspects réglementaires de l'adoption des carburants alternatifs pour l'industrie maritime. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les navires qui devront recourir à des énergies de propulsion alternatives sont largement impactées par des réglementations mis en place par de nombreuses conventions. L'industrie maritime est réglementée principalement par l'IMO, l'organisation ayant la responsabilité de la sécurité

---

<sup>48</sup> Navires de transport par roulage de véhicules et l'accueil de passagers.

et de la sûreté de la navigation et de la prévention de la pollution marine et atmosphérique par les navires.<sup>49</sup> Même si l'organisation a été critiquée par le passé pour son inaction à la stratégie de décarbonisation, la mise en place de nouvelles réglementations environnementales à travers les conventions MARPOL ou SOLAS influence grandement les navires de l'industrie maritime. (Hanna Bach, 2023) Annoncée en octobre 2016, la réglementation IMO 2020 visant à diminuer les émissions de soufre des navires a provoqué un essor majeur du GNL en tant que carburant. En effet, l'année 2021 a connu un nombre de commandes de navires alimentés au GNL plus grande que les quatre années précédentes réunies, un nombre se montant à 240 navires.<sup>50</sup> Il est important de noter également que seuls les pays ratifiant et implémentant ces conventions peuvent influencer le respect de celles-ci puisque l'IMO ne détient pas le pouvoir de faire respecter les conventions par elle-même. A ce jour, plus de 100 pays ont ratifié l'Annexe VI de la convention MARPOL. (Li Huiming, 2021) En mars 2020, le porte-conteneur post-panamax « Joanna » de la compagnie MSC reçoit une interdiction de l'autorité fédérale des transports des Émirats Arabes Unis d'opérer dans leurs eaux pendant un an. A l'origine de cette sanction contraignante pour l'entreprise, c'est la toute première violation de la réglementation IMO 2020. En effet, le navire et son capitaine ont manqué de se conformer à un ordre de se séparer des 700 tonnes de HFO à bord avant de rentrer dans le port de Jebel Ali. Cette sanction stricte des « EAU » avait montré un bon exemple pour les futures non-conformités. (Jared Vineyard, 2023) D'autres politiques environnementales pourraient également influencer l'industrie maritime vers une transition énergétique plus rapide. Le nouveau règlement « FuelEU Maritime » de l'Union Européenne visant à assurer une diminution progressive de l'intensité en gaz à effet de serre des carburants utilisés par les navires marchands<sup>51</sup> pourrait inclure des mécanismes tels qu'un système d'échange de quotas d'émissions et des pénalités ou récompenses en fonction de la performance de l'objectif carbone du navire, créant de nouvelles pressions vers le changement. (Lloyd's Register, 2023) Les crises énergétiques peuvent également être à la source de décisions politiques impactant directement le développement de nouveaux carburants. De plus, la difficulté pour les pays de se séparer des énergies fossiles pendant notre phase de transition énergétique à grande échelle est amplifiée par l'augmentation des conflits politiques actuels, ce qui pousse certains gouvernements à assurer leur approvisionnement d'énergie en énergies fossiles. La guerre russo-ukrainienne a démontré la fragilité actuelle de production d'énergies renouvelables puisqu'elle a créé une crise énergétique mondiale qui a forcé en particulier l'Europe à augmenter ses approvisionnements en charbon.

---

<sup>49</sup> <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>

<sup>50</sup> <https://safety4sea.com/2021-was-a-record-year-for-lng-fueled-ships-says-dnv/>

<sup>51</sup> (European Commission, 2023)

L'économiste et professeur de l'université d'Oxford Dieter Helm décrit au Financial Times ce conflit comme « [...] *la première crise du prix zéro net et la première indication de l'ampleur du coût, mais de la nécessité, de la transition* ». » (Hook & Hume, 2022) Les exemples présentés démontrent l'impact que les gouvernements et leurs politiques peuvent avoir sur l'offre et la demande des nouvelles énergies renouvelables. Le haut niveau de coordination et d'incitations nécessaires pour pousser l'industrie maritime vers ce changement sera donc impossible sans l'intervention des gouvernements.

### 2.2.2 Techno-économique

Puisque les coûts des carburants alternatifs dépendent largement des développements technologiques pour la production de ceux-ci, les analyses technologiques et économiques sont combinées pour cette deuxième analyse. Faisant partie des coûts de voyage selon Martin Stopford<sup>52</sup>, les coûts de carburant d'un navire marchand représenteraient environ 30% de l'ensemble de ses coûts (coûts de capital compris). Dans tous les cas, peu importe la taille ou le type de navire, la source des coûts d'opération les plus élevés sont les coûts de carburant, pouvant se monter à plus de 50% des coûts quotidiens, rendant l'industrie maritime extrêmement sensible à ces coûts. (Masahiko Furuichi, 2015) Ils représentent également une des barrières principales à l'adoption des nouveaux carburants alternatifs renouvelables à grande échelle puisque leurs hauts coûts de production ne leur permettent pas de concurrencer avec ceux des carburants d'origine fossile. Il est estimé que les prix des carburants alternatifs resteront à un niveau élevé comparé aux carburants d'énergies fossiles pendant une longue période. Avec une future augmentation des pénalités pour l'utilisation de carburant fossiles, il serait très probable de voir une augmentation générale des coûts de carburants pour les armateurs, peu importe le carburant choisi. Avec ces éléments, il ne serait pas faux d'affirmer qu'en terme de coûts, les carburants alternatifs utilisant des technologies de motorisation actuelles devront attendre une longue période avant de devenir compétitifs. (Tomi Solakivi, 2022) Cela laissera place à une possible volonté d'investir davantage à court et moyen terme dans des technologies d'économie d'énergie ou un droit de polluer plutôt que le développement des nouvelles énergies. (Pierre Cariou, 2021) L'adoption globale des carburants alternatifs repose donc en majeure partie sur le futur développement technologique ainsi que la capacité de production d'énergie durable. Des économies d'échelle établies grâce à de larges investissements technologiques pourraient donc accélérer plus rapidement que prévu la compétitivité des carburants alternatifs. De plus, d'autres technologies voyant le jour pourraient jouer un rôle clé pour la transition énergétique maritime comme l'émergence des technologies de capture de carbone. En effet, la « capture de carbone à bord » ou « OCC » permettrait de réduire

---

<sup>52</sup> Maritime Economics, 2009

dans les meilleurs cas jusqu'à 70% d'émissions de carbone, des résultats prometteurs mais coûteux qui suscitent tout de même grandement l'intérêt de l'industrie maritime au moyen et long terme. (Mærsk Mc-Kinney Møller Center, 2022)

### 2.2.3 Socio-environnemental

Pour ce dernier axe d'analyse, les facteurs sociaux et environnementaux sont traités ensemble puisque les inquiétudes environnementales sont conduites par les pressions sociales de la population. En effet, depuis l'adoption en 2005 de l'Annexe VI à la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) établissant des règles relatives à la prévention de pollution de l'atmosphère par les navires<sup>53</sup>, les armateurs font face à des pressions venant de la société ainsi que des parties prenantes pour respecter les réglementations de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. En plus d'être déjà la cause d'approximativement 60'000 décès prématurés dans les zones portuaires en raison de la pollution de l'air, le développement de certains nouveaux carburants pour l'industrie maritime pourraient également rentrer en conflit avec les besoins primaires d'une population toujours grandissante. (Dan Rutherford, 2019) En effet, un remplacement des 200 millions de tonnes de carburant fossiles consommés annuellement par les navires de plus de 5'000 de jauge brute par des énergies renouvelables demande une augmentation considérable des capacités de production de celles-ci. L'adoption de biocarburants par exemple sera grandement influencée dans le futur par les contraintes liées à l'alimentation puisqu'elle signifierait l'allocation de terrains pour la production de carburant au détriment d'une production d'aliments vitaux pour la population. (Paul Balcombe, 2019) Cette problématique future concerne également l'ammoniac qui voit 70% de sa production utilisée pour fabriquer des engrais, une denrée très importante pour assurer la production de nourriture pour la population. (International Energy Agency, 2021) Cette concurrence pourrait amener l'apparition d'une hiérarchisation des ressources entre les différents secteurs dont l'agriculture, le transport maritime et d'autres industries. (Laursen, R, 2022)

Le changement climatique pourrait également impacter la rapidité d'adoption des carburants alternatifs. En effet, l'environnement marin pourrait voir ses glaces de mer du nord continuer à fondre et reculer, laissant place à des opportunités d'exploitation de pétrole autour du bassin arctique grâce à des glaces moins épaisses et répandues. De plus, les installations dans les ports ainsi que les infrastructures logistiques liées pourraient être fortement touchés par l'augmentation du niveau de la mer, augmentant également la fréquence d'exposition à des événements météorologiques extrêmes. (Regina Asariotis,

---

<sup>53</sup> [https://www.imo.org/fr/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/fr/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

2021) En 2005, les orages Katrina et Rita aux Etats-Unis ont submergé les raffineries de 3 différents états côtiers, suspendant le raffinage de 5,6 millions de barils de pétrole par jour. (Reuters, 2022) Le réchauffement climatique prévoit une augmentation en puissance et fréquence de ces orages, une menace qui pourrait demander une augmentation particulière des mesures de sécurité pour le transport et stockage des carburants alternatifs. (Thomas R. Karl, 2009)

## 2.3 Comparaison des coûts totaux de voyage de navires propulsés par différentes énergies

Dans le but de visualiser les implications économiques et financières des carburants conventionnels et alternatifs, il est important d'établir une analyse des coûts de voyage d'un parcours donné. Pour ce cas, un trajet de 3'865 miles nautiques du port de Samarinda (ID) jusqu'au port de Mundra (IN) a été choisi pour un vraquier sec ayant une capacité de 50'000 DWT. En comparant les coûts de différents navires avec différents carburants et en examinant les projections de prix des carburants jusqu'à 2050, cette analyse permet d'obtenir un aperçu des coûts totaux approximatifs des différentes options de carburant. Pour comparer au mieux les différents navires à sources de propulsion différentes, le modèle proposé par Martin Stopford de composition des coûts d'exploitation d'un navire a été appliqué à cette analyse, regroupant les principales sources de coûts dont les coûts d'opération, les coûts de voyage ainsi que les coûts de capital. Cette analyse compare les coûts totaux associés à des navires propulsés au IFO, au gaz naturel liquéfié (GNL), au mélange à 30% de biocarburants à un carburant conventionnel, à l'hydrogène ainsi qu'à l'ammoniac. Dans un dernier temps, l'impact environnemental des choix de carburant est pris en compte grâce à l'addition d'un coût d'émission par tonne de CO<sub>2</sub> émis au coût total des différents navires.

Pour parvenir au résultat du coût total, les « Capital Costs » (Intérêts et dividendes noté  $I$ ), les « Operating Costs » (Coûts de main-d'œuvre noté  $M$ , Provisions et lubrifiants noté  $L$ , Réparations et entretien noté  $R$ , Assurance noté  $A$ , Frais généraux noté  $G$ ) ainsi que les « Voyage Costs » (Combustible noté  $F$ , Coûts portuaires noté  $P$ , Droits de canal noté  $C$ , Frais de manutention noté  $H$ ) sont journalisés et additionnés. En utilisant les notations données, le calcul des coûts totaux journaliers d'un navire est le suivant :

$$(I) + (M + L + R + A + G) + (F + P + C + H)$$

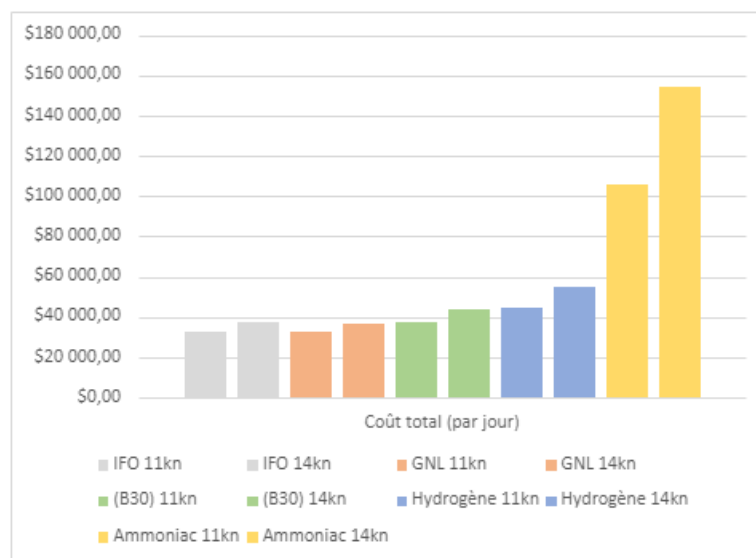
Pour démontrer les calculs faits, nous pouvons décomposer les coûts totaux d'un navire alimenté à l'IFO à 11 nœuds en suivant l'équation ci-dessus. Les valeurs pour les différents navires et vitesses de croisière peuvent être consultés à l'annexe 1. Le calcul est le suivant :



$(\$1\,579,86) + (\$2\,901,25 + \$730,75 + \$996,00 + \$420,25 + \$1\,052,75) + (\$9\,000,00 + \$3\,000,00 + \$3\,000,00 + \$10\,000,00) = \$32\,680,86$

Sur la figure 7 ci-dessous, nous pouvons observer les résultats de l'estimation de coûts totaux journaliers actuels de 5 carburants différents, selon une vitesse de croisière normale à 14 nœuds (11.5 jours) ainsi qu'une vitesse de croisière économique à 11 nœuds (14.5 jours). Premièrement, comparé aux coûts totaux journaliers d'un carburant conventionnel (IFO), nous pouvons voir que le GNL semble être économiquement viable avec une légère augmentation de 0,22% des coûts à une vitesse de 11 nœuds.

Figure 7 : Coûts totaux de 5 vraquiers secs à différentes sources de propulsion.  
Coûts totaux avec une vitesse de croisière de 11 et 14 nœuds



(David Paulo, 2023)

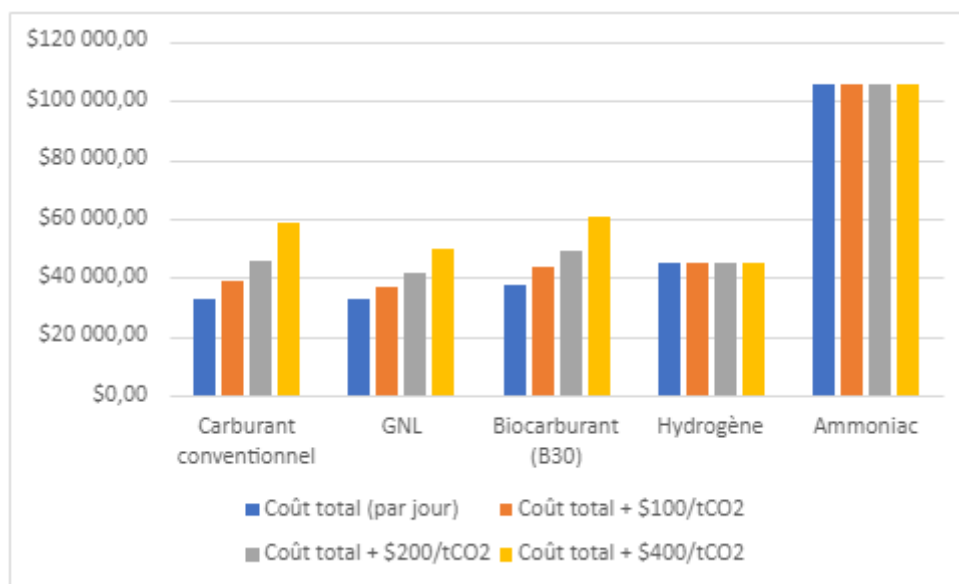
Même si les coûts de capital et d'opération utilisés pour cette analyse sont supérieurs à ceux du IFO, la quantité réduite de GNL nécessaire pour couvrir la même distance maintient le navire propulsé au GNL relativement compétitif. Les coûts totaux journaliers d'un navire propulsé au B30 se situent à un niveau plus élevé avec une augmentation de 15.06% des coûts à une vitesse de 11 nœuds. Étant un carburant dit « drop-in » ne demandant pas de modification majeure à la motorisation d'un navire à carburant conventionnel, le prix supérieur du FAME constitue dans cette estimation le seul élément qui place les coûts finaux du mélange B30 au-dessus de ceux du IFO.

Pour un navire propulsé à l'hydrogène, les coûts finaux sont supérieurs aux trois premiers carburants mais restent relativement bas comparé à ceux d'un navire propulsé à l'ammoniac. L'hydrogène est donc 37.54% plus coûteux que l'IFO et 19.53% plus coûteux que le mélange B30. Cette augmentation est expliquée tout d'abord par les coûts en capital supérieurs à ceux d'un navire à l'IFO mais principalement par le prix par tonne de carburant

consommées. En effet, pour une vitesse de croisière à 11 nœuds, les valeurs de 104 tonnes d'hydrogène à \$2500/t trouvées dans cette analyse constituent une différence de coût de combustible supérieure de \$8'916.67 comparé au IFO. De plus, il est important de noter que même si l'hydrogène semble être le carburant non-carboné le plus avantageux en termes de coûts, le volume nécessaire à bord du navire pour stocker et transporter ce carburant sous sa forme liquide serait 979% plus grand que celui de l'IFO et 252% plus grand sous sa forme comprimée.<sup>54</sup>

Pour finir, l'ammoniac est le carburant proposant le pire résultat, grimant à un coût total de \$105'613.33 pour une vitesse de croisière de 11 nœuds. Cette augmentation du coût total de 223,17% comparé au IFO peut être expliquée par la quantité de carburant nécessaire pour couvrir la distance du trajet. En effet, la faible densité énergétique de l'ammoniac constitue sa principale barrière avec ses 22.5 gigajoules d'énergie produite par tonne, c'est 20,5 gigajoules en moins que l'IFO. Nous pouvons également noter la différence importante en coût total selon la vitesse de croisière puisque prendre 3 jours additionnels de voyage à 11 nœuds permet d'atteindre une économie de coût total journalier de \$48'322.07, soit \$555'703.82 sur une période de 11.5 jours.

