

**Corridor maritime vert : Un agenda de
décarbonation du transport maritime et
portuaire du système Saint-Laurent**

**Étude comparative des carburants de
remplacement pour le transport
maritime sur le système Saint-Laurent**

**Brian Slack
Uyen Phuong Nguyen
Serge Novikov
Claude Comtois**

June 2025

Bureau de Montréal

Université de Montréal
C.P. 6128, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) H3C 3J7
Tél : 1-514-343-7575
Télécopie : 1-514-343-7121

Bureau de Québec

Université Laval,
2325, rue de la Terrasse
Pavillon Palasis-Prince, local 2415
Québec (Québec) G1V 0A6
Tél : 1-418-656-2073
Télécopie : 1-418-656-2624

Corridor maritime vert : Un agenda de décarbonation du transport maritime et portuaire du système Saint-Laurent

Étude comparative des carburants de remplacement pour le transport maritime sur le système Saint-Laurent

Brian Slack, Uyen Phuong Nguyen, Serge Novikov, Claude Comtois*

Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)

Résumé. L'Organisation maritime internationale (OMI) exige la décarbonation de l'industrie maritime à l'horizon 2050. Cela représente un défi considérable compte tenu que l'industrie est largement dépendante des combustibles fossiles. La portée de cette transformation a généré une littérature abondante sur les carburants de remplacement et les nouvelles technologies. Le texte porte sur une analyse comparative de 12 études récentes qui proposent des trajectoires précises qui permettent à l'industrie maritime d'atteindre les objectifs de décarbonation. En comparant la portée, les méthodologies et les résultats des études, il est possible d'identifier les similitudes et les différences entre les diverses propositions de trajectoires. Les résultats de l'analyse de contenu permettent de déterminer un certain nombre d'enjeux qui vont probablement influencer la façon dont l'industrie s'adapte à la réglementation.

Mots-clés: transport maritime, décarbonation, carburant de remplacement

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

* Corresponding author: claudio.comtois@umontreal.ca

Corridor maritime vert : Un agenda de décarbonation du transport maritime et portuaire du système Saint-Laurent

Projet de recherche : PLAINE-2023PS01

Étude comparative des carburants de remplacement pour le transport maritime sur le système Saint-Laurent

Préparé par

Brian Slack, Uyen Phuong Nguyen, Serge Novikov & Claude Comtois

Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal QC H3C 3J7 Canada



Université de Montréal

Université 
de Montréal

18 juin 2025

1. Introduction

L'Organisation maritime internationale (OMI) a mis en place un ensemble de réglementations ambitieuses dans le but de permettre une décarbonation progressive de l'industrie maritime à l'horizon 2050 [1]. Les carburants de remplacement sont considérés comme une solution. Il existe plusieurs choix de carburants écologiques pour remplacer les combustibles fossiles. Mais chacun possède des capacités opérationnelles différentes et sont dans la plupart des cas plus onéreux que les carburants fossiles traditionnels actuellement utilisés par le transport maritime.

Très vaste, la littérature sur les carburants de remplacement permet une compréhension détaillée des types de carburants, de leurs compositions chimiques, de leurs caractéristiques opérationnelles et de leur utilisation [2, 3, 4]. La sélection des carburants qui représentent les meilleures options pour réaliser les objectifs réglementaires de décarbonation s'avère un défi pour l'industrie. Une revue de la littérature démontre qu'un certain nombre de propositions ont été faites depuis 20 ans sur la meilleure voie qui s'offre pour la décarbonation du transport maritime, mais sans toutefois permettre d'aboutir à un consensus [5, 6]. Cela est dû en partie aux nombreuses propositions qui ont été dépassées par les changements rapides de technologies notamment lorsque l'utilisation de carburants autrefois méconnus comme l'ammoniac est devenue possible ou lorsque les changements réglementaires ont modifié l'acceptabilité de certains carburants comme le gaz naturel liquéfié (GNL). Cependant l'industrie reconnaît que les réglementations exigent un remplacement des combustibles fossiles.

Une étude précédente a procédé à un examen des carburants de remplacement et d'autres mesures techniques et opérationnelles de réduction des émissions de GES pour le transport maritime [7]. Mais la transition du transport maritime vers des carburants de remplacement soulève une série de questions. Comment la recherche s'oriente-elle sur les carburants de remplacement ? Comment les progrès dans les carburants écologiques participent-ils aux diverses options de décarbonation ? Comment expliquer l'ambiguïté de la transition énergétique ? Comment les résultats de la recherche peuvent-ils être applicables au transport maritime ?

La démarche commence par un sommaire bibliographique sur les carburants de remplacement. Puis, elle met l'accent sur un examen complet d'études récentes sur le potentiel de décarbonation des carburants de remplacement. Suivra une identification des incertitudes qui influencent la prise de décisions dans les processus de décarbonation de l'industrie maritime.

2. Sommaire bibliographique

Ampah *et al* (2021) [2] ont produit une étude bibliographique de la littérature publiée durant la période de 2000-2020 sur les carburants de remplacement pour l'industrie du transport maritime. Les auteurs ont utilisé plusieurs moteurs de recherche pour extraire la documentation. Après avoir recensé plus de 2 000 documents, les auteurs ont sélectionné 583 manuscrits à des fins d'analyse. La recherche a permis de révéler une augmentation significative du nombre de textes publiés au cours des années : 72 écrits sont dénombrés pour 2000-2008, 106 manuscrits entre 2009 et 2014 et 403 articles entre 2015 et 2020.

L'examen des textes publiés en 2000-2020 révèle l'importance des travaux techniques et d'ingénierie dans les orientations de recherche. Un total de 1 610 auteurs a été recensé dans l'enquête dont deux tiers apparaissent une seule fois et un tiers manifestent plusieurs contributions. Plusieurs textes ont été rédigés par des équipes de recherche de la même institution. En termes de productivité, 15 auteurs ont contribué à la rédaction de cinq textes chacun au cours des deux décennies. Sept des 15 auteurs proviennent d'institutions scandinaves, indiquant une forte représentation de spécialistes dans le domaine de la technologie et de l'ingénierie navale. Les autres auteurs proviennent d'institutions à l'international : Égypte (2), Italie (2), Arabie Saoudite, Taiwan, Royaume-Uni et États-Unis.

Un examen de la bibliographie des articles publiés par les cinq principaux auteurs fait apparaître une large diversité de références variant de 11 à 551 citations où les auteurs suédois occupent les trois premières positions et un auteur de Taiwan, la quatrième.

En ce qui concerne les thèmes de recherche, l'étude révèle qu'un large éventail de sujets sont traités, mais les principaux champs d'activités de la recherche portent sur la faisabilité des carburants de remplacement à réduire les émissions du transport maritime. Les auteurs remarquent toutefois que la couverture a changé au fil du temps. Au début, l'accent est mis sur les moteurs marins et les émissions de GES. Le GNL est rapidement identifié comme une source de combustible qui peut réduire les émissions de CO₂. Le rôle des biocarburants dans les processus de décarbonation fut considéré ultérieurement. Ce n'est qu'au cours des cinq dernières années que les publications accordent une attention à d'autres carburants dont le méthanol, l'hydrogène et l'ammoniac.

3. Feuilles de route dans l'utilisation de carburants de remplacement

Cette section met l'accent sur une analyse comparative de 12 études récentes qui proposent des feuilles de route dans l'utilisation de carburants de remplacement qui permettent à l'industrie du transport maritime de satisfaire aux prescriptions des règlements internationaux concernant les émissions futures de CO₂ [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Toutes les études ont été publiées au cours des cinq dernières années. Elles reflètent à la fois des recherches académiques et

professionnelles et couvrent des échelles géographiques qui s'étendent du local au global.

La démarche consiste à utiliser l'analyse de contenu comme approche méthodologique. À cette fin, les 12 études sont examinées en fonction d'un ensemble commun de critères : questions de recherche; types de carburant considérés; méthodes utilisées dans la sélection des combustibles de remplacement; autres options de décarbonation; et trajectoires proposées. Cette procédure permet d'établir des comparaisons à chaque phase de l'analyse et de fournir des indications utiles sur les feuilles de route proposées.

3.1. Typologie

Le Tableau 1 présente les études sélectionnées par année de publication. Six études sont rédigées par des organisations de services techniques et professionnels. DNV (Det Norske Veritas) a publié une étude et a contribué à la rédaction d'un rapport de recherche contractuelle pour le Fonds mondial pour la nature (WWF). ABS (American Bureau of Shipping) a collaboré avec l'International Council on Clean Transportation (ICCT) à la préparation d'un rapport soumis à l'Administration maritime des États-Unis (MARAD). L'ICCT est un institut de recherche sans but lucratif basé aux États-Unis. Innovation maritime (IMAR) est un institut de recherche sans but lucratif consacré à la recherche appliquée, affilié à l'Institut maritime du Québec (IMQ). Lloyd's Register est une société de classification maritime. Le Tableau 1 indique que le contenu des études menées par des consultants tend à être plus développé que celui des six articles de périodiques scientifiques.

Bien que les 12 études proposent d'identifier les carburants de remplacement qui offrent les meilleures solutions pour décarboner le transport maritime, elles comportent deux différences : la portée des considérations qui forment la base des évaluations et l'échelle géographique applicable à la recherche.

La portée de la question de recherche implique l'évaluation de carburants de remplacement et leurs caractéristiques technologiques, mais peut aussi s'étendre à des facteurs opérationnels, économiques et politiques. Les rapports de consultants sont plus tangibles que les articles de périodiques scientifiques puisque la finalité de leur recherche est d'informer les clients sur les moyens de répondre à la réglementation internationale sur les émissions de GES. Seules les études de Balcombe *et al* (2019) [8] et Xing *et al* (2023) [13] vont au-delà de l'évaluation technologique des carburants de remplacement. Les autres articles de périodiques scientifiques ciblent principalement sur la décarbonation du transport maritime en comparant les carburants écologiques en fonction de leurs propriétés et de leur adaptabilité. Il convient de reconnaître que le texte de Carlisle *et al* (2023) [16] est unique parmi les documents en raison de son évaluation des carburants de remplacement en fonction de leur acceptabilité sociale.