Figure 8 : Coûts totaux journaliers selon 3 tarifications de carbone différentes  
Coûts totaux avec une vitesse de croisière de 11 nœuds



(David Paulo, 2023)

Sur la figure 8, nous pouvons observer l'impact de l'addition d'un coût par tonne de carbone émise par les 5 différents carburants analysés, ce qui permet de mettre en perspective l'impact environnemental de la combustion de ces derniers. La tarification carbone étant

<sup>54</sup> MEPC 79-7-3 - Analysis of fuel options to meet the levels of ambition in the Initial IMO Strategy

actuellement approximativement à \$100 par tonne de CO<sub>2</sub><sup>55</sup>, deux tarifications additionnelles fictives à \$200 et \$400 ont été ajoutées pour nous permettre de visualiser plusieurs degrés de compétitivité entre les 5 carburants.

Parmi les 3 carburants carbonés (IFO, GNL et B30), une tarification de carbone fictive à \$100 par tonne de CO<sub>2</sub> émis atteint une moyenne d'augmentation du coût final de \$5'506.27. Pour rendre l'hydrogène le plus compétitif possible avec les 3 carburants carbonés, seulement une tarification carbone fictive à \$200 permet d'atteindre les coûts totaux journaliers semblables au navire à l'hydrogène, rendant les coûts totaux du IFO et mélange B30 supérieurs à l'hydrogène. En revanche, aucune des trois tarifications de carbone permet d'atteindre les coûts totaux de l'ammoniac. En effet, même avec une tarification à \$400, les coûts totaux journaliers des quatre autres carburants sont en moyenne 49.33% plus bas que ceux de l'ammoniac. Cette différence de coût confirme que les coûts actuels élevés de l'ammoniac ne lui permettent pas d'être économiquement viable.

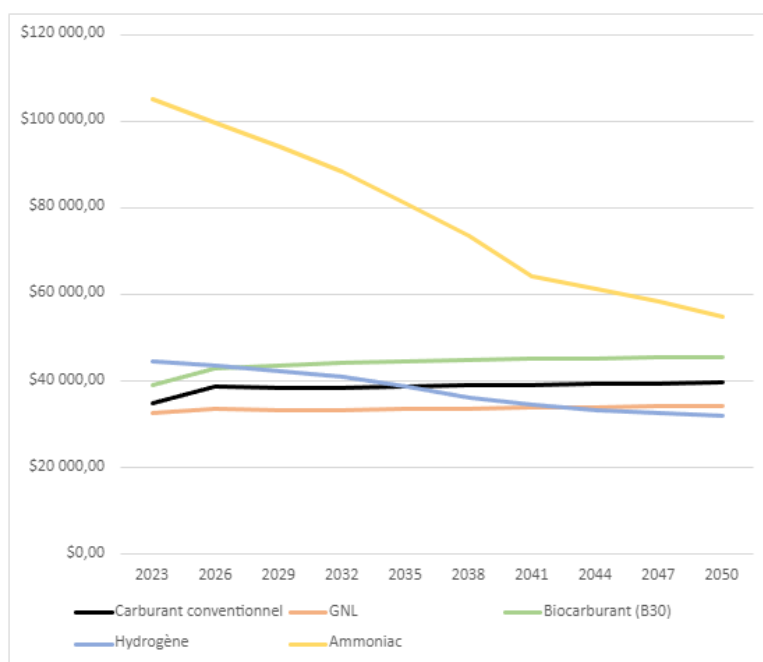
Pour le voyage choisi, nous pouvons constater qu'une tarification carbone à \$100 par tonne de CO<sub>2</sub> ne serait donc pas suffisante pour rendre les carburants non-carbonés suffisamment compétitifs pour être choisis à court terme. Tout de même, le rôle de la tarification carbone pourrait jouer un rôle clé à court terme dans le but de rapprocher les coûts de ceux-ci aux carburants carbonés. En effet, selon l'avis des intervenants interviewés, l'importance d'un système de tarification du carbone est soulignée pour encourager l'adoption de carburants alternatifs. Selon Mr. Jan Hoffmann, les mesures économiques, comme un prélèvement fixe, peuvent rendre les carburants alternatifs plus compétitifs, ce qui pourrait influencer les coûts de voyage des navires à carburants conventionnels. Cependant, Mr. Rustin Edwards souligne que pour que le système d'échange de quotas d'émissions soit efficace dans l'encouragement de l'adoption de carburants alternatifs, le prix du carbone doit être constamment supérieur à 100 dollars la tonne. Si ce seuil n'est pas atteint, les armateurs pourraient trouver plus économique de continuer à utiliser des carburants conventionnels et d'acheter des crédits carbonés. Enfin, Mr. Richard Watts souligne que l'existence de systèmes de tarification du carbone régionaux différents pourraient entraîner une complexité accrue pour les armateurs, qui devraient naviguer entre différentes tarifications carbonées selon les régions. Cette complexité pourrait augmenter les coûts de voyage, car les transporteurs devraient comprendre et se conformer à une multitude de réglementations et tarifications différentes.

---

<sup>55</sup> [https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map\\_data](https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data)

Pour la figure 9, une prévision des prix de carburants établis par Tomi Solakivi (cf. dans son rapport évaluant la compétitivité des coûts des carburants maritimes alternatifs est utilisée pour déterminer l'évolution des coûts totaux jusqu'à 2050, toute chose étant égale par ailleurs. Pour déterminer ses projections de prix des carburants, les coûts de production, le système d'échange de quotas d'émissions de l'Union européenne ainsi que la directive sur la taxation de l'énergie ont été pris en compte, donnant un résultat converti en dollar par tonne équivalent de pétrole. Après l'ajustement des quantités de carburants pour me permettre d'intégrer la prévision dans mon analyse et sans la prise en compte de la tarification par tonne de carbone émise utilisée pour les calculs de coûts totaux précédant, les résultats sont les suivants. En termes de coûts totaux finaux pour le voyage donné, nous pouvons constater que les navires propulsés aux carburants conventionnels tels que l'IFO et le GNL devraient rester compétitifs au long terme avec les carburants non-carbonés.

Figure 9 : Evolution des coûts totaux journaliers jusqu'à 2050  
Evolution des coûts totaux à 11 nœuds à partir d'une prévision des prix de carburant



(David Paulo, 2023)

Cependant, étant donné que les échanges d'émissions et les taxes sur les carburants devraient augmenter le coût des combustibles fossiles, les changements de réglementation futurs affecteront la compétitivité des carburants alternatifs, dont l'hydrogène et l'ammoniac. Pour les biocarburants, le coût total supérieur des carburants conventionnels peut être expliqué par le développement et l'adoption future des biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération, offrant un meilleur résultat carbonique que ses prédécesseurs comme le FAME, le biocarburant utilisé dans notre mélange B30. À court terme, les coûts totaux de l'hydrogène

ainsi que l'ammoniac restent supérieurs aux carburants conventionnels, ce qui confirme que leur adoption serait économiquement difficile avant 2030. De plus, leur résultat écologique réel à ce jour ne serait pas positif puisque leur production est majoritairement faite à base d'énergies fossiles. D'autre part, nous constatons au moyen terme que les coûts totaux du navire propulsé à l'hydrogène semblent égaler ceux d'un navire propulsé à l'IFO en 2030. Avec une meilleure disponibilité mondiale et des méthodes de productions renouvelables, l'hydrogène pourrait être rapidement adopté entre 2030 et 2040. Quant au navire propulsé à l'ammoniac, il serait économiquement viable uniquement à long terme puisqu'il descend en-dessous de la barre des \$60'000 uniquement à partir de 2050, se plaçant à \$9'436,10 plus cher que le mélange B30 et \$15'263 plus cher que l'IFO.

Pour conclure, les biocarburants devraient être une bonne alternative à court terme, étant un bon compromis entre un prix supérieur aux carburants conventionnels et un meilleur résultat écologique. Pour le navire propulsé à l'hydrogène, l'analyse réalisée nous montre que cette énergie semble être économiquement un bon candidat uniquement au moyen terme mais les problématiques liées au volume ainsi qu'à la disponibilité restent un frein majeur à court terme. Pour le navire propulsé à l'ammoniac, les résultats démontrent sans surprise que cette énergie devient uniquement économiquement viable à partir de 2050. En revanche, les possibilités pour ce carburant d'être mélangé avec un carburant conventionnel dans un moteur à combustion interne améliorerait et rapprocherait la date de viabilité économique comparé aux autres carburants.

## **2.4 Barrières contre l'adoption**

### **2.4.1 Autres mesures non liées aux combustibles**

Même si l'utilisation de carburant non carboné est considérée comme la direction certaine à prendre pour l'industrie maritime pour réduire son empreinte carbone, d'autres mesures additionnelles d'atténuation viennent confronter l'adoption majoritaire de celle-ci. Selon une étude menée par Maurício Aguilar Nepomuceno de Oliveira sur 22 mesures d'atténuation différentes, le coût marginal de réduction d'émission ainsi que le potentiel de réduction de chacune influence le degré d'implémentation des carburants non-carbonés.

A partir de ces valeurs de référence utilisée pour l'étude, nous pouvons voir sur le tableau 1 ci-dessous que l'utilisation de carburants alternatifs sans carbone représente la mesure ayant le potentiel d'atténuation le plus élevé à 64.08%, contrairement à l'utilisation de carburants alternatifs avec carbone ayant un potentiel à 1.85%. Les carburants alternatifs non-carbonés sont suivis par la forme de la coque à 8% et la réduction de vitesse de croisière à 7.54%. La mesure consistant simplement à réduire la vitesse de croisière semble être une mesure d'atténuation très attractive puisqu'elle ne requiert pas d'investissement

de grande envergure, ayant le 2<sup>ème</sup> plus petit coût marginal d'abattement positif juste après l'utilisation d'énergie éolienne. Cette observation explique pourquoi cette mesure représente celle avec le plus grand taux d'implémentation à 66%. En revanche, les bénéfices de carburant et carbone de cette mesure sont particulièrement réalisables pour les navires porte-conteneurs, croisières et roll-on/roll-off contrairement à d'autres navires à faible vitesse tels que les vraquiers ou pétroliers. (United States Environmental Protection Agency, 2021)

Tableau 1 : Taux d'implémentation de différentes mesures en fonction de leur potentiel d'atténuation et coût marginal d'abattement  
Valeurs de référence pour 22 mesures d'atténuation

	Potentiel d'atténuation	Coût marginal d'abattement (US\$/tCO <sub>2</sub> )	Taux d'implémentation
Réduction de vitesse	7.54%	10	66.00%
Optimisation de voyage	3.64%	-125	63.00%
Entretien de la coque	3.90%	-91	46.00%
Entretien des hélices	3.95%	-102	26.00%
Navire plus léger	0.39%	54	3.00%
Lubrification à l'air	2.26%	93	1.00%
Revêtement de la coque	2.55%	-50	46.00%
Optimisation des ouvertures de la coque pour l'écoulement de l'eau	3%	-119	9.00%
Forme de la coque	8%	-73	40.00%
Améliorations alter. du moteur principal	0.45%	-34	53.00%
Systèmes auxiliaires	1.59%	-39	32.00%
Amélioration des hélices	2.40%	18	25.00%
Réduction demande de puissance auxil.	0.71%	-59	37.00%
Amélioration de la centrale à vapeur	3.09%	54	14.00%
Récupération de chaleur perdue	2.13%	-111	43.00%
Hybridation	4%	86	1.00%
Énergie éolienne	1.66%	2	0.00%
Panneaux solaires	0.30%	1048	0.00%
Piles à combustible	1.63%	60	-
Repassage à froid	1.31%	200	-
Utilisation carburants alternatifs avec carbone	1.85%	249	0.00%
Utilisation carburants alternatifs sans carbone	64.08%	416	1.00%

(Maurício Aguilar Nepomuceno de Oliveira, 2022)

De plus, nous pouvons également noter l'inefficacité de l'utilisation de panneaux solaires comme mesure de mitigation ayant un potentiel noté à 0.3% et un coût marginal d'abattement à \$1048 par tonne de CO<sub>2</sub> réduite, le plus élevé avant l'utilisation de carburants alternatifs avec carbone. Même si certains projets de navires à énergie solaire ont été discuté tel qu'au Pakistan Marine Academy, nous pouvons supposer que cette mesure est largement incompatible à l'industrie maritime dû à sa faible production d'énergie nécessaire pour de grands navires.<sup>56</sup>

D'autre part, toutes les mesures ne sont pas composées de coûts marginaux d'abattement positif. En effet, parmi les 22 mesures, 10 sont caractérisées par des coûts marginaux négatifs, signifiant non seulement une atténuation des émissions carboniques mais également la génération d'une économie de coûts. Ces mesures semblent être celles qui devraient être priorisées par l'industrie puisqu'elles indiquent une possibilité de réduction des émissions tout en étant économiquement favorables pour l'armateur. Le tableau démontre cette observation puisque ces mesures figurent parmi celles avec les plus grands taux d'implémentation. Pour cette raison, nous retrouvons des mesures simples telles que l'optimisation de voyage avec un taux d'implémentation de 63% expliqué par un coût marginal d'abattement négatif relativement élevé et un bon potentiel de mitigation à 3.64%.

Ces résultats démontrent que l'adoption à grande échelle des carburants alternatifs non-carbonés peuvent être non-seulement freinés par des contraintes technologiques et d'infrastructures, mais également par l'adoption générale de mesures moins couteuses et plus accessibles pour certains armateurs. De plus, selon Jason Monios, la transition énergétique du secteur maritime n'est pas uniquement et purement un changement de carburants, mais une transformation radicale de l'économie maritime moins étendue et plus locale, créant de nouvelles perspectives allant contre la course à l'adoption globale des carburants alternatifs. (Jason Monios, 2020)

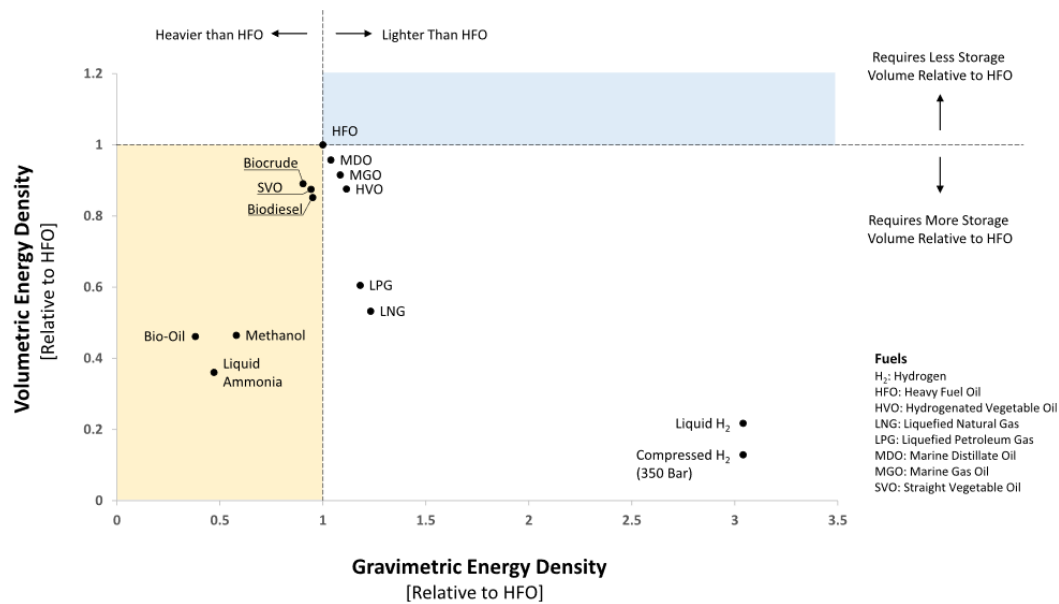
#### **2.4.2 Contraintes spatiales**

Pour évaluer l'efficacité ainsi que les performances de différents carburants, les concepts de densités énergétique volumétrique et gravimétrique sont utilisés et déterminent la quantité d'énergie stockée par unité de volume (J/m<sup>3</sup>) et par unité de masse (J/kg) d'un carburant. Ces mesures impliquent de majeures répercussions sur les infrastructures nécessaires pour transporter et stocker ces carburants, pouvant constituer une barrière importante contre l'adoption de certains carburants précis.