Tableau 1. Profil des études sélectionnées, 2019-2024

Auteur principal	Date	Échelle géographique	Type de publication	Nombre de pages	Principales questions de recherche
Balcombe	2019	Mondial	Article	16	Éclairer les trajectoires de décarbonation
Brahmin	2019	Danemark	Article	14	Modéliser la réduction des émissions de carbone et les coûts des infrastructures
DNV	2019	Mondial	Rapport	65	Évaluer la viabilité commerciale et opérationnelle des carburants de remplacement
Hansson	2019	Suède	Article	14	Évaluer les perspectives de sept carburants de remplacement pour le transport océanique à l'horizon 2030
WWF (DMV)	2020	Canada	Rapport	64	Analyser les carburants de remplacement, les technologies sobres ou à émissions nulles en carbone et les options politiques
Xing	2021	Mondial	Article	18	Déterminer le carburant de remplacement le plus probable pour un transport maritime à faible niveau d'émissions en 2050
IMAR	2021	Québec	Rapport	103	Déterminer le carburant de remplacement le plus pertinent
ABS	2023	Mondial	Rapport	93	Déterminer les trajectoires qui réduisent les émissions et offrent des potentiels de croissance commerciale
Carlisle	2023	Royaume-Uni	Article	20	Comblent le déficit de connaissance sur la réaction du public aux carburants de remplacement
Munim	2023	Bangladesh	Article	11	Identifier les défis des pays en développement à s'adapter aux carburants de remplacement
Lloyd's Register	2023	Mondial	Rapport	39	Esquisser les tendances les plus significatives, les tendances de l'offre et de la demande et réduire les incertitudes
ICCT	2024	Grands Lacs des États-Unis	Rapport	135	Évaluer la compatibilité des carburants de remplacement à alimenter le transport maritime dans les Grands Lacs en conjonction avec les enjeux réglementaires

L'échelle géographique des études varie entre les textes qui présentent une dimension mondiale et ceux qui offrent une perspective régionale. En termes d'objectifs de recherche, il n'apparaît aucune distinction précise entre les études de cas et les études à l'échelle internationale.

L'analyse de contenu des études soulève un autre constat. Cinq études évoquent la relation entre le contexte de la recherche et les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) portant sur les émissions de CO₂ et le réchauffement climatique [11 (Hansson *et al*, 2019), 13 (Xing *et al*, 2023), 14 (IMAR, 2021), 15 (ABS, 2023) et 18 (Lloyd's Register, 2023)]. Cependant, toutes les études font référence à l'Organisation maritime internationale (OMI) et aux nombreuses réglementations nationales afin de fournir un cadre contextuel aux études. Cela montre l'importance directe des réglementations dans la mise en œuvre de la décarbonation du transport maritime.

3.2. Méthodologie

Les méthodes employées par les auteurs représentent un élément essentiel de la procédure de recherche. Deux éléments distincts sont considérés : le choix de

carburants en conjonction avec les critères d'évaluation; et les procédures d'évaluation employées.

3.2.1. Choix de carburants

Le choix de carburants de remplacement revêt une grande importance, car les résultats ne peuvent refléter que ce qui est considéré. Le Tableau 2 présente une liste des sources d'énergie représentées dans les études. Il importe de reconnaître que le nombre effectif de catégories est beaucoup plus grand compte tenu de la composition très large des biocarburants et en raison du fait que les carburants comme le GNL, l'hydrogène, l'ammoniac et le méthanol peuvent être subdivisés en trois catégories : gris, bleu et vert. Seul Balcombe *et al*, 2019 [8] considère 10 solutions de rechange alors que la plupart des études mettent l'accent sur 6 ou 7 types de carburant.

Tableau 2. Typologie des carburants de remplacement de 12 études

Carburant	Balcombe	Brahmin	DNV	Hansson	WWF	Xing	IMAR	ABS	Carlisle	Munim	Lloyd's Register	ICCT
Fioul lourd/ Diesel marin						*		*	*	*		
GNL	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Biocarburants	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Hydrogène	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Ammoniac		*	*		*	*	*	*	*	*	*	*
Méthanol	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*
GPL			*		*	*	*					
Batteries et électricité	*	*	*	*	*						*	*
Piles à combustible	*											
Nucléaire	*							*	*			
Éolien	*			*						*	*	
Solaire	*											

L'analyse révèle que quatre carburants de remplacement dominent le processus de sélection soit le GNL et l'hydrogène qui sont considérés par les 12 études, les biocarburants, par 11 études, l'ammoniac et le méthanol, par neuf études. L'alimentation électrique ou par batterie représente un produit intermédiaire présent dans six études. Les autres sources énergétiques considérées sont essentiellement secondaires et présentes dans des cas particuliers. Le choix de carburants présents dans les études reflète quelques constats. Les études ont été publiées au cours des cinq dernières années, une période marquée par une évolution significative des exigences réglementaires et des technologies de combustibles. En outre, de nouvelles limites d'émission pour le SO₂, le NO_x et les

matières particulaires ont été introduites et les appels à une réduction des émissions de CO₂ sont devenus de plus en plus pressants. Par ailleurs, le GNL est désormais perçu comme un carburant pouvant servir de pont entre les combustibles fossiles traditionnels et les sources d'énergie carboneutre où l'hydrogène est pressenti comme le carburant du futur. Qui plus est, la première génération de biocarburants est apparue comme de portée limitée parce que leur production détournait les cultures de la production alimentaire. Depuis le début de la troisième décennie du 21^e siècle, il est devenu apparent que le méthanol et l'ammoniac peuvent être utilisés comme carburant de remplacement.

Il est devenu manifeste chez certaines parties prenantes de l'industrie maritime que le processus de décarbonation sera plus difficile qu'on ne l'imaginait au départ en raison du défi que pose le coût des carburants verts. Les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (2020) [20] à l'effet que d'importantes quantités de carburants fossiles continueront d'entrer dans la composition du commerce international à l'horizon 2050 a conduit quelques experts dont ABS (2023) [15] à envisager un rôle pour le transport maritime dans le commerce de combustibles tandis que la technologie de captage et de stockage du carbone pourrait devenir une importante source d'énergie. De la même façon, Balcombe *et al* (2019) [8], ABS (2023) [15] et Carlisle *et al* (2023) [16] avancent l'utilisation possible de l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie de remplacement par l'industrie maritime.

3.3. Paramètres d'évaluation

Chaque carburant de remplacement a été évalué en fonction d'un éventail de critères. Néanmoins, l'analyse de contenu des études révèle d'énormes différences dans le nombre et le type de paramètres utilisés. Carlyle *et al* (2023) [16] utilise l'acceptabilité sociale pour chaque carburant sélectionné comme critère principal. Dans le cas de Lloyd's Register (2023) [18] la sélection de quatre carburants s'est effectuée sur la base de leur présence prévue dans le bouquet énergétique à l'horizon 2050 tel que dérivé par l'Agence internationale de l'énergie (2020) [20] et une série de critères impliquant les coûts (opérationnels et en capital), la densité énergétique, la disponibilité du carburant, les émissions de carbone, les risques (accidents et déversements), la maturité technique, la compatibilité avec les moteurs, l'avitaillement et la conformité aux normes et règlements. D'autres critères comme les impacts du changement climatique, l'acidification des océans et la santé publique sont ajoutés dans les études de Hansson *et al* (2019) [11] et Xing *et al* (2023) [13]. Il devient vite évident que la prolifération de paramètres, tout en rendant les évaluations potentiellement plus réalistes, rend la sélection finale de carburants de remplacement beaucoup plus complexe.

3.4. Méthodes d'évaluation

3.4.1. Études de firmes conseils

Les études faites par des consultants internationaux tels que ABS (2023) [15] et Lloyd's Register (2023) [18] et celles d'autres firmes eu égard aux critères d'évaluation comportent des différences marquées. Dans le cas des premiers, les comparaisons entre les carburants de remplacement sont fondées sur des connaissances et des expériences approfondies de professionnels de l'industrie, tandis que dans les derniers cas, les résultats sont présentés en fonction de scores numériques.

L'enquête de DNV (2019) [10] propose 16 feuilles de route vers l'utilisation de carburants plus propres par l'industrie maritime, reflétant la capacité des carburants de remplacement à desservir divers types de moteur à combustion interne y compris les piles à combustibles. Pour chaque feuille de route, DNV applique 11 paramètres qui portent l'applicabilité, l'économie, l'environnement et les mesures de performance. Un système de code couleur est employé pour évaluer chaque paramètre, mais l'étude n'offre pas une évaluation générale, arguant de la nécessité de considérer d'autres spécifications des navires, les conditions locales, l'accès à des vecteurs énergétiques, etc.

L'étude du World Wildlife Fund (WWF) (2020) [12] a été préparée par DNV et présente le profil du transport maritime et des émissions de carbone dans les eaux canadiennes suivi d'une revue des carburants de remplacement. L'étude n'effectue aucune sélection de carburant, mais offre un cadre de discussion sur les implications réglementaires et politiques qui structurent les choix.

IMAR (2021) [14] évalue neuf types de carburant dont le fioul lourd et les classe en fonction de 16 paramètres. La sommation des valeurs accordées à chaque paramètre offre un moyen d'identifier le meilleur carburant de remplacement pour le transport maritime. Le principal problème lié à cette procédure méthodologique réside dans le fait que le prix du carburant, certainement l'un des plus importants critères, ne représente que 6,25 % de l'évaluation totale, tandis que les facteurs de risque et de disponibilité, composé chacun de quatre paramètres, comptent pour 50 % de l'appréciation.

ABS (2023) [15] ne présente aucune méthodologie précise. L'étude produit une série de feuilles de route pour la décarbonation du transport maritime en fonction des connaissances et de l'expertise de l'organisation sur la conception navale, la technologie, les caractéristiques des carburants ainsi qu'en vertu des occasions commerciales qu'offre la transition énergétique mondiale.

L'étude de Lloyd's Register (2023) [18] ne contient aucune méthodologie précise. À la suite d'une évaluation d'estimations générées à l'externe sur l'utilisation de carburant par le transport maritime à l'horizon 2050, Lloyd's Register utilise

l'analyse descendante pour proposer deux feuilles de route générales reposant sur une vaste gamme de carburants de remplacement.

L'ICCT (2024) [19] propose 32 feuilles de route pour décarboner le transport maritime à l'aide de carburants plus propres. L'étude utilise une technique d'analyse quantitative des coûts (capitaux, opérations et prix) en conjonction avec une évaluation qualitative de paramètres portant sur les émissions de carbone, le niveau de risque, la compatibilité avec les moteurs et la maturité technologique des carburants. Le classement des paramètres est calculé pour les années 2030, 2040 et 2050 et présenté sous forme de tableaux et de graphiques pour six types de carburant. Cependant l'étude d'ICCT ne produit aucun sommaire du classement des carburants en raison des incertitudes sur le prix des carburants et des avancées technologiques.

3.4.2. Études académiques

Les six études académiques diffèrent des rapports des firmes-conseils par l'utilisation de méthodes quantitatives pour évaluer les carburants de remplacement. Deux études empruntent des procédures différentes pour produire des recommandations. Balcombe *et al* (2019) [8] fournissent des précisions sur les principaux carburants de remplacement à l'exception de l'ammoniac et ils insèrent dans leur analyse l'énergie nucléaire, l'électricité et les améliorations technologiques. Pour pouvoir comparer leur efficacité combinée, les auteurs emploient une simulation Monte Carlo pour déterminer les avantages combinés en fonction de diverses mesures de décarbonation, l'une pour réduire les émissions de 50 % et l'autre, de 80 %. Brahim *et al* (2019) [9] utilisent un modèle de programmation mathématique pour minimiser les coûts totaux du système tout en intégrant des contraintes sur les émissions de carbone. En utilisant les coûts contemporains leur modèle produit les résultats escomptés pour divers types de carburant et diverses sources d'énergie à l'horizon 2050.