---

<sup>56</sup> <https://tribune.com.pk/story/2378270/experts-call-for-wind-solar-powered-ships-to-cut-marine-pollution>

Figure 10 : Densités énergétique volumétrique et gravimétrique de carburants alternatifs par rapport au HFO



(Anthony Foretich, 2021)

Sur la figure 10 ci-dessus, 13 carburants différents sont comparés par rapport à un carburant conventionnel carboné, le HFO (fioul lourd). Pour les carburants alternatifs utilisés pour ce graphique, les valeurs se plaçant à gauche du carburant de référence représentent des carburants plus lourds tandis que celles à droite en représentent des plus légers. Les carburants se plaçant en-dessous quant à eux nécessitent un volume de stockage plus important que le carburant de référence tandis que ceux au-dessus nécessitent un volume de stockage moins important.

Si nous observons le graphique dans son ensemble, nous pouvons tout d'abord constater qu'aucun carburant alternatif ne propose une densité énergétique gravimétrique supérieure au HFO. Cela démontre la haute efficacité du carburant conventionnel puisque plus d'énergie peut être stocké dans un espace limité comparé aux autres carburants.

Pour les carburants plus lourds et nécessitant un volume de stockage plus important que l'HFO, c'est l'ammoniac liquide qui représente le pire carburant. En effet, dans un rapport produit par l'entreprise de gestion de navire Grieg Star, la faisabilité de réaménagement d'un vraquier existant (50'720DWT) a été évaluée et une des principales contraintes est la réduction de capacité de chargement de cargo à bord. Dû au poids supérieur et la haute densité énergétique volumétrique de l'ammoniac, le placement des réservoirs accueillants l'ammoniac à l'intérieur de la calle n°1 réduit la capacité d'accueil de cargo de 1700 MT, une diminution de 3.5%. (Grieg Star, 2023) Même si l'ammoniac représente le pire carburant en termes de densité énergétique, sa haute maturité et simplicité de stockage



comparé à l'hydrogène en fait de lui un potentiel vecteur d'hydrogène, puisque l'ammoniac détient une forte teneur en hydrogène. Tout comme l'ammoniac, le méthanol ne dispose pas d'un bon résultat de densité énergétique mais bénéficie de technologies de stockage et de déploiement sur les navires matures. Dans son étude analysant les considérations d'ingénierie pour quatre méthodes de stockage de carburants alternatifs à bord d'un grand navire-citerne de GNL, Charles J. McKinlay a déterminé que le méthanol nécessitait moins de masse et de volume que l'ammoniac dans les quatre approches. Le méthanol nécessiterait moins de volume et serait plus facile à stocker que l'hydrogène également. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020)

A l'opposé, l'hydrogène compressé ou liquide reste un carburant nécessitant tout de même un volume de stockage plus important que l'HFO, mais bénéficie d'être 3 fois plus léger que ce dernier, devançant largement le 2<sup>ème</sup> carburant le plus léger, le GNL. Même si l'hydrogène est régulièrement écarté pour sa plus faible densité énergétique volumétrique parmi tous les différents carburants alternatifs, le volume équivalent requis ne serait pas suffisamment élevé pour être jugé complètement inviable pour l'industrie maritime. (McKinlay, Turnock and Hudson, 2020)

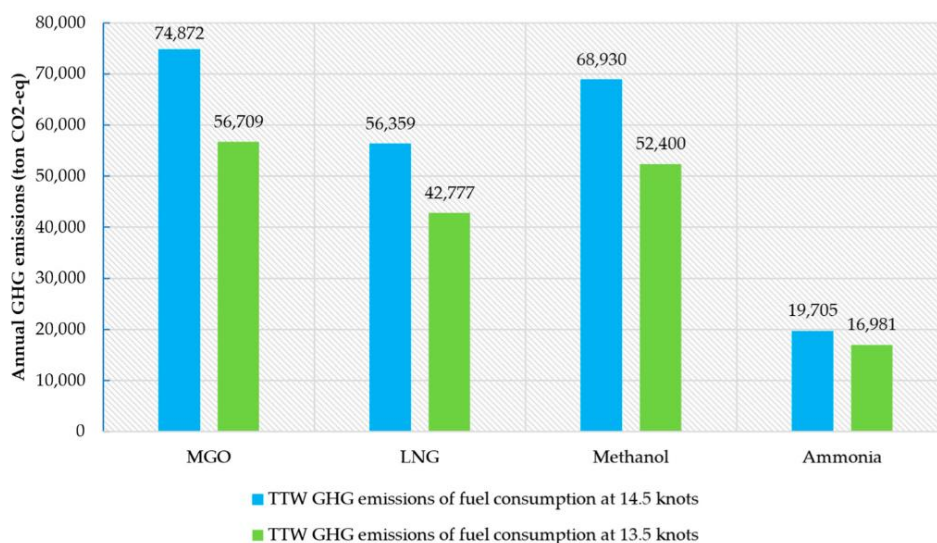
D'autres carburants alternatifs dits « drop-in » tels que le biodiesel, HVO ou SVO bénéficient donc d'être rapidement adoptés grâce à leur haut niveau d'adaptabilité avec les carburants fossiles conventionnels. Pour cette raison, les biocarburants seraient les premiers carburants envisagés pour la réduction d'émissions à court terme à moindre coût.

### **2.4.3 Résultats environnementaux**

Pour déterminer les carburants de demain, le facteur le plus important placé au cœur de la problématique est le niveau d'émissions de gaz à effet de serre de ces derniers. En effet, des émissions similaires ou supérieures aux carburants conventionnels carbonés par les carburants alternatifs ne résoudraient pas la problématique soulevée. Même si l'utilisation directe de certains carburants alternatifs permet d'émettre aucun gaz à effet de serre, il est important de considérer également les gaz à effet de serre générés avant l'utilisation du carburant à bord.

Pour cela, il est possible d'analyser les émissions dites « Well to Tank » qui sont quantifiées à partir de l'extraction des matières premières jusqu'au réservoir du véhicule et les émissions dites « Tank to Wake » qui représentent les émissions depuis le réservoir de carburant jusqu'à la combustion et échappement des gaz du carburant par le navire.

Figure 11 : Émissions annuelles de GES « Tank to Wake » d'un pétrolier VLCC basées sur la consommation annuelle de carburant



(Jinjin Huang, 2022)

Sur la figure 11 ci-dessus, nous pouvons constater les émissions de GES de 4 différentes sources de propulsion à 2 vitesses de croisières pour un pétrolier VLCC naviguant entre le Moyen-Orient et la Chine en utilisant la méthode d'analyse du cycle de vie.

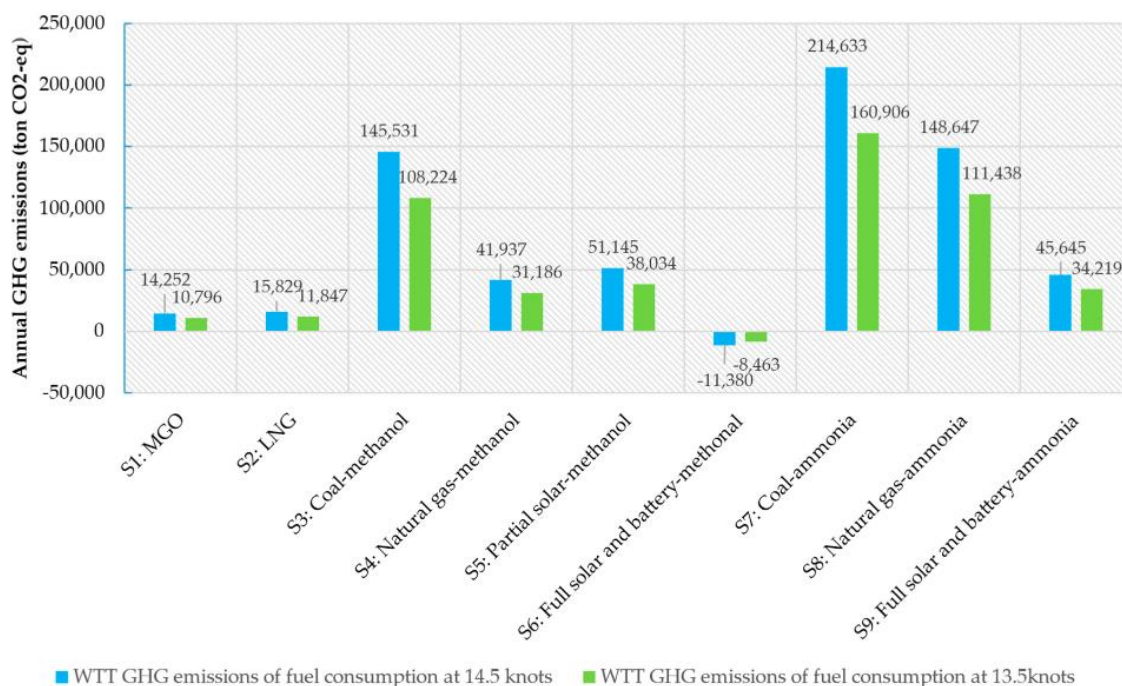
Dans cette étude de cas, uniquement le MGO, GNL, méthanol et l'ammoniac ont été pris en compte. Pour des émissions « Tank to Wake », nous pouvons constater que l'utilisation de GNL permet de donner des résultats en dessous de ceux du MGO (-24.56% à 13.5 nœuds) démontrant un bénéfice environnemental à utiliser du GNL.

Pour le méthanol, les résultats ne sont pas concluants et donne à ce carburant uniquement une faible diminution d'émissions comparé au MGO (-7.6% à 13.5 nœuds). En revanche, les résultats de l'ammoniac sont bien plus positifs puisqu'ils accordent une diminution d'émissions considérable comparé au MGO (-70.05% à 13.5 nœuds).

Il est également important de noter les résultats d'une diminution de vitesse de croisière. Pour le MGO par exemple, le passage d'une navigation de 14.5 à 13.5 nœuds a permis de réduire les émissions de 24.26%. Dans cette première analyse, nous pouvons déduire que les sources de propulsions à base d'hydrogène (hydrogène et ammoniac) semblent être celles avec les meilleurs résultats environnementaux en « Tank to Wake ».

Figure 12 : Émissions annuelles de GES « Well to Tank » d'un pétrolier VLCC basées sur la consommation annuelle de carburant

Émissions annuelles de GES des carburants selon leur méthode de production (S1&S2 importés d'outre-mer, S3-S9 produits en Chine)



(Jinjin Huang, 2022)

Sur la figure 12 ci-dessus, nous pouvons constater les émissions GES « Well to Tank » des 4 mêmes sources de propulsion selon leur méthode de production. Parmi les carburants à l'ammoniac (S7, S8, S9), nous pouvons constater que les émissions générées par les méthodes de production à base d'énergies fossiles et l'acheminement jusqu'au réservoir (S7, S8) surpasse les émissions de production de MGO. Même si l'ammoniac génère 70.05% en moins d'émissions GES que le MGO depuis le réservoir de carburant jusqu'à la combustion (Tank to Wake), les méthodes de production actuelles (à base fossiles) ne permettent pas à l'ammoniac d'être un carburant viable si nous prenons en compte les émissions « Well to Tank ». En revanche, l'ammoniac à partir d'énergie solaire et batteries (S9) produit considérablement moins d'émissions que les deux premières méthodes de production, ce qui assure la viabilité des carburants à base d'hydrogène dans leur forme de production dite « bleue ». Le meilleur résultat « Well to Tank » est donc le méthanol produit entièrement à l'énergie solaire et batteries (S6) puisque son processus de production absorbe le CO<sub>2</sub> en tant que matière première, produisant des émissions nettes négatives. Quant aux carburants restants, aucun ne dispose de résultats compétitifs à ceux du MGO.

Si nous comparons cette analyse à un travail additionnel de mesure de performance environnementale de carburants alternatifs marins, une étude de comparaison menée sur le GNL, méthanol, hydrogène, ammoniac ainsi que le biodiesel selon plusieurs méthodes de production a permis d'établir certaines conclusions similaires. Les meilleurs résultats « Tank to Wake » sont donnés par les carburants alternatifs utilisant la technologie de propulsion à « pile à combustible », à savoir l'ammoniac ainsi que l'hydrogène. Les mêmes résultats peuvent être observés en utilisant des systèmes alimentés uniquement par batterie. Pour les carburants carbonés tels que le GNL ou le biogaz liquéfié, ils proposent les meilleurs résultats grâce leur réduction de ~25% d'émissions carboniques. En revanche, ces résultats sont remis en cause par les glissements de méthane causé par une combustion défailante. Dû à la haute présence de méthane dans le GNL, quelques cas de glissement de méthane pourraient rapidement ramener ce carburant au même niveau d'émissions GES que celles des carburants marins conventionnels, ou plus. Les émissions GES « Well to Wake » quant à elle ne permettent également pas de définir le meilleur carburant puisque les résultats varient considérablement en fonction des différentes voies de production et des principales sources d'énergie utilisées pour la production de carburants. Quant à eux, les biocarburants dont le biodiesel, bio-méthanol, bio-méthane ainsi que les carburants produits à partir d'énergies renouvelables offrent une réduction visible si l'ensemble du cycle de vie est pris en compte. L'usage d'électricité via des batteries est également un carburant pris en considération puisqu'il ne génère pas d'émissions à l'usage. Même si la production d'électricité à base d'énergie fossile représente un avantage moindre par rapport à un carburant marin conventionnel, les développements majeurs dans la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables dans le continent européen en fait de ce moyen de propulsion un carburant marin prometteur pour l'ancien continent. (Yifan Wang, 2021)

A partir de ces observations, nous pouvons conclure que même si certains carburants alternatifs non carbonés offrent une grande diminution d'émissions GES à la combustion, les méthodes de production actuelles à base d'énergies fossiles repousse l'adoption de ceux-ci.

## **2.5 Les carburants et autres mesures l'horizon 2050 : Avis des intervenants**

Cette analyse fournit une vue d'ensemble des opinions de différents intervenants de l'industrie maritime au sujet de la décarbonisation du secteur d'ici 2050. Mr. Alberto Perez, Mr. Richard Watts et Mr. Rustin Edwards éclairent des défis et des solutions potentielles pour réduire les émissions de carbone dans l'industrie du transport maritime, autant au niveau des différents carburants, mais également des différentes technologies possibles. Par manque d'expertise précise sur ce sujet-ci, l'avis de Mr. Jan Hoffman n'est pas inclus.

### **2.5.1 Mr. Alberto Perez**

Mr. Perez présente une perspective équilibrée sur la décarbonisation de l'industrie maritime, en soulignant les complexités et les incertitudes qu'elle implique. Il reconnaît les défis posés par les différences régionales dans la disponibilité des carburants alternatifs, en particulier pour les navires marchands qui n'ont pas de trajectoire fixe et voyagent dans le monde entier. Il prévoit que le développement de la disponibilité des carburants alternatifs commencera autour des principaux centres d'avitaillement et des routes où se trouvent les premiers utilisateurs, ce qui suggère un processus d'adoption graduel.

En ce qui concerne les stratégies de décarbonisation, Mr. Perez ne s'engage pas sur une solution unique. Il envisage plutôt une combinaison de dispositifs d'économie d'énergie, de technologies d'efficacité énergétique et de divers carburants. Il prévoit une augmentation significative de l'utilisation de ces technologies à court terme, ce qui peut contribuer à réduire la consommation d'énergie des navires et, par conséquent, leurs émissions de carbone. Il voit également un potentiel dans la technologie de capture du carbone, qui permet de capturer et de stocker les émissions de carbone, empêchant ainsi leur rejet dans l'atmosphère.

Pour le transport maritime à courte distance, Mr. Perez considère que les solutions hybrides ou entièrement alimentées par des batteries constituent une tendance importante, suggérant que l'électrification pourrait jouer un rôle majeur dans la décarbonisation de ce segment de l'industrie du transport maritime. Pour le transport maritime en eaux profondes, il s'attend à un mélange de solutions, y compris des gains d'efficacité, de l'énergie éolienne et divers carburants, ce qui indique une gamme plus diversifiée de stratégies en raison des plus grands défis associés aux voyages de longue distance et transocéaniques.

### **2.5.2 Mr. Richard Watts**

Mr. Watts offre une perspective pragmatique sur la décarbonisation de l'industrie maritime, en se concentrant sur les aspects pratiques et les réalités de la disponibilité des carburants et de l'infrastructure. Il reconnaît les défis posés par les différences régionales dans la

disponibilité des carburants alternatifs et souligne le réseau mondial d'approvisionnement en carburants liquides, qui peuvent être stockés et transportés à température ambiante. Il considère le biocarburant comme une solution immédiate parce qu'il peut être utilisé dans les moteurs à combustion interne des navires actuels et qu'il peut être fourni par le même réseau existant.

En termes de stratégies de décarbonisation, Mr. Watts identifie les biocarburants et le GNL comme les principales options à court terme. Ces carburants peuvent être utilisés avec les infrastructures et les technologies existantes, ce qui en fait un choix pratique pour les efforts de décarbonisation immédiats. À plus long terme, il voit un potentiel dans le méthanol, l'ammoniac et l'hydrogène, mais reconnaît que ces carburants présentent leurs propres défis, notamment la nécessité de nouvelles infrastructures et technologies, et l'incertitude des réglementations futures et des conditions du marché.

Pour le transport maritime à courte distance et en haute mer, Mr. Watts estime que les stratégies se chevaucheront largement. Il suggère qu'il est peu probable de développer des technologies complètement différentes pour les deux secteurs, ce qui indique une approche commune de la décarbonisation dans l'ensemble de l'industrie maritime.

### **2.5.3 Mr. Rustin Edwards**

Mr. Edwards fournit une perspective détaillée et technique sur la décarbonisation de l'industrie maritime, en se concentrant sur la faisabilité technique et économique des différents carburants et technologies. Il considère le biodiesel et le méthanol comme les carburants les plus rentables pour la navigation en haute mer, compte tenu de leur disponibilité sur le marché et de leur compatibilité avec l'infrastructure actuelle.

Pour le transport maritime à courte distance, Mr. Edwards constate des progrès dans l'utilisation du méthanol et une plus grande adaptation aux navires électriques, ce qui indique une tendance à l'électrification dans ce segment de l'industrie du transport maritime. Il mentionne également le potentiel de l'hydrogène pour propulser un navire courte-distance, qui peut être rechargé aux deux extrémités du voyage.

Mr. Edwards reconnaît les défis posés par les différences régionales dans la disponibilité des carburants alternatifs, notamment en termes de réglementations et de normes différentes d'une région à l'autre. Il souligne également la nécessité d'investissements importants et d'un développement technologique pour produire de l'hydrogène vert et des carburants électriques, suggérant qu'il s'agit là de défis majeurs pour la décarbonisation de l'industrie maritime.

En ce qui concerne les stratégies de décarbonisation, Mr. Edwards souligne l'importance de l'optimisation et des gains d'efficacité, qui peuvent contribuer à réduire la consommation de carburant. Il cite à titre d'exemple la diminution de la vitesse de croisière et le remplacement du revêtement de la coque pour réduire les frottements. Il voit également un potentiel dans les épurateurs électrostatiques, bien qu'il note le défi que représente le traitement des déchets de ces systèmes.

Mr. Edwards est moins optimiste quant au potentiel de l'hydrogène en tant que carburant pour la décarbonisation, en raison de son coût de production élevé, de son inefficacité dans le transfert d'énergie et des difficultés de manipulation dues à sa petite taille moléculaire. Il mentionne également la densité énergétique plus faible de l'hydrogène par rapport à d'autres combustibles, ce qui signifie qu'il faut plus d'hydrogène pour produire la même quantité d'énergie.

### 3. Synthèse et recommandations

Dans cette partie de synthèse, les carburants et/ou mesures pour le shipping en eaux profondes ainsi qu'à courte distance sont discutés à partir des analyses établies précédemment. Pour chacun des types de transport maritime, les recommandations sont distinguées entre le court terme et le long terme permettant de distinguer les actions concrètes actuelles et celles plus ambitieuses.

Tableau 2 : Caractéristiques de différents carburants alternatifs selon l'HFO

Type de carburant	Energie spécifique	Densité	Densité énergétique	Température de transport	Exigence DWT	Volume réservoir requis	Réduction d'émissions
	MJ/kg	t/m3	MJ/L	Celsius	tonnes	m3	%
<b>HFO (référence)</b>	<b>40,5</b>	<b>0,87</b>	<b>35,2</b>	<b>ambient</b>	<b>870</b>	<b>1000</b>	<b>2,741</b>
GPL	4,00%	-31,00%	-28,00%	-42,00	-4,00%	40,00%	-8,00%
Méthanol	-56,00%	-9,00%	-60,00%	ambient	125,00%	148,00%	-2,00%
Éthanol	-36,00%	-8,00%	-41,00%	ambient	56,00%	69,00%	-5,00%
DME (Dimethyl-Ether)	-30,00%	-23,00%	-46,00%	-24,00	2,00%	32,00%	-38,00%
GNL	21,00%	-48,00%	-37,00%	-163,00	-17,00%	60,00%	-28,00%
BML (LBM)	23,00%	-51,00%	-39,00%	-163,00	-19,00%	64,00%	-29,00%
Ammoniac (liquide)	-54,00%	-22,00%	-64,00%	-33	115,00%	214,00%	-100,00%
Ammoniac (comprimé)	-54,00%	-31,00%	-68,00%	ambient	115,00%	176,00%	-100,00%
Hydrogène (comprimé)	251,00%	-97,00%	-91,00%	-252,90	-71,00%	252,00%	-100,00%
Hydrogène (liquide)	251,00%	-92,00%	-72,00%	ambient	-71,00%	979,00%	-100,00%
Batteries	-99,00%	32,00%	-99,00%	ambient	13866,00%	10465,00%	-100,00%

(IMO : MEPC 79-7-3, 2022)

### 3.1 Transport maritime en eaux profondes

#### 3.1.1 Court terme

À court terme, la décarbonisation du transport maritime en eaux profondes ne se reposera pas en majorité sur des carburants alternatifs, mais en grande partie sur l'optimisation de navigation. En effet, nous avons pu observer que pour un coût bien plus faible que l'adoption d'un nouveau carburant, une diminution d'émissions satisfaisante peut déjà être atteinte en concentrant des premiers efforts sur les navires eux-mêmes en augmentant l'efficacité de navigation de la coque du navire. Il est important de noter que ces mesures ne sont que des solutions temporaires et ne suffiront pas à elles seules pour atteindre les objectifs de décarbonisation à long terme. Par conséquent, il est crucial de commencer dès maintenant à investir dans le développement et l'adoption de carburants alternatifs et de technologies innovantes pour le transport maritime. Pour les armateurs majeurs, l'utilisation d'un carburant alternatif à court terme peut être possible, mais le modèle commercial de



navigation pourrait poser des problèmes de disponibilité. Pour des navires à trajets fixes, l'approvisionnement unique en carburant alternatifs auprès des « hubs » portuaires est possible et envisageable. En revanche, l'approvisionnement en serait difficile pour des navires à trajets flexibles. Pour cela, nous pourrions voir à court terme l'utilisation de moteurs à double carburants, offrant au navire à trajet flexible une meilleure flexibilité d'avitaillement dans les régions en développement où la disponibilité de carburant alternatif est moindre ou inexistante. Les carburants concernés à court terme quant à eux seraient des carburants connus et les plus adaptés aux infrastructures actuelles. Le gaz naturel liquéfié (GNL) est un carburant à faible teneur en carbone qui est déjà utilisé par de nombreux pétroliers et navires-citernes. Nous avons pu constater que l'utilisation de GNL accorde des résultats carboniques en dessous de ceux du MGO, démontrant un bénéfice environnemental à utiliser du GNL dans le cas où les glissements de méthane soient minimisés. De plus, son utilisation grandissante grâce à sa capacité à répondre aux restrictions des ECA's en fait lui un carburant de transition vers des carburants sans carbone au long terme. Un second candidat serait le biodiesel grâce à sa capacité à s'adapter parfaitement aux infrastructures actuelles pour les carburants pétroliers conventionnels. De plus, la production grandissante depuis 2014 de biocarburants avancés démontre le potentiel de ce carburant à court terme. En revanche, la source actuelle de production des biocarburants pourrait rentrer en conflit avec les besoins physiologiques des populations à l'avenir, ce qui en fait de ceux-ci des carburants incertains au long terme. A ce jour, le carburant le plus prometteur pour le transport maritime en eaux profondes à court terme est le méthanol grâce à sa bonne disponibilité et compatibilité ainsi que son haut niveau de maturité de stockage et de déploiement sur les navires actuels. Cela peut être constaté grâce au nombre élevé de commandes de navires propulsés au méthanol qui devraient être livrés d'ici à 2028.

### **3.1.2 Long terme**

La décarbonisation du transport maritime à long terme est un défi complexe qui nécessite une approche multifacette. A partir des analyses faites précédemment, les carburants alternatifs, tels que l'hydrogène ou l'ammoniac, sont prometteurs pour remplacer les carburants à base de pétrole à long terme. A court terme, nous avons constaté que les coûts totaux de voyage des navires propulsés à l'hydrogène et à l'ammoniac restent supérieurs aux carburants conventionnels, ce qui confirme que leur adoption serait économiquement difficile avant 2030. Mr Watts quant à lui souligne le potentiel à long terme dans le méthanol, l'ammoniac et l'hydrogène. Cependant, leur adoption dépendra des principaux facteurs qui sont la route empruntée, la distance parcourue ou la taille du navire. Par exemple, nous pouvons voir sur le tableau 2 que l'hydrogène a une énergie spécifique

élevée par rapport à son poids, mais est volumineux et nécessite un stockage à des températures très basses. Il est important de noter également que pour répondre à la demande de la flotte mondiale actuelle, l'hydrogène serait l'énergie qui nécessiterait l'augmentation de production la plus faible avec 171%, une augmentation de production possible et envisageable comparé aux autres carburants alternatifs, ce qui la rend difficile de l'exclure des carburants à long terme. L'ammoniac, bien qu'il soit plus facile à stocker et à transporter que l'hydrogène, est toxique et corrosif, ce qui pose des défis en matière de sécurité et de manutention à court terme. En outre, même si l'ammoniac est déjà énormément présent dans les ports du monde (figure 5), l'adoption de ces carburants nécessitera tout de même le développement d'importantes infrastructures de production et de distribution pour l'avitaillement en carburant de navires. Ces problématiques ne pourraient pas être résolues au court terme, laissant ces carburants uniquement comme option au long terme. D'autres systèmes de propulsion supplémentaires pourraient être adoptés tels que l'énergie éolienne ou solaire. Cependant, ces technologies sont encore en développement et leur efficacité et leur fiabilité dans un environnement maritime doivent encore être démontrées. Enfin, la réglementation jouera un rôle clé dans la décarbonisation du transport maritime à long terme. Des mesures telles que le système d'échange de quotas d'émissions de l'UE pourraient rendre les carburants alternatifs plus compétitifs par rapport aux carburants à base de pétrole. La projection de coûts nous a permis d'observer qu'à long terme, ces mesures devraient aider ces carburants alternatifs à être viables à la décarbonisation. Cela serait non-seulement grâce au passage à une production « verte » de ces carburants d'ici uniquement 15 ans mais également grâce aux économies d'échelle produites grâce à l'augmentation de leur adoption à long terme. Le potentiel d'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant pour le transport maritime à courte distance pourrait également pousser l'utilisation de ce carburant pour le transport en eaux profondes, garantissant sa viabilité à long terme grâce à son développement continu en eaux courtes à court terme. Pour finir, il serait fort probable de continuer à voir l'utilisation de carburants conventionnels à base de pétrole, mais sous forme de mélange avec les biocarburants, qui continueraient d'être utilisés après le court terme pour des navires à trajets flexibles. Le méthanol serait également toujours utilisé pour la navigation en haute mer selon Mr. Edwards, puisqu'il reste parmi un des carburants les plus rentables, compte tenu de sa disponibilité et de leur compatibilité avec l'infrastructure actuelle.

## 3.2 Shipping en eaux courtes

### 3.2.1 Court et long terme

Pour le transport maritime en eaux courtes, l'ammoniac et plus particulièrement l'hydrogène seraient des solutions viables à court terme. Les navires propulsés à l'hydrogène sont déjà utilisés dans certains contextes, comme les ferries, et pourraient être plus largement adoptés pour les voyages plus courts. Les courts trajets à destinations fixes permettraient aux navires de petites tailles de mettre en place des infrastructures avec un approvisionnement stable en carburants alternatifs, leur permettant de s'avitailer régulièrement entre chaque port. Pour les régions en développement où il serait difficile d'établir des infrastructures stables en approvisionnement de carburants alternatifs, les carburants conventionnels continueront d'être utilisés. Au long terme, Mr. Perez considère que les solutions hybrides ou entièrement alimentées par des batteries serait possiblement utilisé au long terme, suggérant que l'électrification pourrait jouer un rôle majeur dans la décarbonisation du transport à courte distance. Cela est justifié par l'avis de Mr Watts qui affirme qu'il faudrait attendre 15 à 20 ans pour voir la construction de nouveaux navires propulsés à l'électricité. Pour cause, la difficulté actuelle de stocker et générer efficacement de l'électricité à bord d'un navire. Pour finir, il serait également possible de voir les navires propulsés à court terme en carburant conventionnels adopter des moteurs à double combustible, laissant place à une marge de manœuvre selon les régions de navigations.

Tableau 3 : Récapitulatif des carburants utilisés à court et long terme selon le type de navigation

TERME		EAUX	
		Profondes	Courtes
	Court	Carburant conventionnel / GNL / Biocarburant / Méthanol	Carburant conventionnel / Ammoniac / Hydrogène
	Long	Biocarburant / Méthanol / Ammoniac / Hydrogène	Carburant conventionnel / Hydrogène / Batteries

(David Paulo, 2023)

## 4. Conclusion

Actuellement face à la 4<sup>ème</sup> révolution de propulsion, les acteurs de l'industrie maritime doivent réussir une phase de transition pour limiter leurs émissions de gaz à effet de serre dans le futur proche. Accomplir cette transition à 1.4 billions de dollars demande une coopération profonde de toutes les parties prenantes entre elles pour surpasser les barrières et permettre de créer des conditions équitables pour tous les acteurs.

Pour atteindre les objectifs environnementaux, la transition de l'industrie maritime vers des carburants alternatifs non-carbonés est certaine mais complexe dû au niveau d'incertitude qui l'accompagne. Les carburants tels que l'ammoniac ou l'hydrogène sont prometteurs puisqu'ils ne génèrent aucune émission à la combustion. Cependant, ces carburants n'accordent aucun avantage environnemental selon les méthodes de production actuelles à base d'énergies pétrolières, repoussant l'adoption de ces carburants à grande échelle uniquement à long terme.

Avant de se pencher aux carburants à l'horizon 2050, les gouvernements guidés par l'IMO doivent pousser l'industrie maritime vers l'adopter à court terme des carburants accordant des résultats environnementaux satisfaisants, tels que les biocarburants ou le méthanol. En revanche, nous pouvons affirmer que sans l'établissement d'un consensus clair entre les acteurs de l'industrie, l'incertitude continuera de freiner cette transition, préservant la place des énergies pétrolières au long terme.

Pour les armateurs, les défis sont nombreux : les navires responsables de 90% du commerce mondial doivent diminuer leur empreinte carbone tout en assurant l'avitaillement constant en carburants alternatifs de leur navire, peu importe l'emplacement géographique, et en acceptant une augmentation générale des coûts de carburant en vue. Il est donc certain que les sources de propulsions à base d'énergies fossiles resteront dans le mélange de carburant futur dû aux doutes envahissants des parties indécises.

Le développement de nouvelles technologies et/ou instruments économiques ne doivent également pas être négligés. Avec le développement des technologies de capture de carbone, les sources d'énergies fossiles pourraient préserver leur place à long terme, repoussant l'adoption des carburants alternatifs. Cela va de même avec l'utilisation de crédits ETS (Emissions Trading System), un système de quotas qui jouera un rôle clé dans la transition énergétique si instauré de manière efficace.

Pour conclure, la transition énergétique de l'industrie maritime à l'horizon 2050 sera complexe et demandera une coordination politique parfaite. La clé pour cette transition se reposera sur la volonté des organisations, entreprises et gouvernements d'investir dans le développement des technologies de ces carburants alternatifs. La collaboration de ceux-ci permettra d'atteindre notre but final : conserver notre chère planète.

## **4.1 Bilan personnel**

La réalisation de ce travail de Bachelor m'a permis de comprendre la complexité des sujets énergétiques et leur importance majeure dans la société d'aujourd'hui. Avoir pu discuter avec des personnes directement concernées par la problématique énergétique de l'industrie maritime était très enrichissant.

Appréciant les sujets touchant des causes environnementales, c'est un plaisir d'avoir pu tenter de répondre au mieux à cette problématique complexe. Conscient que beaucoup d'autres facettes de la problématique pouvaient être également traitées, je reste tout de même fier à l'idée que le travail produit puisse permettre aux lecteurs de mieux comprendre les enjeux liés à ce sujet. Malgré l'intimidation initiale de traiter un sujet comme celui-ci, la réalisation de mes objectifs et la rédaction du travail final était une tâche gratifiante qui témoigne de mon niveau d'engagement tout au long de mes trois années d'études au sein de la Haute Ecole de Gestion.

## Bibliographie

ALL AMERICAN MARINE, 2022. AAM + SWITCH Maritime Announce the Launch of Sea Change, the World's First Commercial Vessel Powered 100% by Hydrogen Fuel Cells. All American Marine [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.allamericanmarine.com/hydrogen-vessel-launch/> [consulté le 2 juillet 2023].

AMOGY, 2023. Moving the Maritime Industry Closer to Clean Energy, Amogy is Building the World's First Ammonia-Powered, Zero-Emission Ship. Amogy [en ligne]. 6 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://amogy.co/moving-the-maritime-industry-closer-to-clean-energy-amogy-is-building-the-worlds-first-ammonia-powered-zero-emission-ship/> [consulté le 3 avril 2023].

Amount of fuel consumed by ships worldwide by fuel type 2020, [sans date] Statista [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1266963/amount-of-fuel-consumed-by-ships-worldwide-by-fuel-type/> [consulté le 1 juillet 2023].

ASARIOTIS, Regina, 2021. Climate change impacts on seaports: A growing threat to sustainable trade and development | UNCTAD. [en ligne]. 4 juin 2021. Disponible à l'adresse : <https://unctad.org/news/climate-change-impacts-seaports-growing-threat-sustainable-trade-and-development> [consulté le 2 mai 2023].

BACH, Hanna et HANSEN, Teis, 2023. IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy. Marine Policy. Vol. 147, p. 105379. DOI 10.1016/j.marpol.2022.105379.