Les quatre autres études scientifiques se distinguent en termes de détails, mais tous les auteurs utilisent une méthode de classement des carburants de remplacement. L'étude la plus distinctive est celle de Carlisle *et al* (2023) [16] qui est fondée sur une enquête postale auprès de 992 membres du grand public au Royaume-Uni concernant leur perception sur l'utilisation potentielle de six carburants. La tabulation arithmétique des réponses permet d'ordonner les préférences. À l'opposé, l'évaluation de Xing *et al* (2023) [13] classe 11 carburants de remplacement en fonction de neuf critères dont trois basés sur les coûts. L'étude de Hansson *et al* (2019) [11] est basée sur des entrevues auprès de 13 parties prenantes de l'industrie maritime suédoise dont des fonctionnaires, des ingénieurs navals, des transporteurs et des universitaires afin d'obtenir un classement des carburants de remplacement. Les notes ainsi attribuées sont ensuite analysées au moyen d'un processus de hiérarchie analytique (PHA), une méthode qui permet d'évaluer les carburants de remplacement en fonction de divers critères. L'étude de Munim *et al* (2023) [17] permet d'obtenir le classement

des carburants de remplacement de 25 représentants de l'industrie maritime du Bangladesh dont des bureaucrates, des membres d'équipage de même que des représentants de compagnies maritimes et d'un architecte naval. L'étude utilise la méthode bayésienne pour classer les critères et la méthode d'aide à la décision multicritère promethee-gaia pour l'analyse des priorités. L'approche méthodologique des études de Hansson *et al* (2019) [11] et de Munim *et al* (2023) [17] permet de pondérer les critères utilisés. Dans les deux cas, les facteurs de coûts se sont révélés prépondérants.

3.5. Recommandations

Le Tableau 3 donne un aperçu des recommandations des 12 études. À l'évidence il n'existe pas de consensus clair pour atteindre la décarbonation de l'industrie maritime à l'horizon 2050. En revanche, un examen approfondi révèle un accord partiel sur deux points : le choix dans les combinaisons de carburants de remplacement; et la façon dont les carburants de remplacement influencent les types de navires et les services maritimes.

3.5.1. Choix de carburants écologiques

Le GNL est considéré comme un carburant de remplacement dans 11 études. Seule l'étude de Brahmin *et al* (2019) [9] ne l'identifie pas comme une possibilité. L'attrait du GNL s'explique par sa disponibilité, son faible prix et sa capacité de réduire les émissions de CO₂ de 25 %. Bien que le GNL soit utile pour réduire les émissions de carbone à court terme, plusieurs études en étendent l'usage au-delà de l'horizon 2030, notamment Munim *et al* (2023) [17] qui suggèrent de combiner le GNL avec l'énergie éolienne. L'utilisation de GNL vert est facilitée grâce aux biocarburants et aux processus d'électrolyse.

Les biocarburants font l'objet d'attention dans sept études. DNV (2019) [10], WWF (2020) [12], IMAR (2021) [14] et Carlyle *et al* (2023) [16] font le choix de biocarburants pour remplacer les carburants traditionnels dans les flottes existantes. Les études de Hansson *et al* (2019) [11] et de Lloyd's Register (2023) [18] mentionnent les biocarburants comme solutions de rechange probables. Deux types de biocarburants dominent les propositions : le biodiesel et le biométhane. L'étude de Lloyd's Register (2023) [18] suggère que le biométhane présente le potentiel de conquérir une part significative du marché des carburants de remplacement pouvant atteindre 34 %. L'étude de l'ICCT (2024) [19] ne propose pas de recommandations précises, mais elle porte une grande attention à la gamme étendue des biocarburants. L'étude reconnaît des différences dans la qualité des biocarburants en fonction des types de cultures et de leurs disponibilités. Les autres études accordent moins d'importance aux biocarburants en raison des problèmes liés à la disponibilité des matières premières d'origine agricole.

Tableau 3. Sommaire des résultats de 12 études

Auteur principal	Recommandations
[8] Balcombe <i>et al</i> (2019)	Les résultats révèlent que l'utilisation de carburants de remplacement couplés à des technologies serait en mesure d'atteindre une diminution de 50 % des émissions de GES. Mais si le but est de réduire de 80 % les émissions alors seul le biométhane saurait réussir.
[9] Brahmin <i>et al</i> (2019)	Le Danemark pourrait atteindre la carboneutralité à l'horizon 2050 en utilisant les technologies existantes. Les carburants à faible émission de carbone sont trop onéreux à moins de l'imposition d'une taxe carbone de €350-450/tonne.
[10] DNV (2019)	Il est peu probable qu'une adhésion massive de carburants de remplacement relativement chers et au potentiel de réduction significative des émissions de GES puisse être envisagée jusqu'à ce qu'elle soit requise par la réglementation ou qu'elle bénéficie d'importantes mesures incitatives.
[11] Hansson <i>et al</i> (2019)	Les carburants les mieux classés sont le GNL, le mazout lourd, le méthanol fossile et les biocarburants ce qui suggère l'importance de taxes carbone pour compenser les coûts élevés des carburants à faibles émissions de carbone.
[12] WWF (avec DNV) (2020)	Le rapport ne classe pas les carburants de remplacement mais reconnaît qu'ils ont un rôle majeur dans la décarbonation de l'industrie maritime en conjonction avec une amélioration de l'efficacité énergétique des navires. Le rapport souligne aussi l'influence de la réglementation, des taxes et subventions et de la coopération gouvernement-industrie.
[13] Xing <i>et al</i> (2023)	Le méthanol produit à partir de la biomasse obtient les meilleurs résultats. L'hydrogène et l'ammoniac sont recommandés pour le transport maritime sur courte distance ainsi que les biocarburants si les approvisionnements sont disponibles.
[14] IMAR (2021)	Quatre carburants de remplacement sont favorisés : le GNL, le gaz naturel renouvelable, l'ester méthylique d'acide gras (EMAG) et l'huile végétale hydrogénée (HVO).
[15] ABS (2023)	L'étude suggère que les carburants ne sont pas seulement une source d'énergie mais représentent aussi des cargaisons importantes pour le transport de carburants carboneutres qui présentent d'importantes potentialités commerciales. Deux des trajectoires proposées concernent le commerce de l'hydrogène et de l'ammoniac. L'étude suggère que l'industrie doit développer de nouvelles conceptions de navires, de nouvelles technologies de moteur et de nouvelles méthodes de manutention des carburants de remplacement. Par ailleurs, une des trajectoires proposées est consacrée aux carburants fossiles qui comprend la capture du carbone.
[16] Carlisle <i>et al</i> (2023)	L'enquête présente le classement établi par le public : biocarburant > hydrogène > GNL > nucléaire > fioul lourd > ammoniac
[17] Munim <i>et al</i> (2023)	L'étude classe par ordre de priorités : fioul lourd > GNL > hybride fioul lourd/éolien > hydrogène > ammoniac
[18] Lloyd's Register (2023)	L'étude propose deux trajectoires en termes de carburants de remplacement à l'horizon 2050 : l'hydrogène et les biocarburants. La part de chaque type de carburant pourrait varier en fonction des coûts, des approvisionnements et des technologies.
[19] ICCT (avec ABS) (2024)	L'étude ne présente aucun classement des carburants de remplacement mais indique ceci : lorsque les carburants sont produits par la biomasse ou de l'électricité renouvelable, le méthanol, l'ammoniac et l'hydrogène liquide peuvent entraîner une réduction substantielle du cycle de vie des GES. Mais les carburants de remplacement comportent des coûts substantiels par rapport au diesel marin. En outre les connaissances sur le cadre réglementaire et les options d'alimentation pour les navires demeurent incomplètes.

Quelques études seulement considèrent l'hydrogène produit par électrolyse comme une solution à long terme pour décarboner l'industrie maritime. ABS (2023) [15] et Lloyds Register (2023) [18] ont produit des feuilles de route de décarbonation grâce à l'hydrogène. Ces études de même que celle de Xing *et al* (2023) [13] reconnaissent les avantages de l'hydrogène, mais nuancent leur évaluation en fonction des coûts et des défis de stockage à bord pour plusieurs types de navires. L'étude de Carlisle *et al* (2023) [16] ajoute que l'utilisation de l'hydrogène soulève d'importants problèmes d'acceptabilité.

L'ammoniac bénéficie d'un intérêt croissant en tant que carburant vert lorsque produit par électrolyse notamment en raison de la facilité de transport en comparaison à l'hydrogène. Les études d'ABS (2023) [15] et de Lloyds Register (2023) [18] appuient massivement l'utilisation de l'ammoniac en raison de son potentiel d'utilisation à long terme comme carburant de remplacement. Les deux études considèrent que l'ammoniac pourrait devenir le carburant le plus utilisé pour le transport océanique à l'horizon 2050. En fort contraste, Carlyle *et al* (2023) [16] indiquent que l'acceptabilité sociale de l'ammoniac est la moins élevée des carburants de remplacement en raison de sa dangerosité bien connue.

Le rôle du méthanol comme carburant de remplacement varie selon les études. Xing *et al* (2023) [13] estiment le méthanol vert comme le meilleur carburant de remplacement. Lloyds Register (2023) [18] en reconnaît l'importance, mais suggère que le méthanol sera remplacé par le biométhane à long terme. IMAR [14] attribue une faible cote au méthanol. L'étude d'ABS (2023) [15] suggère que l'intérêt actuel du méthanol est partiellement dû aux technologies existantes et aux récentes commandes de porte-conteneurs hybrides qui utilisent le méthanol. L'étude remet en question son exploitation future en comparaison à l'utilisation de l'ammoniac qui présente de meilleures perspectives de croissance.

Il ressort implicitement des études que l'adoption de carburants de remplacement sera différenciée en fonction du type et de la taille du navire ainsi que des caractéristiques et de l'étendue des routes maritimes commerciales. Ce constat est manifeste dans les études qui considèrent l'utilisation de l'électricité, des batteries et des piles à combustible comme des outils de décarbonation du transport maritime. Bien que ces sources d'énergie soient perçues comme des solutions au processus de décarbonation d'autres modes de transport et des opérations portuaires, l'utilisation de ces sources énergétiques par le transport maritime est confrontée à d'importantes limites. La taille de la plupart des navires marchands et la durée des séjours en mer excluent l'alimentation électrique et l'utilisation de batteries. L'alimentation électrique se limite aux opérations de navire dans les ports, aux traversiers sur des itinéraires maritimes courts et aux navires de petite taille qui participent au transport maritime sur courte distance (Laasma *et al*, 2022) [21]; Raftis *et al*, 2023 [22]).