BALCOMBE, Paul et al., 2019. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. Energy Conversion and Management. Vol. 182, pp. 72-88. DOI 10.1016/j.enconman.2018.12.080.

BARTLETT, Paul, 2023. LNG still the most popular alternative fuel by far. Seatrade Maritime [en ligne]. 4 janvier 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.seatrade-maritime.com/sustainability-green-technology/lng-still-most-popular-alternative-fuel-far> [consulté le 17 février 2023].

DAN RUTHERFORD et MILLER, Josh, 2019. Silent but deadly: The case of shipping emissions. International Council on Clean Transportation [en ligne]. 22 mars 2019. Disponible à l'adresse : <https://theicct.org/silent-but-deadly-the-case-of-shipping-emissions/> [consulté le 3 juillet 2023].

DNV, 2023. FuelEU Maritime. DNV [en ligne]. 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/fuel-eu-maritime/index.html> [consulté le 27 juin 2023].

DOUGLAS SELF, 2023. Ammonia Motors. Douglas Self [en ligne]. 13 mars 2023. Disponible à l'adresse : <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/ammonia/ammonia.htm#del> [consulté le 1 juillet 2023].

EUROPEAN COMMISSION, 2023. Agreement reached on cutting maritime transport emissions. European Commission - European Commission [en ligne]. 23 mars 2023. Disponible à l'adresse : [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1813](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1813) [consulté le 27 avril 2023].

FABER, Jasper, 2021. Fourth IMO GHG Study 2020 Executive-Summary [en ligne]. London : INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. 4. Disponible à l'adresse : <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> [consulté le 6 novembre 2022].

FORETICH, Anthony et al., 2021. Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. Maritime Transport Research. Vol. 2, p. 100033. DOI 10.1016/j.martra.2021.100033.

FURUICHI, Masahiko et OTSUKA, Natsuhiko, 2015. Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal Route. *Maritime Economics & Logistics*. Vol. 17, no 1, pp. 9-31. DOI 10.1057/mel.2014.29.

GETTING TO ZERO COALITION, 2021. Call to Action for Shipping Decarbonization [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/09/Call-to-Action-for-Shipping-Decarbonization.pdf>

GOODFUELS, 2023. NORDEN and Spar Shipping partner up to use GoodFuels sustainable biofuel. GoodFuels [en ligne]. 28 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.goodfuels.com/news/norden-and-spar-shipping-partner-up-to-use-goodfuels-sustainable-biofuel> [consulté le 12 avril 2023].

GRIEG STAR, 2023. GREEN SHIPPING PROGRAM PILOT REPORT: Ammonia powered bulk carrier [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://griegstar.com/wp-content/uploads/2023/02/Ammonia-powered-bulk-carrier-GSP-pilot-report.pdf>

HABIBIC, Ajsa, 2023. WATCH: MF Hydra starts world's first voyage on emission-free liquid hydrogen. Offshore Energy [en ligne]. 31 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.offshore-energy.biz/watch-mf-hydra-starts-worlds-first-voyage-on-emission-free-liquid-hydrogen/> [consulté le 18 avril 2023].

HOOK, Leslie et HUME, Neil, 2022. Will the Ukraine war derail the green energy transition? Financial Times [en ligne]. 8 mars 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.ft.com/content/93eb06ec-ba6c-4ad2-8fae-5b66235632b2> [consulté le 28 avril 2023].

HSIEH, Chia-wen Carmen et FELBY, Claus, 2017. Biofuels for the marine shipping sector [en ligne]. IEA Bioenergy. Disponible à l'adresse : <https://task39.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/37/2013/05/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>

HUANG, Jinjin et al., 2022. Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: A Very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 10, no 12, p. 1969. DOI 10.3390/jmse10121969.

HUIMING, Li, 2021. A Review of Marine Fuel Regulations: First Anniversary of IMO 2020 | Stratas Advisors. [en ligne]. 8 avril 2021. Disponible à l'adresse : <https://stratasadvisors.com/Insights/2021/04082021-Marine-Fuel-Regulations-Specs> [consulté le 2 mai 2023].

IMO, 2022. MEPC 79-7-3 Analysis of fuel options to meet the levels of ambition in the Initial IMO Strategy [en ligne]. IMO. Disponible à l'adresse : <https://fr.scribd.com/document/631807065/MEPC-79-7-3-Analysis-of-fuel-options-to-meet-the-levels-of-ambition-in-the-Initial-IMO-Strategy-on-red-INTERTANKO>

INTERNATIONAL CHAMBER OF SHIPPING, 2020. Catalysing the fourth propulsion revolution [en ligne]. Marisec Publications. Disponible à l'adresse : <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/11/Catalysing-the-fourth-propulsion-revolution.pdf>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Ammonia Technology Roadmap – Analysis [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap> [consulté le 15 mars 2023].

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022. Global Hydrogen Review 2022 [en ligne]. International Energy Agency. Disponible à l'adresse : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

IRENA, 2021. Innovation Outlook: Renewable Methanol [en ligne]. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency. Disponible à l'adresse : [http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA\\_Innovation\\_Renewable\\_Methanol\\_2021.pdf](http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf)

JACOBY, Mitch, 2022. The shipping industry looks for green fuels. Chemical & Engineering News [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : <https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/shipping-industry-looks-green-fuels/100/i8> [consulté le 18 juin 2023].

JØRGEN VILLY FENHANN, 2017. CO2 Emissions from International Shipping [en ligne]. Disponible à l'adresse : [https://unepccc.orhttps://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/158911010/Working\\_Paper\\_4\\_Emissions\\_from\\_Shipping.pdf](https://unepccc.orhttps://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/158911010/Working_Paper_4_Emissions_from_Shipping.pdf) publications/co2-emissions-from-international-shipping/ [consulté le 14 novembre 2022].

KARL, Thomas R. et M. MELILLO, Jerry, 2009. Global climate change impacts in the United States: a state of knowledge report [en ligne]. Cambridge [England] : Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-14407-0. Disponible à l'adresse : <https://www.nrc.gov/docs/ML1006/ML100601201.pdf>

LAURSEN, R., BARCAROLO, D., et PATEL, H., 2022. Potential of Biofuels for Shipping [en ligne]. Lisbon : European Maritime Safety Agency. Disponible à l'adresse : <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html>

LAW, Li Chin, MASTORAKOS, Epaminondas et EVANS, Stephen, 2022. Estimates of the Decarbonization Potential of Alternative Fuels for Shipping as a Function of Vessel Type, Cargo, and Voyage. Energies. Vol. 15, no 20, p. 7468. DOI 10.3390/en15207468.

LEONHARDT, Jean-Marc, 2022. Décarbonation de l'industrie : le joker Hydrogène. . pp. 113-118,172,179.

LLOYD'S REGISTER, 2023. EU carbon pricing brings new pressures – and new plays – to maritime. Lloyd's Register [en ligne]. 29 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.lr.org/en/latest-news/eu-carbon-pricing-brings-new-pressures-and-new-plays-to-maritime/> [consulté le 27 avril 2023].

LOGISTICS, DIVISION ON TECHNOLOGY AND UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2021. REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2021 [en ligne]. S.I. : UNITED NATIONS. ISBN 978-92-1-113026-3. Disponible à l'adresse : [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021\\_en\\_0.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf)

MAERSK, 2022. A.P. Moller - Maersk and SunGas Renewables sign strategic green methanol partnership. Maersk [en ligne]. 15 décembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.maersk.com/news/articles/2022/12/15/maersk-and-sungas-renewables-sign-strategic-green-methanol-partnership> [consulté le 3 juillet 2023].

MÆRSK MC-KINNEY MØLLER CENTER, 2022. The role of onboard carbon capture in maritime decarbonization [en ligne]. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS). Disponible à l'adresse : <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/publications/The-role-of-onboard-carbon-capture-in-maritime-decarbonization.pdf>

MÆRSK MC-KINNEY MØLLER CENTER FOR ZERO CARBON SHIPPING, 2022. READY, SET, DECARBONIZE! ARE SHIPOWNERS COMMITTED TO A NET ZERO FUTURE. .

MAN ENERGY SOLUTIONS, 2023. Methanol in shipping [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q2-2023/Download/methanol-in-shipping/d8358bd6-c66e-4dce-8656-4237259c5338/Methanol-Paper-SF>



MANDRA, Jasmina Ovcina, 2023. CMA CGM: 32 vessels are running on B30 biofuels. Offshore Energy [en ligne]. 21 février 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.offshore-energy.biz/cma-cgm-32-vessels-are-running-on-b30-biofuels/> [consulté le 12 avril 2023].

MAO, Xiaoli et RUTHERFORD, Dan, 2022. EXPORTING EMISSIONS: MARINE FUEL SALES AT THE PORT OF SINGAPORE [en ligne]. Disponible à l'adresse : [https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/Singapore-exporting\\_FINAL.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/Singapore-exporting_FINAL.pdf)

MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE, 2021. MEPC 77-6-1 - 2020 report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS [en ligne]. IMO. Disponible à l'adresse : <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2077-6-1%20-%202020%20report%20of%20fuel%20oil%20consumption%20data%20submitted%20to%20the%20IMO%20Ship%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Database%20in%20GISIS.pdf>

MARINE INSIGHT, 2023. China's First Hydrogen Fuel Cell Powered Boat "Three Gorges Hydrogen Boat No. 1" Successfully Launched in Guangdong. Marine Insight [en ligne]. 29 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.marineinsight.com/shipping-news/chinas-first-hydrogen-fuel-cell-powered-boat-three-gorges-hydrogen-boat-no-1-successfully-launched-in-guangdong/> [consulté le 18 avril 2023].

MCKINLAY, Charles J., TURNOCK, Stephen R. et HUDSON, Dominic A., 2021. Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 46, no 55, pp. 28282-28297. DOI 10.1016/j.ijhydene.2021.06.066.

METHANEX CORPORATION, 2021. Waterfront Shipping takes leadership role in demonstrating simplicity of methanol bunkering to marine industry. Methanex [en ligne]. 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.methanex.com/news/release/waterfront-shipping-takes-leadership-role-in-demonstrating-simplicity-of-methanol-bunkering-to-marine-industry/> [consulté le 17 avril 2023].

MING, Dr Liu et CHEN, Mr Li, 2021. Methanol as a Marine Fuel [en ligne]. Singapore : Maritime Energy and Sustainable Development (MESD) Centre of Excellence. Disponible à l'adresse : <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/SG-NTU-methanol-marine-report-Jan-2021-1.pdf>

MONIOS, Jason et WILMSMEIER, Gordon, 2020. Deep adaptation to climate change in the maritime transport sector – a new paradigm for maritime economics? Maritime Policy & Management. Vol. 47, no 7, pp. 853-872. DOI 10.1080/03088839.2020.1752947.

MONIQUE B. VERMEIRE, 2021. Everything You Need To Know About Marine Fuels [en ligne]. Chevron Marine Products. Disponible à l'adresse : [https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron\\_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels\\_v8-21\\_DESKTOP.pdf](https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels_v8-21_DESKTOP.pdf)

MURPHY, JOSEPH, 2022. Record orders for LNG-fuelled ships seen in 2022. [en ligne]. 6 octobre 2022. Disponible à l'adresse : <https://gaspathways.com/record-orders-for-lng-fuelled-ships-seen-in-2022-1293> [consulté le 17 février 2023].

NEPOMUCENO DE OLIVEIRA, Maurício Aguilar, SZKLO, Alexandre et CASTELO BRANCO, David Alves, 2022. Implementation of Maritime Transport Mitigation Measures according to their marginal abatement costs and their mitigation potentials. Energy Policy. Vol. 160, p. 112699. DOI 10.1016/j.enpol.2021.112699.

OTTMAR EDENHOFER, RAMÓN PICHS-MADRUGA, et YOUNG SOKONA, 2012. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [en ligne]. Cambridge : Cambridge University Press. Disponible à l'adresse : [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN\\_Full\\_Report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf) [consulté le 6 avril 2023].

PARKES, Rachel, 2022. DNV rules out pure hydrogen as a future long-distance shipping fuel. Recharge | Latest renewable energy news [en ligne]. 8 septembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.rechargenews.com/energy-transition/dnv-rules-out-pure-hydrogen-as-a-future-long-distance-shipping-fuel/2-1-1292932> [consulté le 2 juillet 2023].

PONCIN, JEAN-LUC, 2023. Fuite d'hydrogène sur le Suiso Frontier : des mesures de sécurité revues à la hausse. H2 mobile [en ligne]. 8 février 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.h2-mobile.fr/actus/fuite-hydrogene-suiso-frontier-securite-revue-hausse/> [consulté le 18 avril 2023].

PREVLJAK, Naida Hakirevic, 2022. World's first ammonia-ready vessel delivered. Offshore Energy [en ligne]. 4 février 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.offshore-energy.biz/worlds-first-ammonia-ready-vessel-delivered/> [consulté le 3 avril 2023].

R, Laursen, D, Barcarolo et H, Patel, 2022. Potential of Ammonia as fuel in Shipping [en ligne]. Lisbon : European Maritime Safety Agency. Disponible à l'adresse : <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/download/7322/4833/23.html>

SACHGAU, Oliver, 2022. Can methane slip be controlled. MAN Energy Solutions [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.man-es.com/discover/can-methane-slip-be-controlled> [consulté le 17 février 2023].

SARAOGI, Varsha, 2020. Decarbonising the maritime industry will cost \$1tn, study says. Ship Technology [en ligne]. 20 janvier 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.ship-technology.com/news/decarbonisation-in-shipping/> [consulté le 20 février 2023].

SOLAKIVI, Tomi, PAIMANDER, Aleksu et OJALA, Lauri, 2022. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 113, p. 19. DOI 10.1016/j.trd.2022.103500.

STOPFORD, Martin, 2008. Maritime Economics. 3rd edition. Routledge Bo.

TAKAHIRO, 2021. History and Transition of Marine Fuel. Mitsui O.S.K. Lines. [en ligne]. 7 août 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.mol-service.com/blog/transition-in-ships-fuel> [consulté le 8 février 2023].

THE MARITIME EXECUTIVE, 2023. Record Number of Methanol-Fueled Ships Ordered Reports DNV. The Maritime Executive [en ligne]. 3 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://maritime-executive.com/article/record-number-of-methanol-fueled-ships-ordered-reports-dnv> [consulté le 16 avril 2023].

THE ROYAL SOCIETY, 2020. Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store [en ligne]. London : The Royal Society. Disponible à l'adresse : <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf> [consulté le 3 avril 2023].

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2023. Alternative Fuels Data Center: Methanol. U.S. Department of Energy [en ligne]. 2023. Disponible à l'adresse : [https://afdc.energy.gov/fuels/emerging\\_methanol.html](https://afdc.energy.gov/fuels/emerging_methanol.html) [consulté le 2 juillet 2023].

US EPA, 2020. Marine Vessel Speed Reduction Reduces Air Emissions and Fuel Usage. US EPA [en ligne]. 19 août 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.epa.gov/ports-initiative/marine-vessel-speed-reduction-reduces-air-emissions-and-fuel-usage> [consulté le 3 juillet 2023].

VIGNES, Jean-Louis, 2023. Ammoniac. L'Élémentarium [en ligne]. 2023. Disponible à l'adresse : <https://lelementarium.fr/product/ammoniac/> [consulté le 13 mars 2023].

VINEYARD, Jared, 2020. The First IMO 2020 Violation Goes to MSC. Universal Cargo [en ligne]. 26 mars 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.universalcargo.com/the-first-imo-2020-violation-goes-to-msc/> [consulté le 24 avril 2023].

WANG, Yifan et WRIGHT, Laurence A., 2021. A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. World. Vol. 2, no 4, pp. 456-481. DOI 10.3390/world2040029.