Force est de reconnaître que les études accordent peu de précision et de couverture sur les feuilles de route de décarbonation en fonction de la taille des

navires, des types de marchandises et de la configuration des services. La plupart des études suggèrent que le GNL représente un carburant de remplacement flexible pour de multiples navires et divers types de trajets, mais seulement en tant que solution de décarbonation à court terme. Au-delà de 2030, la capacité de décarbonation du GNL diminue sauf s'il provient d'une source d'énergie renouvelable. À plus long terme, les études proposent l'hydrogène, l'ammoniac et le méthanol comme carburant de remplacement notamment dans leurs versions durables sans préciser toutefois la catégorie de navire qui conviendrait le mieux à ces carburants. Les études de Xing *et al* (2023) [13] et de Lloyds Register (2023) [18] accordent une attention particulière aux besoins de stockage de l'hydrogène à bord des navires et suggèrent que l'utilisation directe de l'hydrogène sera limitée à des navires de petite et moyenne taille et à des services sur courte distance dont des navires de passagers.

3.5.2. Considérations hors combustible

Les recommandations des 12 études dépassent largement la simple considération des carburants de remplacement. Les études mettent deux points en évidence.

Le premier point porte sur les améliorations technologiques en termes de réduction de la consommation énergétique des navires par une nouvelle conception des navires et par l'atténuation des retards dans les opérations maritimes (DNV (2019) [10], Hansson *et al* (2019) [11], WWF (2020) [12], Xing *et al* (2023) [13], ABS (2023) [15], Munim *et al* (2023) [17], ICCT (2024) [19]). Ces améliorations devraient permettre à l'industrie de répondre aux exigences réglementaires à l'horizon 2030, car elles n'exigent pas des ajustements significatifs dans l'utilisation et l'approvisionnement en carburant de remplacement et accordent du temps aux transporteurs pour statuer sur le choix de carburants de remplacement à des fins de décarbonation.

Le second point concerne les mesures économiques à long terme qui facilitent le processus de décarbonation du transport maritime. Plusieurs études soulèvent la pertinence des échanges des droits d'émission de carbone et des taxes sur le carbone comme outil de décarbonation (Balcombe *et al* (2019) [8], Brahmin *et al* (2019) [9], DNV (2019) [10], Hansson *et al* (2019) [11], Munim *et al* (2023) [17], ICCT (2024) [19]).

Ces propositions de solutions de décarbonation hors combustible sont perçues comme des moyens de surmonter les différences de coûts entre les combustibles fossiles et les alternatives écologiques. C'est expliqué de façon explicite dans l'étude de DNV (2019) [10] qui affirme qu'il est peu probable qu'une adhésion massive de carburants de remplacement onéreux et au potentiel de réduction significatif des émissions de GES puisse être envisagée jusqu'à ce qu'elle soit exigée par la réglementation ou qu'elle bénéficie d'importantes mesures incitatives.

4. Prise de décisions complexe

La comparaison systématique de 12 études révèle que la diversité des objectifs et des méthodologies ont conduit à des solutions diversifiées du bouquet énergétique pour décarboner l'industrie du transport maritime. La procédure d'évaluation des études présente l'avantage d'établir une série de « leçons à tirer » sur trois incertitudes persistantes aux carburants de remplacement : l'applicabilité du carburant, le prix du carburant et la cohérence réglementaire.

4.1. Diversification des combustibles

L'affirmation selon laquelle l'industrie du transport maritime mondial entreprendra un processus de décarbonation en fonction de divers types de combustibles est fondée sur trois considérations.

Premièrement, chaque armateur ou exploitant qui considère l'achat ou la location d'un nouveau navire ou qui convertit un navire dans le but d'utiliser un carburant à émissions de carbone faibles ou nulles, prend en compte des critères tels que la taille du navire, ses capacités, l'espace de chargement, la configuration des services et le type de moteur. Ces variables influencent inévitablement le choix de carburant sur les routes exploitées par les navires de la flotte.

Deuxièmement, la diversité des carburants écologiques présents sur le marché mondial des approvisionnements peut survenir des écarts entre les volumes de production et la disponibilité régionale des carburants de remplacement.

Troisièmement, les types de carburant et les caractéristiques des navires continueront d'évoluer en fonction des nouvelles technologies dans la production de carburant et d'avancées dans la conception des navires et la puissance des moteurs des navires de la marine marchande.

Le processus même de décarbonation du transport maritime contribue à la diversité des carburants considérant que les adaptations faites durant la décennie 2020 entraîneront des répercussions manifestes au cours de la décennie 2040. Les transformations progressives dans les carburants et le transport maritime durant les décennies 2030 et 2040 devraient modeler davantage l'industrie. Même si l'industrie se rassemble autour d'un nombre réduit de combustibles avant 2050, la flotte mondiale devrait utiliser une grande diversité de carburants. L'un des effets majeurs de cette diversité sera de complexifier les opérations d'avitaillement dans le futur avec des impacts significatifs pour les ports.

4.2. Coûts

La plupart des études utilisent un large éventail de critères pour évaluer et prioriser les carburants de remplacement, mais le coût est le facteur qui retient le plus

d'attention. À titre d'exemple, l'étude de Munim *et al* (2023) [17] utilise 9 critères, mais l'analyse quantitative considère le coût de capitalisation comme le plus important, suivi du coût de carburant au deuxième rang, des enjeux de sécurité en troisième place et des coûts d'opération au quatrième rang.