WORLD ECONOMIC FORUM, 2022. Net-Zero Industry Tracker [en ligne]. Genève. Disponible à l'adresse : [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_NetZero\\_Industry\\_Tracker\\_2022\\_Edition.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_NetZero_Industry_Tracker_2022_Edition.pdf)

# Annexe 1 : Tableaux détaillés des coûts de voyage

Tableau détaillé des coûts de voyage pour une vitesse de croisière de 14 nœuds

14835 Gt d'IFO 11.5 jours de voyage	Valeur de navire	MT de carburant utilisé	Prix par MT de carburant	Operating costs					Voyage costs			Capital costs		Emissions		\$/tCO2 (/jours/tau)			
				Coûts de main-d'œuvre	Provisions et lubrifiants	Réparations et entretien	Assurance	Frais généraux	Combustible	Coûts portuaires	Droits de canal	Frais de manutention	Intérêts et dividendes	(Remboursement de la dette)	tCO2/tonne de combustible respectif	t de CO2 produites	\$100,00	\$200,00	\$400,00
IFO	\$30 000 000,00	345	\$450,00	\$2 901,25	\$730,75	\$996,00	\$420,25	\$1 052,75	\$13 500,00	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$1 579,86	\$4 861,11	3,20	1104,00	\$9 600,00	\$19 200,00	\$38 400,00
LNG	\$40 000 000,00	274,72	\$460,00	\$3 481,50	\$876,90	\$1 195,20	\$504,30	\$1 263,30	\$10 988,89	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$2 106,48	\$6 481,48	2,70	741,75	\$6 450,00	\$12 900,00	\$25 800,00
Biofuel (B30)	\$30 000 000,00	241,5 et 120,3	\$450 et \$1000	\$2 901,25	\$730,75	\$996,00	\$420,25	\$1 052,75	\$19 910,00	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$1 579,86	\$4 861,11	3,20 et 1,92	1003,76	\$8 728,32	\$17 456,64	\$34 913,28
Hydrogen	\$80 000 000,00	123,625	\$2 500,00	\$2 901,25	\$730,75	\$1 713,89	\$420,25	\$1 052,75	\$26 875,00	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$4 212,96	\$12 962,96	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Ammonia	\$48 000 000,00	680	\$2 100,00	\$2 901,25	\$730,75	\$1 713,89	\$420,25	\$1 052,75	\$120 400,00	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$2 527,78	\$7 777,78	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00

Tableau détaillé des coûts de voyage pour une vitesse de croisière de 11 nœuds

12470 Gt d'IFO 14,5 jours de voyage	Valeur de navire	MT de carburant utilisé	Prix par MT de carburant	Operating costs				Voyage costs				Capital costs		Emissions		\$/tCO2 (/joursal'eau)			
				Coûts de main-d'œuvre	Provisions et lubrifiants	Réparations et entretien	Assurance	Frais généraux	Combustible	Coûts portuaires	Droits de canal	Frais de manutention	Intérêts et dividendes	(Remboursement de la dette)	tCO2/tonne de combustible respectif	t of CO2 produced	\$100,00	\$200,00	\$400,00
IFO	\$30 000 000,00	290	\$450,00	\$2 901,25	\$730,75	\$996,00	\$420,25	\$1 052,75	\$9 000,00	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$1 579,86	\$4 861,11	3,20	928,00	\$6 400,00	\$12 800,00	\$25 600,00
LNG	\$40 000 000,00	230,93	\$460,00	\$3 481,50	\$876,90	\$1 195,20	\$504,30	\$1 263,30	\$7 325,93	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$2 106,48	\$6 481,48	2,70	623,50	\$4 300,00	\$8 600,00	\$17 200,00
Biofuel (B30)	\$30 000 000,00	203 et 101,1	\$450 et \$1000	\$2 901,25	\$730,75	\$996,00	\$420,25	\$1 052,75	\$13 921,62	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$1 579,86	\$4 861,11	3,20 et 1,92	843,73	\$5 818,82	\$11 637,65	\$23 275,29
Hydrogen	\$80 000 000,00	103,92	\$2 500,00	\$2 901,25	\$730,75	\$1 713,89	\$420,25	\$1 052,75	\$17 916,67	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$4 212,96	\$12 962,96	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Ammonia	\$48 000 000,00	471	\$2 100,00	\$2 901,25	\$730,75	\$1 713,89	\$420,25	\$1 052,75	\$80 266,67	\$3 000,00	\$3 000,00	\$10 000,00	\$2 527,78	\$7 777,78	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00

## Sources utilisées pour les carburants respectifs :

### Carburant conventionnel :

- <https://www.moore-greece.gr/MediaLibsAndFiles/media/greeceweb.moorestephens.com2020/Documents/Insights/mmi/MMI-Shipping-Trends-Based-on-Fleet-Size-2021.pdf>
- <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/indicative-shipping-fuel-cost-ranges>
- <https://maritimepage.com/supramax-bulk-carriers/>

### GNL :

- <https://splash247.com/lng-bunker-costs-now-competitive/>
- [https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/190123\\_SEA-LNG\\_InvestmentCase\\_DESIGN\\_FINAL.pdf](https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/190123_SEA-LNG_InvestmentCase_DESIGN_FINAL.pdf)
- <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/carbon-neutral-lng-market-creating-framework-real-emissions-reductions/#:~:text=Figure%201%3A%20Carbon%20intensity%20of%20the%20LNG%20supply%20chain&text=For%20example%2C%20when%20combusted%2C%20natural,2.76%20metric%20tons%20of%20CO2e>

### Biocarburant (B30) :

- <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/carbon-neutral-lng-market-creating-framework-real-emissions-reductions/#:~:text=Figure%201%3A%20Carbon%20intensity%20of%20the%20LNG%20supply%20chain&text=For%20example%2C%20when%20combusted%2C%20natural,2.76%20metric%20tons%20of%20CO2e>
- <https://www.neste.com/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame#6767f246>

### Hydrogène :

- <https://maritime-executive.com/article/construction-milestone-for-first-hydrogen-powered-inland-cargo-ship>
- <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/10/f68/fcto-h2-at-ports-workshop-2019-viii5-ahluwalia.pdf>

### Ammoniac :

- <https://griegstar.com/wp-content/uploads/2023/02/Ammonia-powered-bulk-carrier-GSP-pilot-report.pdf>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920922003261>

Annexe 2 : Tableaux finals d'estimations des coûts de voyage

Tableau final des coûts de voyage totaux actuels

	Vessel Value	Capital Costs	Total Operating Costs	Speed (nm)	Voyage Costs	(Debt repay.)	Sub Total	+\$100/tCO2	+\$200/tCO2	+\$400/tCO2	Total (100)	Total (200)	Total (400)
Carburant conventionnel	\$30 000 000,00	\$1 579,86	\$6 101,00	11	\$25 000,00	\$4 861,11	\$32 680,86	\$6 400,00	\$12 800,00	\$25 600,00	\$39 080,86	\$45 480,86	\$58 280,86
				14	\$29 500,00	\$4 861,11	\$37 180,86	\$9 600,00	\$19 200,00	\$38 400,00	\$46 780,86	\$56 380,86	\$75 580,86
GNL	\$40 000 000,00	\$2 106,48	\$7 321,20	11	\$23 325,93	\$6 481,48	\$32 753,61	\$4 300,00	\$8 600,00	\$17 200,00	\$37 053,61	\$41 353,61	\$49 953,61
				14	\$26 988,89	\$6 481,48	\$36 416,57	\$6 450,00	\$12 900,00	\$25 800,00	\$42 866,57	\$49 316,57	\$62 216,57
Biocarburant (B30)	\$30 000 000,00	\$1 579,86	\$6 101,00	11	\$29 921,62	\$4 861,11	\$37 602,48	\$5 818,82	\$11 637,65	\$23 275,29	\$43 421,31	\$49 240,13	\$60 877,77
				14	\$35 910,00	\$4 861,11	\$43 590,86	\$8 728,32	\$17 456,64	\$34 913,28	\$52 319,18	\$61 047,50	\$78 504,14
Hydrogène	\$80 000 000,00	\$4 212,96	\$6 818,89	11	\$33 916,67	\$12 962,96	\$44 948,52	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$44 948,52	\$44 948,52	\$44 948,52
				14	\$42 875,00	\$12 962,96	\$54 728,77	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$54 728,77	\$54 728,77	\$54 728,77
Ammoniac	\$48 000 000,00	\$2 527,78	\$6 818,89	11	\$96 266,67	\$7 777,78	\$105 613,33	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$105 613,33	\$105 613,33	\$105 613,33
				14	\$136 400,00	\$7 366,82	\$153 935,40	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$153 935,40	\$153 935,40	\$153 935,40

Tableau final des coûts de voyage totaux, avec projection des prix de combustibles jusqu'en 2050, toutes choses égales par ailleurs

	Vessel Value	Capital Costs	Total Operating Costs	Speed (nm)	+\$100/tCO2	Total Costs	Tot. Costs FC2023	Tot. Costs FC2026	Tot. Costs FC2029	Tot. Costs FC2032	Tot. Costs FC2035	Tot. Costs FC2038	Tot. Costs FC2041	Tot. Costs FC2044	Tot. Costs FC2047	Tot. Costs FC2050
Carburant conv.	\$30 000 000,00	\$1 579,86	\$6 101,00	11	\$6 400,00	\$39 080,86	\$34 680,86	\$38 680,86	\$38 280,86	\$38 480,86	\$38 880,86	\$39 080,86	\$39 280,86	\$39 480,86	\$39 680,86	\$39 880,86
				14	\$9 600,00	\$46 780,86	\$40 180,86	\$46 180,86	\$45 580,86	\$45 880,86	\$46 480,86	\$46 780,86	\$47 080,86	\$47 380,86	\$47 680,86	\$47 980,86
GNL	\$40 000 000,00	\$2 106,48	\$7 321,20	11	\$4 300,00	\$37 053,61	\$33 672,68	\$33 477,68	\$33 155,68	\$33 316,68	\$33 477,68	\$33 638,68	\$33 799,68	\$33 960,68	\$34 121,68	\$34 282,68
				14	\$6 450,00	\$42 866,57	\$36 295,18	\$37 502,68	\$37 019,68	\$37 261,18	\$37 502,68	\$37 744,18	\$37 985,68	\$38 227,18	\$38 468,68	\$38 710,18
Biocarburant (B30)	\$30 000 000,00	\$1 579,86	\$6 101,00	11	\$5 818,82	\$43 421,31	\$39 051,20	\$42 897,15	\$43 663,11	\$44 151,76	\$44 570,68	\$44 850,14	\$45 129,60	\$45 255,66	\$45 381,71	\$45 507,77
				14	\$8 728,32	\$52 319,18	\$46 796,86	\$52 505,86	\$53 654,86	\$54 387,86	\$55 016,26	\$55 435,46	\$55 854,66	\$56 043,74	\$56 232,82	\$56 421,90
Hydrogène	\$80 000 000,00	\$4 212,96	\$6 818,89	11	\$0,00	\$44 948,52	\$44 476,85	\$43 430,15	\$42 383,45	\$40 987,85	\$38 455,55	\$36 103,25	\$34 558,75	\$33 312,05	\$32 614,25	\$31 916,45
				14	\$0,00	\$53 806,85	\$53 199,35	\$51 628,30	\$50 059,25	\$47 965,85	\$44 302,40	\$40 638,95	\$38 022,20	\$36 452,15	\$35 405,45	\$34 358,75
Ammoniac	\$48 000 000,00	\$4 212,96	\$6 818,89	11	\$0,00	\$107 288,52	\$105 185,45	\$99 603,05	\$94 020,65	\$88 438,25	\$80 995,05	\$73 551,85	\$64 247,85	\$61 270,57	\$58 293,29	\$54 943,85
				14	\$0,00	\$147 431,85	\$144 282,25	\$135 888,85	\$127 515,05	\$119 141,45	\$107 976,65	\$96 811,85	\$82 855,85	\$78 389,93	\$73 924,01	\$68 899,85

## Annexe 3 : Tableaux de données utilisés pour la projection de prix des carburants pour les coûts de voyage

	CALCULS "TOE"		Fioul utilisé	
	Energy density (GJ/tonne)	TOE	345 FO	290 FO
Crude Oil	41,868	1,00	335,92	282,37
Fuel Oil	43	1,03	345,00	290,00
LNG	54	1,24	277,72	233,45
Biofuel	37	0,86	401,16	337,21
Hydrogen	120	2,87	120,37	101,18
Ammonia	22,5	0,54	641,98	539,63

Voici les sources utilisées pour les valeurs de densités énergétiques :

- [https://w.astro.berkeley.edu/~wright/fuel\\_energy.html](https://w.astro.berkeley.edu/~wright/fuel_energy.html)
- <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-energy/combustibles-energy-content/>

	Prévisions prix fioul "TOE"									
	2023	2026	2029	2032	2035	2038	2041	2044	2047	2050
Crude Oil										
Fuel Oil	550	750	730	740	750	760	770	780	790	800
LNG	450	500	480	490	500	510	520	530	540	550
Biofuel	1100	1250	1400	1450	1490	1510	1530	1528	1526	1524
Hydrogen	2500	2350	2200	2000	1650	1300	1050	900	800	700
Ammonia	2100	1950	1800	1650	1450	1250	1000	920	840	750

Les prix utilisés dans ce tableau proviennent de la prévisions de prix établis dans l'étude suivante :

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920922003261>

## Annexe 4 : Entretien avec Mr. Rustin Edwards – Head of Fuel Oil Procurement (Euronav NV)

- Selon vous, quels carburants alternatifs (biocarburants, méthanol, hydrogène, ammoniac, carburants électriques) OU technologies contribueront de manière rentable aux efforts de décarbonisation à court et à long terme ? Lesquelles ne le seront pas ?

Il y a beaucoup de choses qui peuvent être faites pour aider à réduire les émissions, car quand on parle de décarbonisation ou de réduction des émissions, il y a beaucoup de choses qui peuvent être faites avec les technologies actuelles. De nombreuses entreprises les intègrent pour réduire leur profil d'émissions. Par exemple, la réduction de vitesse. Au lieu d'avoir une vitesse de croisière de 13 nœuds, vous pouvez aller à 10 nœuds et lorsque vous faites cela, vous réduisez votre consommation de carburant sur une base exponentielle, et vous n'avez pas d'opérations inefficaces dans le moteur. Il faut également changer l'ensemble du revêtement. Il s'agit de réduire le frottement sur l'eau et la croissance de la vie marine sur la coque du navire. Ce sont des mesures qui devraient être incorporées régulièrement pour obtenir le meilleur rendement énergétique. C'est ce qui est fait aujourd'hui. En ce qui concerne les carburants alternatifs, nous savons que le carburant le plus rentable qui a une capacité suffisante est le biocarburant. À l'heure actuelle, il s'agit bien sûr des biocarburants parce qu'il existe déjà sur le marché, il est facilement disponible partout et le passage d'un carburant à base de pétrole à un biocarburant se fait sans problème, le moteur fonctionnera très bien avec l'un ou l'autre. Lorsque l'on aborde les carburants secondaires, les biocarburants tels que le méthanol, et l'ammoniac. Je suis personnellement partisan du méthanol en tant que carburant secondaire, simplement parce qu'il s'agit là encore d'une technologie connue. C'est un carburant connu. Il a des caractéristiques de manipulation connues et ne nécessite pas autant de changement dans le flux logistique global de l'approvisionnement en carburant car il peut utiliser la même infrastructure ou l'existant pour effectuer les livraisons. Il ne s'agit pas d'un changement individuel où le biodiesel peut utiliser l'infrastructure actuelle, comme c'est le cas pour le méthanol, vous devez changer l'infrastructure de manière à ce qu'elle puisse le gérer. L'alcool par rapport à un carburant de type distillat. L'ammoniac est une technologie intéressante, mais il n'y a pas encore de moteur. L'ammoniac est largement disponible sur le marché, mais il s'agit d'ammoniac gris. Il faudra beaucoup d'investissements, beaucoup de technologie. Il faudra de l'hydrogène, tout comme l'E-méthanol, qui nécessite de nouvelles sources d'hydrogène qui n'existent pas encore. Je pense que l'hydrogène est le carburant le moins efficace pour la décarbonisation parce qu'il est cher à produire et c'est vraiment inefficace, du moins dans la technologie actuelle dont nous disposons aujourd'hui. Il est très inefficace lorsqu'il s'agit de le transférer dans une source d'énergie pour déplacer des navires. La manipulation de l'hydrogène, parce qu'il s'agit d'une si petite molécule, nécessite beaucoup de manipulations différentes. La densité énergétique est toujours une préoccupation majeure, car quelle quantité d'hydrogène devrez-vous consommer ou stocker pour obtenir la même puissance que celle dont vous disposez actuellement ? Je veux dire que c'est la même chose avec l'ammoniac et le méthanol. Le biodiesel est celui qui se rapproche le plus de la densité énergétique actuelle. Le méthanol, c'est deux pour un. Il faut donc brûler deux fois plus pour obtenir la même



énergie. L'ammoniac est à deux pour un et l'hydrogène à cinq pour un. À court terme, il s'agit donc plutôt d'optimisation. Il y a encore beaucoup d'optimisations possibles qui permettront de réduire la consommation de carburant. Le méthanol ou l'ammoniac à long terme. Je pense qu'il sera difficile d'obtenir de l'hydrogène pur et simple. Je pense également que toutes les solutions techniques actuelles, telles que les épurateurs électrostatiques, sont des technologies intéressantes, mais qu'il faut gérer les déchets, ce qui pourrait poser un problème.

- Quels carburants ou quelles avancées technologiques, en termes de décarbonisation du transport maritime, seraient techniquement et économiquement les plus adaptés au transport maritime en eaux profondes ?

Beaucoup de choses seraient technologiquement ou économiquement adaptées. Encore une fois, on revient au biodiesel et au méthanol en tant que carburants qui seraient économiquement appropriés. Le biodiesel parce qu'il n'occupe pas d'espace différent. Il peut être utilisé dans l'empreinte énergétique actuelle des navires. Il n'y a donc pas de problème. Il faut plus d'espace pour que le méthanol puisse brûler, ce qui signifie qu'il faut renoncer à la capacité de chargement pour le carburant. Mais c'est le même problème pour l'hydrogène ou l'ammoniac. Je pense qu'ils conviennent à la navigation en haute mer et aussi, bien sûr, à toute autre optimisation obtenue grâce à une meilleure efficacité énergétique. Tout cela doit être pris en compte.

- Dans le contexte du transport maritime à courte distance, qui implique des navires plus petits, quelle serait l'une des stratégies de décarbonisation des carburants les plus efficaces, et en quoi serait-elle différente de celles employées pour le transport maritime en haute mer ?

Il y a eu des progrès dans l'utilisation du méthanol pour la navigation à courte distance. Mais je pense qu'il y a également eu une plus grande adaptation aux navires électriques, à l'alimentation par batterie électrique. Je pense que c'est quelque chose qui va être intéressant aussi, parce que si vous êtes une entreprise de ferry, il est très concevable que vous puissiez faire fonctionner le navire avec un navire électrique, que vous pouvez brancher des deux côtés et le maintenir chargé. En outre, l'hydrogène est beaucoup plus efficace dans un navire de courte distance que dans un navire de haute mer, car, là encore, vous pouvez mettre suffisamment de carburant pour aller du point A au point B et vous pouvez recharger votre cellule d'hydrogène et repartir. En outre, je pense qu'avec le transport maritime à courte distance, l'idée des épurateurs électrostatiques peut mieux fonctionner parce que vous êtes près de la côte où vous pouvez simplement vous débarrasser des déchets lors du déchargement ou du chargement de la cargaison.

- Comment les différences ou les disparités régionales dans la disponibilité des carburants de substitution dans les ports peuvent-elles influencer sur la faisabilité de leur adoption par la flotte maritime mondiale ?

C'est une question très intéressante parce que vous voyez déjà cela dans le biodiesel, par exemple, en Extrême-Orient, vous avez une offre prédominante d'huile de palme, POME, huile de palme, ester méthylique ou fluide méthylique, et l'UE ne reconnaît pas cela. Il s'agit de biodiesel. Vous pouvez

donc acheter du biodiesel en Asie, qui n'est pas reconnue comme une source d'énergie renouvelable en Europe. Il en va de même aux États-Unis, où la production de biodiesel d'origine agricole est très importante et n'est pas reconnue par l'UE. Il y a déjà un développement basé sur la source titulaire de votre biodiesel par rapport à la réglementation extérieure, à laquelle vous devez vous conformer lorsque vous arrivez dans un autre pays, ce qui aura un impact sur la faisabilité de l'adoption. C'est l'un des problèmes que l'on rencontre avec certains de ces nouveaux carburants : les règles de l'UE sont très strictes quant à ce que l'on peut utiliser ou à ce qui est qualifié de biodiesel. On se retrouve donc avec un carburant qui n'en fait pas partie et qui ne remplit pas les conditions requises. Il y a beaucoup d'ammoniac et de méthanol dans le monde aujourd'hui, mais il s'agit de méthanol gris ou d'ammoniac gris. Il y a très peu de méthanol vert ou d'ammoniac vert disponible parce que les installations pour fabriquer la quantité de carburant nécessaire à la flotte n'existent pas, il faut donc les construire. Le plus gros problème que je rencontre avec ces e-fuels est de savoir où l'on va trouver l'hydrogène. Il faut beaucoup d'hydrogène pour fabriquer ces carburants et produire de l'hydrogène vert, ce qui signifie qu'il faut beaucoup de capacité électrique pour y parvenir.

- En ce qui concerne le système d'échange de quotas d'émissions (EU ETS), comment une telle mesure pourrait-elle influencer l'adoption de carburants alternatifs dans la future combinaison de carburants de la flotte de transport maritime ?

Il pourrait être efficace, mais il doit être tarifé en conséquence pour être efficace. Si l'on prend le prix actuel de l'EU ETS et le prix actuel du biodiesel, par exemple, il est préférable de brûler du pétrole normal et d'acheter le crédit carbone plutôt que d'acheter le biocarburant. Il faut que le prix du carbone dépasse 120 dollars la tonne. Dans le contexte actuel de crise, le fait qu'un expéditeur opte pour un biocarburant plutôt que pour un prix est une question importante qui va influencer les décisions. Et cette tarification doit être prise en compte. Il ne peut pas s'agir d'une simple hausse d'un jour, il faut qu'elle atteigne 120 dollars constamment. L'autre élément qui sera intéressant, c'est la mise en place par d'autres pays de leur propre système d'échange de quotas d'émissions. Quel est l'impact sur les comportements des compagnies maritimes ? En effet, elles reflètent toutes le type de règles que vous avez, et vous n'avez pas de règles différentes dans les différents pays. Vous devez réfléchir à ce qui pourrait arriver et l'autre chose à propos de l'adoption de votre futur carburant fait que non seulement l'ETS de l'UE, mais vous avez aussi les règles de l'UE sur les carburants. En effet, le système d'échange de quotas d'émissions s'applique aux sillages, tandis que l'UE sur les carburants s'applique aux sillages, de sorte qu'ils ne se couvrent pas l'un pour l'autre. Vous devez donc toujours effectuer votre analyse non seulement dans le cadre du règlement A, mais aussi dans celui du règlement BC&D, ce qui pourrait modifier votre situation d'achat. Par exemple, dans le cadre du programme européen sur les carburants. Il serait préférable d'acheter un biocarburant aux prix actuels tout en achetant le crédit carbone, car c'est moins cher que la pénalité que j'aurais à payer dans le cadre du programme de l'UE sur les carburants.

- Peut-on parvenir à la décarbonisation sans une législation claire, et comment l'IMO peut-elle trouver un équilibre entre la création de conditions équitables et la promotion de l'adoption

rapide de nouveaux carburants et de nouvelles technologies qui contribuent à la décarbonisation du transport maritime ?

Je pense qu'il faut une législation alignée de sorte que tous les pays soient sur la même longueur d'onde. La pire chose qui puisse arriver, c'est que 140 pays fassent partie de l'IMO et qu'ils aient chacun leur propre règle, et qu'en tant que compagnie maritime, vous deviez vous demander comment résoudre ce problème. Je pense que l'OMI peut faire beaucoup pour dicter le type de carburant que l'on peut brûler sur un navire car ce que l'OMI ne peut pas faire, c'est taxer. Ainsi, l'instauration d'une taxe carbone ou d'une surtaxe sur les combustibles de soute n'est pas du ressort de l'IMO. C'est aux États et aux juridictions de proposer ce que l'IMO ne peut pas faire. Elle peut toutefois établir un ensemble de règles stipulant qu'à telle date, vos émissions doivent être réduites de X et à telle date, et c'est ensuite aux individus de trouver le moyen d'y parvenir. C'est là que l'IMO a sa compétence et son pouvoir, mais il faut une législation claire que tout le monde peut lire et comprendre ce qu'il doit faire, et il faut que ce soit durable. Il ne faut pas que des entreprises fassent faillite, parce qu'une société comme Maersk peut se permettre des essais fantaisistes, alors qu'une personne qui ne possède que deux ou trois navires ne peut pas se le permettre. Il faut donc tenir compte du fait que toutes les entreprises n'ont pas le même bilan que Maersk.

- Selon vous, dans quelle mesure est-il possible de réussir la décarbonisation du transport maritime sans restructurer les flux commerciaux mondiaux (plus locaux), compte tenu de la dépendance actuelle à l'égard des réseaux commerciaux étendus et à longue distance ?

Les flux commerciaux se produiront en fonction de l'endroit où les biens sont produits et où les biens sont demandés, et pour que les flux commerciaux s'ajustent en raison de la décarbonisation, je ne pense pas que cela entraînera un changement dans la façon dont les biens se déplacent et où les biens sont acheminés. Le coût par unité de production jouera un rôle dans tout cela. Regardez les règles actuelles de décarbonisation et le prix actuel du carbone. Lorsque l'on intègre ces coûts supplémentaires dans le coût unitaire des marchandises, cela n'a pas vraiment d'impact sur les flux commerciaux, car l'impact sur le coût global du voyage n'est pas si important. Je pense qu'il faut également se pencher sur la question de savoir comment certifier que la molécule que l'on reçoit est une molécule verte, car il est impossible de prendre une bouteille d'ammoniac produite par une raffinerie de pétrole et une bouteille d'ammoniac produite par une usine verte et de dire qu'il s'agit d'une usine verte et qu'il s'agit d'une usine de production de pétrole. C'est impossible. Il en va de même pour le méthanol.

## **Annexe 5 : Entretien avec Mr. Alberto Perez – Head of Commercial Maritime Market (Lloyd’s Register)**

- Selon vous, quels carburants alternatifs (biocarburants, méthanol, hydrogène, ammoniac, carburants électriques) OU technologies contribueront de manière rentable aux efforts de décarbonisation à court et à long terme ? Lesquelles ne le seront pas ?

Je ne veux pas vraiment choisir un gagnant. Personnellement, je pense que nous assisterons très probablement à une augmentation considérable de l'utilisation des dispositifs d'économie d'énergie ou des technologies d'efficacité énergétique, ou nous les utiliserons ainsi à court terme. Ainsi, je suppose que vous rendez les navires plus efficaces, ce qui vous permet d'acheter moins de carburant. Nous commencerons à voir l'adoption des biocarburants considérablement à très court terme, je prévois probablement vers la fin de cette année et surtout au début de l'année prochaine, nous verrons certainement une augmentation des biocarburants. Ensuite, à moyen terme, nous commencerons à voir quelque chose de proche dans l'utilisation des carburants synthétiques, mais il faudra un peu de temps pour lancer la production, puis au cours des 20 prochaines années, nous commencerons à voir comment tous les navires sont construits et adopteront peu à peu de nouveaux carburants, mais je ne veux pas vraiment choisir un vainqueur. Je pense que nous verrons probablement une combinaison de carburants. Nous verrons certainement du e-méthanol, nous verrons à un moment donné de l'ammoniac et de l'hydrogène dans certains cas, bien que l'hydrogène présente certains défis en tant que carburant en raison de sa faible densité énergétique volumétrique, mais je ne pense pas qu'il sera extrêmement nécessaire et nous verrons probablement un passage du GNL fossile au bio-GNL et à l'e-GNL. Je pense donc que nous continuerons à voir du GNL et qu'il restera pertinent pour les 20 prochaines années. Personnellement, je crois beaucoup à la capture du carbone. Le captage du carbone signifie probablement que les carburants conventionnels ou les combustibles fossiles resteront disponibles pendant un certain temps encore. Je pense qu'il s'agit d'un puzzle très compliqué à résoudre, et qu'il y aura donc un espace pour chaque technologie et chaque combustible.

- Quels carburants ou quelles avancées technologiques, en termes de décarbonisation du transport maritime, seraient techniquement et économiquement les plus adaptés au transport maritime en eaux profondes ?

En ce qui concerne les carburants, tous les carburants alternatifs, à l'exception des biocarburants, du méthanol ou de l'ammoniac. En ce qui concerne les carburants synthétiques, ils seront utiles, mais je ne vois toujours pas d'hydrogène sur les navires de haute mer en raison de leur densité énergétique plus faible. En ce qui concerne les avancées technologiques, je pense que nous commencerons à voir apparaître des technologies de prévention du glissement de méthane qui permettront de continuer à utiliser du GNL fossile. Il y a une myriade de technologies qui commencent à être bien éprouvées et que nous verrons, surtout à court terme, être adoptées petit à petit.

- Dans le contexte du transport maritime à courte distance, qui implique des navires plus petits, quelle serait l'une des stratégies de décarbonisation des carburants les plus efficaces, et en quoi serait-elle différente de celles employées pour le transport maritime en haute mer ?

Oui, je vois certainement des navires hybrides ou entièrement alimentés par des batteries. La grande tendance pour le transport maritime à courte distance est à l'utilisation de batteries, donc au tout électrique. La tendance est à l'utilisation de batteries et cela va continuer. Je pense que la technologie la plus dominante pour le transport maritime sera celle des batteries. Les batteries sont rechargées à terre à partir d'énergie renouvelable.

- Comment les différences ou les disparités régionales dans la disponibilité des carburants de substitution dans les ports peuvent-elles influencer sur la faisabilité de leur adoption par la flotte maritime mondiale ?

C'est une excellente question. C'est en quelque sorte le point d'interrogation actuel. Le problème avec la marine marchande, si l'on exclut les conteneurs, c'est que la plupart des navires n'ont pas de trajectoire fixe et voyagent dans le monde entier. Cela signifie que si vous êtes le propriétaire ou si vous souhaitez, dans le cadre d'un affrètement, conserver l'option pour le navire et aller partout, vous ne pouvez pas vous engager avec un fournisseur de carburant alternatif sur une certaine quantité de carburant. À court terme, il y aura donc une pénurie de carburants alternatifs. Je pense qu'il n'y aura de carburants alternatifs que pour certains segments du transport maritime, qui opèrent à une échelle fixe, donc typiquement pour les conteneurs ou les navires de passagers. Ensuite, ce qui restera sera idéalement utilisé par les navires marchands. Selon moi, plus il y aura de navires à double carburant, plus la demande sera consolidée. Nous commencerons donc à voir, au moins dans les principaux centres d'avitaillement tels que Singapour, une disponibilité, mais il faudra du temps avant de pouvoir avitailler. Cela se développera donc autour des itinéraires où se trouvent les premiers utilisateurs, c'est-à-dire les navires porte-conteneurs et les navires de passagers, et autour des principales plates-formes de soutage. Puis, progressivement, la disponibilité augmentera. Par ailleurs, la plupart des fournisseurs se demandent pourquoi ils devraient investir dans des infrastructures si aucun navire ne fonctionne au méthanol. Dans le même temps, de nombreux armateurs se demandent pourquoi dépenser 50 % de plus pour un nouveau navire alimenté au méthanol si je ne suis pas en mesure d'utiliser le méthanol pour le soutage.

- En ce qui concerne le système d'échange de quotas d'émissions (EU ETS), comment une telle mesure pourrait-elle influencer l'adoption de carburants alternatifs dans la future combinaison de carburants de la flotte de transport maritime ?

Je ne pense pas que le système d'échange de quotas d'émissions affectera réellement la combinaison de carburant futur. Son objectif principal est d'encourager l'efficacité des carburants. Le meilleur carburant est celui que l'on ne brûle pas, donc en imposant une taxe, on cherche à encourager une navigation plus efficace ou des rénovations. Je pense qu'elle encouragera certainement l'utilisation des biocarburants. Une autre loi de l'Union européenne est sur le point

d'être approuvée. Il s'agit de "FuelEU Maritime", qui traite de l'évolution de la composition des carburants sur une période de 25 ans. De mon point de vue, elle aura donc une influence sur les biocarburants.

- Peut-on parvenir à la décarbonisation sans une législation claire, et comment l'IMO peut-elle trouver un équilibre entre la création de conditions équitables et la promotion de l'adoption rapide de nouveaux carburants et de nouvelles technologies qui contribuent à la décarbonisation du transport maritime ?

À la première question, il est clair que non. Je pense que s'il n'y a pas de législation claire avec des objectifs clairs, il n'y a aucun moyen d'y parvenir parce qu'en fin de compte, on peut atteindre un certain point avec des technologies et des gains d'efficacité, mais le seul moyen crédible d'atteindre le zéro net d'ici 2050 est d'augmenter la capacité de production, et le seul moyen d'y parvenir est de faire un énorme investissement qu'aucune entreprise ne fera à moins d'avoir un cadre réglementaire crédible et exécutable. Ainsi, sans une politique claire, il n'y a aucune chance qu'il y ait un investissement significatif ou un changement. En ce qui concerne l'OMI, il s'agit d'une organisation complexe car, en fin de compte, il s'agit d'une organisation politique. Il s'agit d'un cadre et c'est chaque pays qui doit adhérer à ce cadre et faire en sorte que ce type de recommandations fasse partie de la législation nationale et qu'elles soient appliquées. Le problème avec l'OMI, c'est qu'il y a plusieurs pays et qu'ils ont tous des perspectives et des points de vue très valables, de sorte qu'un consensus est nécessaire. La décarbonisation s'accompagnera d'un certain nombre de coûts qui seront répercutés le long de la chaîne et, en fin de compte, il y aura un impact sur le prix que les citoyens paient pour l'énergie ou pour leur nourriture. À mon avis, et j'espère me tromper, il n'y a pas encore de consensus pour proposer une législation claire déployée à l'échelle mondiale, car certains pays, notamment les pays européens ou les pays dits développés, sont très ambitieux et prêts à prendre des mesures très audacieuses et des mesures basées sur le marché. D'autres pays, dits sous-développés et développés du côté de l'exportation, ne partagent pas ce point de vue. Le pire scénario est celui d'une législation régionale. Ainsi, par exemple, les régimes entre régions créeront probablement davantage de différences et d'inégalités.

- Selon vous, dans quelle mesure est-il possible de réussir la décarbonisation du transport maritime sans restructurer les flux commerciaux mondiaux (plus locaux), compte tenu de la dépendance actuelle à l'égard des réseaux commerciaux étendus et à longue distance ?

Je pense que les grands flux commerciaux ont une raison d'être : il y a des pays qui possèdent les produits de base et les autres pays qui en ont besoin ne sont pas très sûrs de la faisabilité ou même de l'intérêt de les empêcher de se produire. Il n'y a jamais eu autant de personnes correctement nourries dans le monde. Je pense qu'il pourrait y avoir un ajustement de certains flux commerciaux en fonction de l'évolution des besoins. Il va sans dire que si nous commençons à utiliser moins de combustibles fossiles, nous aurons besoin de moins de pétrole et le nouveau combustible synthétique dont on sait qu'il doit être produit dans les mêmes endroits que les combustibles fossiles actuels, pourrait être le cas avec toutes ces menaces de fabrication locale, il y aura moins de besoin

de trafic conteneurisé à long terme et à court terme. Quoi qu'il en soit, je continue de penser que le transport maritime à longue distance sera nécessaire à long terme. En termes d'efficacité, le transport maritime est de loin le moyen de transport le plus efficace et, parfois, même lorsqu'il est très court, il n'est pas aussi efficace que lorsqu'il est long. Je pense que nous aurons toujours besoin de la route locale à long terme. Sinon, il y aura une disparité entre l'endroit où les marchandises sont nécessaires et l'endroit où elles sont produites. Même s'il y aura un remaniement et de nouvelles discussions sur l'origine des nouveaux carburants synthétiques.

## **Annexe 6 : Entretien avec Mr. Richard Watts – Director (HR Maritime)**

- Selon vous, quels carburants alternatifs (biocarburants, méthanol, hydrogène, ammoniac, carburants électriques) OU technologies contribueront de manière rentable aux efforts de décarbonisation à court et à long terme ? Lesquelles ne le seront pas ?

À court terme, je dirais les biocarburants. Je pense que les biocarburants et le GNL sont fondamentalement les seules options à très court terme et que le GNL n'est une option que pour des itinéraires très spécifiques. Je ne suis pas sûr qu'à court terme, nous aurons un changement massif des carburants que nous utiliserons. Je pense qu'à plus long terme, il faudra peut-être attendre 5 à 10 ans. Je pense que c'est un mélange de tout ce qui précède. Je pense donc que le méthanol sera de plus en plus utilisé, de même que l'ammoniac, et je pense que l'hydrogène sera une bonne solution dans 15 ou 20 ans. Cela dépendra beaucoup des différentes utilisations et des différents itinéraires envisagés. Par exemple, pour les lignes de conteneurs, il est assez facile de faire des allers-retours entre les grands ports, car il n'est alors pas nécessaire d'établir des routes d'approvisionnement en GNL dans le monde entier. Il suffit de les installer dans les grands ports, ce qui rend la vie un peu plus facile. Je pense qu'il s'agira d'un mélange de tout ce qui a été cité. Mais je pense que le nucléaire est assez intéressant. Compte tenu de l'opinion publique et de ce que nous entendons aujourd'hui, je pense qu'il faudrait un changement radical de la politique et de l'opinion publique pour introduire le nucléaire. Le nucléaire est faisable, mais il y a beaucoup de défis techniques à relever, mais je pense qu'il est certainement faisable physiquement. Mais aussi, quand l'alimentation par batterie sera-t-elle une option ? Aujourd'hui, l'alimentation par batterie est une option pour le transport maritime à courte distance ou pour le transport côtier. Oui, ce n'est pas une option pour le transport maritime international, mais il y a une société appelée Leclerc. Elle travaille avec CGM. Les puces CGN utilisent l'énergie des batteries dans un rayon de 500 mètres de la côte. Mais je ne serais pas surpris qu'à un moment donné, dans les cinq prochaines années, nous ayons une révolution dans le domaine de l'alimentation par batterie. En fait, il y a une percée qui change complètement la donne parce qu'utiliser de l'électricité pour alimenter un navire n'est pas nécessairement insensé. C'est juste le stockage de l'électricité qui est difficile et je pourrais voir de meilleures façons de stocker et de générer cette électricité à bord, ce qui finirait par changer la façon dont cela fonctionne. Mais il faudra attendre 15 à 20 ans pour cela, car il faudra alors construire de nouveaux navires. Il faut mettre en place le processus de développement et tout le reste. Nous parlons donc d'un délai de 20 ans.

- Quels carburants ou quelles avancées technologiques, en termes de décarbonisation du transport maritime, seraient techniquement et économiquement les plus adaptés au transport maritime en eaux profondes ?

Pour le transport maritime en eaux profondes, je pense qu'il s'agit d'un mélange de solutions et je pense que la plus grande partie de ces solutions sera d'abord des gains d'efficacité. Ainsi, la technologie de la coque réduit la traînée. Ensuite, il y aura plusieurs solutions liées à des



augmentations progressives telles que l'énergie éolienne, les cerfs-volants, puis il s'agira de déterminer ce qu'il reste à produire pour alimenter le navire en énergie. Qu'allons-nous utiliser pour l'alimentation du navire en ce qui concerne les eaux profondes ? Et comme je l'ai dit, je pense que l'alimentation par batterie ne sera pas disponible avant une bonne vingtaine d'années. Je pense donc qu'à court terme, il s'agira de fioul, de gazole, de GNL dans certaines situations et de biocarburant. Et je pense que les biocarburants vont représenter une part assez importante de l'équation. Ensuite, pour certains cas d'utilisation particuliers, le méthanol et l'ammoniac. Quant à l'hydrogène, il faudra encore attendre 10 à 15 ans.

- Dans le contexte du transport maritime à courte distance, qui implique des navires plus petits, quelle serait l'une des stratégies de décarbonisation des carburants les plus efficaces, et en quoi serait-elle différente de celles employées pour le transport maritime en haute mer ?

Je pense qu'il y aura de plus en plus de batteries pour les très courtes distances, comme pour les ferries ou les navires côtiers. Le problème, c'est que les batteries actuelles sont très lourdes, et c'est que lorsque vous savez que vous construisez des navires plus lourds et que vous avez besoin de plus gros moteurs pour propulser des navires plus lourds, vous vous retrouvez dans une spirale. Je pense qu'il y aura de toute façon beaucoup de chevauchements. Ce n'est pas comme si nous allions nous retrouver avec deux mondes différents, entre la mer courte et la mer profonde. Je pense qu'il y aura beaucoup de chevauchement entre les deux, et je pense que la réponse sera de toute façon très proche de la réponse pour la mer profonde, parce qu'il est peu probable que nous développions des technologies complètement différentes pour les deux zones. En effet, dans une certaine mesure, où se situe la limite entre la mer courte et la mer profonde ?

- Comment les différences ou les disparités régionales dans la disponibilité des carburants de substitution dans les ports peuvent-elles influencer sur la faisabilité de leur adoption par la flotte maritime mondiale ?

Je pense que, dans une certaine mesure, c'est le problème auquel nous sommes confrontés aujourd'hui. Nous disposons d'un réseau mondial d'approvisionnement en combustibles liquides qui peuvent être stockés et transportés à température ambiante. Tout d'abord, le GNL pose problème. Son transfert est problématique, tout comme celui de l'ammoniac et du méthanol. Sans parler de leur source, de leur origine et de leur mode de production. Je pense que c'est probablement l'un des principaux facteurs de limitation. C'est pourquoi le biocarburant est vraiment la solution immédiate, car il suffit de le jeter dans le même réseau que celui dont nous disposons. Pour les navires, on peut aussi mettre du carburant normal et donc si vous vous retrouvez dans un port qui n'a pas d'approvisionnement, ils peuvent toujours fonctionner aux fiouls conventionnels. Je pense que cela dépendra beaucoup du type de navire, de la taille du navire et donc, à mesure que l'on descend dans l'échelle de la taille du navire, on aura besoin de beaucoup plus de flexibilité en termes de carburant. Je pense que les très gros transporteurs de brut pourront passer à d'autres carburants parce qu'ils ne font que des allers-retours entre 5 à 10-15 terminaux différents dans le monde. Dès

qu'il s'agira de navires de petite taille, de navires qui vont vraiment partout dans le monde, c'est là que nous aurons un problème d'approvisionnement en carburant.

- En ce qui concerne le système d'échange de quotas d'émission (EU ETS), comment une telle mesure pourrait-elle influencer l'adoption de carburants alternatifs dans la future combinaison de carburants de la flotte de transport maritime ?

Je pense que le problème est que la création de règles régionales est très problématique. Mais je pense que le changement de l'UE est essentiel. Il faut bien commencer quelque part et je pense donc que c'est un début et que c'est un pas dans la bonne direction. Le système d'échange initial est plus susceptible de promouvoir une valeur réelle des émissions que ne le font les crédits carbone, car ces derniers sont largement inférieurs au prix de l'impact réel du carbone sur notre environnement. Ce qui me préoccupe, c'est que nous allons nous retrouver avec un patchwork de réglementations différentes, de pays différents, de régions différentes, et qu'il sera très complexe pour les gens de gérer et de comprendre où ils peuvent aller et combien cela leur coûte d'y aller. C'est une question très délicate, car je pense que l'idéal serait que l'IMO prenne les choses en main et que ce soit elle qui impose les règles mondiales. Il faut ensuite le soutien d'un nombre suffisant de pays, et le problème est que beaucoup de pays n'envisagent pas la décarbonisation de la même manière que nous. Une grande partie du monde considère qu'il s'agit d'un problème européen. En gros, ils disent que vous avez déjà gagné de l'argent grâce à l'utilisation du carbone à partir de l'ère du carbone. Maintenant, c'est notre tour et, bien que cela ne soit pas productif pour le débat sur le changement climatique, ils ont un certain point de vue. Il s'agit donc de savoir comment gérer cela à l'échelle mondiale et la réponse à cette question sera très compliquée.

- Peut-on parvenir à la décarbonisation sans une législation claire, et comment l'IMO peut-elle trouver un équilibre entre la création de conditions équitables et la promotion de l'adoption rapide de nouveaux carburants et de nouvelles technologies qui contribuent à la décarbonisation du transport maritime ?

Pour la première partie de la question, je pense que non. Je pense que vous pouvez avoir toutes les initiatives différentes que vous voulez. Vous pouvez avoir toutes les entreprises différentes qui vous vendent tous ces objectifs différents, mais je ne pense pas que nous en soyons là. Je pense que nous n'y parviendrons pas sans que quelqu'un, armé d'un très gros bâton, ne frappe tout le monde. Le problème, c'est que l'on se préoccupe beaucoup de la compétitivité et du degré de compétitivité des différentes régions et que l'Europe, en imposant une législation, pourrait rendre les acteurs européens moins compétitifs. Ainsi, si vous importez en Europe, vous êtes au même niveau que tous les autres importateurs européens. Ainsi, par définition, les consommateurs européens finiront par payer pour cela, mais ils paieront tous pour cela, que cela vienne de vous ou de moi. Le principal problème concerne les exportations européennes, car elles deviennent beaucoup plus coûteuses que les exportations d'autres régions. Ainsi, par exemple, si la Chine cherche à acheter quelque chose en Europe ou en Amérique du Sud, cela devient beaucoup plus intéressant financièrement, même si c'est plus loin. Je pense que c'est ce que l'OMI doit faire et imposer le coût réel de l'impact

que nous avons. La question est de savoir combien de temps nous allons nous concentrer sur la décarbonisation et combien de temps nous allons nous concentrer sur d'autres aspects de l'équation ESG. C'est une discussion extrêmement compliquée et je pense que le problème est que tout le monde a son propre point de vue, et que chaque point de vue a beaucoup de poids.

- Selon vous, dans quelle mesure est-il possible de réussir la décarbonisation du transport maritime sans restructurer les flux commerciaux mondiaux (plus locaux), compte tenu de la dépendance actuelle à l'égard des réseaux commerciaux étendus et à longue distance ?

C'est une question intéressante, et le problème est que nous avons à l'esprit l'idée que le local est meilleur. Et je pense que le problème est que nous ne savons pas. Je pense que la réponse évidente n'est souvent pas la bonne. Je pense que nous avons besoin d'informations fiables sur l'empreinte carbone de l'ensemble des émissions de ce que nous consommons. En effet, produire des denrées alimentaires à petite échelle signifie perdre une grande partie de l'efficacité des économies d'échelle. Le transport de marchandises par voie maritime représente 3 % des émissions mondiales, mais lorsque l'on considère les volumes transportés par tonne métrique, on se rend compte que ce n'est pas si grave. La vraie question est donc de savoir s'il serait bénéfique de modifier les flux commerciaux mondiaux. Cela résoudrait-il le problème ? Je n'en suis pas convaincu. Je pense que certains changements seraient bénéfiques. Je pense que, par exemple, si vous achetez du blé en Argentine ou en Italie, il faut calculer l'impact environnemental de ce transport. Disons par exemple que vous allez sur la côte atlantique de la France, que vous devez acheter 100 000 tonnes de blé et qu'un navire arrive d'Argentine et vous avez quatre navires qui viennent d'Europe de l'Est et qui descendent à travers la Méditerranée jusqu'au nord de la France, qu'est-ce qui est mieux, qu'est-ce qui est pire, transporter ces marchandises par barge à travers l'Europe, est-ce mieux ? Je ne pense pas que nous le sachions et tant que nous n'aurons pas de données concrètes à ce sujet, je ne pense pas que nous puissions prendre une décision et je pense qu'il est ridicule de s'attendre à pouvoir prendre une décision sans ces informations.

## Annexe 7: Entretien avec Mr. Jan Hoffmann – Head of Trade Logistics (UNCTAD)

- Selon vous, quels carburants alternatifs (biocarburants, méthanol, hydrogène, ammoniac, carburants électriques) OU technologies contribueront de manière rentable aux efforts de décarbonisation à court et à long terme ? Lesquelles ne le seront pas ?

Désolé, je ne suis pas un spécialiste technique. Le mieux est de vérifier les rapports de DNV, Shell et autres. Cela dépendra également de l'itinéraire, de la distance, de la taille du navire, de la cargaison. Vous trouverez peut-être des informations dans le dossier drop box que j'ai partagé avec vous.

- Quels carburants ou quelles avancées technologiques, en termes de décarbonisation du transport maritime, seraient techniquement et économiquement les plus adaptés au transport maritime en eaux profondes ?

Voir ci-dessus.

- Dans le contexte du transport maritime à courte distance, qui implique des navires plus petits, quelle serait l'une des stratégies de décarbonisation des carburants les plus efficaces, et en quoi serait-elle différente de celles employées pour le transport maritime en haute mer ?

Le transport maritime à courte distance peut être plus rapide avec l'électricité que le transport à longue distance.

- Comment les différences ou les disparités régionales dans la disponibilité des carburants de substitution dans les ports peuvent-elles influencer sur la faisabilité de leur adoption par la flotte maritime mondiale ? A big challenge for small islands that are far away.

Aujourd'hui déjà, ils doivent relever le défi de l'avitaillement des navires qui parcourent une longue distance pour atteindre leur île. Si, à l'avenir, la densité énergétique du carburant se dégrade et qu'il faut transporter jusqu'à quatre fois le volume de carburant pour la même énergie, cela deviendra plus difficile. Il se peut alors qu'il faille prévoir plus que du carburant, c'est-à-dire des infrastructures, du soutage, etc. pour différents carburants, alors que les navires ne viennent que tous les quelques jours ou toutes les semaines.

- En ce qui concerne le système d'échange de quotas d'émissions (EU ETS), comment une telle mesure pourrait-elle influencer l'adoption de carburants alternatifs dans la future combinaison de carburants de la flotte de transport maritime ?

Les mesures économiques sont une bonne chose en général, car elles rendent les carburants alternatifs plus compétitifs. Un prélèvement fixe présente certains avantages par rapport à un système d'échange de quotas d'émissions, car il offre une plus grande stabilité au transporteur. Et l'idéal serait d'avoir une solution multilatérale plutôt que des solutions régionales. Mais il peut être

positif que l'UE fasse pression sur l'OMI en développant sa propre solution régionale, afin d'encourager les membres de l'OMI à aller de l'avant avec une solution multilatérale.

- Peut-on parvenir à la décarbonisation sans une législation claire, et comment l'IMO peut-elle trouver un équilibre entre la création de conditions équitables et la promotion de l'adoption rapide de nouveaux carburants et de nouvelles technologies qui contribuent à la décarbonisation du transport maritime ?

Suivez l'actualité du MEPC cette semaine. Une mesure économique peut aider. Un prélèvement ou une contribution - nous ne l'appelons pas "taxe" - contribuera à rendre les carburants alternatifs compétitifs. Il permettra également aux investisseurs et aux négociants de choisir la manière de réduire les émissions, contrairement à certains messages techniques de type "commande et contrôle". À la CNUCED, nous considérons qu'il est particulièrement important de soutenir les pays les plus vulnérables pendant la transition. Les « SIDS » et les « LDC » ne sont pas à l'origine du changement climatique, mais ils seront désormais fortement touchés par l'augmentation potentielle des coûts de la logistique maritime. Dans d'autres secteurs, on pourrait faire valoir que les PEID et les PMA pourraient être exemptés de l'obligation de réduire les émissions. Mais cela ne fonctionne pas dans le transport maritime international. Les navires, les itinéraires et les compagnies maritimes opèrent à l'échelle mondiale, et aucun pays ou région ne peut accepter un transport maritime de qualité inférieure. Le seul moyen pratique d'aider les pays plus petits et plus vulnérables est donc d'adopter une mesure économique. Si les coûts de la logistique maritime augmentent pour une petite communauté insulaire du Pacifique, elle a besoin d'aide pour pouvoir se conformer aux nouvelles mesures, et elle a besoin d'un soutien financier et technique pour réduire ses coûts de logistique maritime par d'autres moyens, notamment par la modernisation des ports, les investissements dans les infrastructures, l'automatisation des douanes, la numérisation, le renforcement des capacités, etc.

- Selon vous, dans quelle mesure est-il possible de réussir la décarbonisation du transport maritime sans restructurer les flux commerciaux mondiaux (plus locaux), compte tenu de la dépendance actuelle à l'égard des réseaux commerciaux étendus et à longue distance ?

Ce n'est pas tant la distance qui compte, mais plutôt la masse critique sur des itinéraires spécifiques pour franchir des étapes et réaliser des économies d'échelle pour des carburants alternatifs spécifiques. Jusqu'à présent, nos données ne font pas état d'un grand nombre de délocalisations. Voir également le dernier rapport sur le commerce de la CNUCED <https://unctad.org/publication/global-trade-update-march-2023> et notre RMT <http://unctad.org/RMT>.