Une étude comparative des prix des carburants suggère que les coûts des carburants écologiques sont présentement trois fois plus élevés que ceux des carburants conventionnels. C'est l'une des causes principales de l'incertitude concernant le choix de carburants de remplacement. La production de carburant vert devrait augmenter au fil du temps et conduire à une baisse des prix. Cependant de nombreuses inconnues persistent en ce qui concerne les échelles de prix et surtout sur la façon dont les carburants de remplacement seront transportés des principaux centres de production proposés, qui pour plusieurs sont éloignés des principaux marchés. En outre, l'effet sur les prix de la demande croissante de carburants écologiques en provenance du secteur manufacturier et d'autres modes de transport demeure incertain. Il est donc très probable que l'industrie maritime devra anticiper une hausse des prix du carburant dans sa transition vers un futur carboneutre. Cela entraîne plusieurs conséquences :

- Le coût du carburant pourrait représenter la plus importante composante des opérations maritimes. Cette situation augmentera l'importance du prix du fioul comme principal facteur dans le choix de carburant et incitera les exploitants et armateurs à identifier des solutions à l'amélioration du rendement des moteurs de navire.
- Selon l'écart des prix entre les carburants verts du futur, les coûts du carburant pourraient changer l'importance traditionnelle des coûts en capitaux dans la structure économique générale du transport maritime et entraîner des conséquences sur le renouvellement des flottes et le rôle de l'affrètement.
- La progression des coûts des carburants entraînera des répercussions sur les taux de fret. Le transport maritime est traditionnellement un mode de transport à coût relativement bas facilitant ainsi les processus globaux. L'augmentation des coûts des carburants pourrait amplifier davantage la recherche d'économies d'échelle pour le transport maritime ou mener à une plus grande économie de proximité.

4.3. Réglementations

Le rôle des réglementations à déterminer les processus de décarbonation du transport maritime est significatif. Il est possible de tracer les origines des préoccupations de l'OMI sur les impacts environnementaux du transport maritime depuis plusieurs décennies. Les actions de l'organisation pour établir des règles internationales obligatoires sur l'efficacité énergétique des navires en 2011, suivi de l'adoption de la stratégie initiale de l'OMI sur les GES [23] et de la stratégie révisée sur les émissions de GES des navires en 2023 se sont avérées particulièrement significatives.

L'industrie devra s'adapter à ces règles et à ces politiques, mais il apparaît évident que les règlements changent avec le temps. Cela ajoute une couche supplémentaire d'incertitudes aux prises de décision contemporaines sur le choix de carburant et le renouvellement des flottes. Déjà en avril 2025 l'OMI annonçait un projet de règlement qui a pour objet d'introduire un cadre juridiquement contraignant de réduction des émissions de GES des navires ainsi qu'un mécanisme global de tarification des émissions de GES. Ces règlements doivent être formellement adoptés en octobre 2025 et entrés en vigueur en 2027 [26].

Par ailleurs, les capacités de l'OMI à mener à terme les réglementations environnementales à travers le monde ne cessent d'être préoccupantes (Bach *et al*, 2023 [24]; Monios *et al* 2021) [25], ce qui affaiblit la capacité d'assurer des conditions de concurrence équitables auxquelles l'industrie peut s'adapter. En outre, les interventions internationales s'étendent aux niveaux national, régional et local tels que les ports et les villes qui réduisent les frais portuaires pour les navires carboneutres ou imposent des pénalités aux navires qui ne répondent pas aux normes de l'OMI. Ces multiples facteurs compliquent les conditions de développement du transport maritime dans une période d'intenses bouleversements.

Une autre dimension des impacts de la réglementation concerne les normes pour la manutention, le stockage et l'utilisation des carburants. Certaines normes et méthodes sont bien établies pour les combustibles fossiles, mais il y a de nombreuses lacunes à combler en matière de carburants de remplacement. L'utilisation de carburants à point d'éclair bas tels que le méthanol et l'ammoniac sont de bons exemples puisque les normes détaillées et explicites ne sont pas encore entièrement mises en place. De surcroît l'utilisation de plusieurs biocarburants attend la mise en vigueur de nouveaux règlements. En outre l'utilisation de l'hydrogène pour le transport maritime demeure un chantier en évolution. Ces lacunes peuvent certes être comblées, mais les normes précises qui seront établies peuvent entraîner des coûts supplémentaires et des conséquences opérationnelles qui modifieront les avantages comparatifs.

5. Conclusion

L'élaboration d'une feuille de route pour atteindre la décarbonation du transport maritime représente un défi. Certaines des propositions présentées il y a seulement quelques années sont déjà considérées comme invalides en raison d'avancées novatrices. Les technologies navales continuent de progresser alors que les disponibilités et les coûts des carburants de remplacement évoluent continuellement. L'industrie maritime elle-même est trop diversifiée pour s'adapter facilement au passage des combustibles fossiles vers les carburants de remplacement dont l'efficacité commerciale n'est toujours pas encore établie. Un important facteur de changement, la réglementation, change aussi. Mais alors que l'approche de l'OMI est de formuler des objectifs globaux, les organisations locales

et régionales élaborent des plans d'action supplémentaires qui entraînent un grand nombre d'incertitudes.

L'Union européenne est particulièrement active dans l'établissement d'obligations environnementales pour les flottes et les ports. Inévitablement, des navires ne font pas escale hors des frontières régionales, mais une frange importante de la flotte maritime mondiale effectue régulièrement des voyages internationaux. La prolifération de normes et de règlements complique les conditions du transport maritime.

À court et à moyen terme, durant les années 2020 et 2030, les réponses à la décarbonation de l'industrie maritime seront plus diversifiées. L'industrie maritime expérimente actuellement divers modes d'exploitation et teste plusieurs types de carburant. Certains essais peuvent réussir et être étendus, d'autres pourraient échouer, et d'autres possibilités encore pourraient apparaître pouvant mener à de nouvelles stratégies de décarbonation. Il en résulte qu'une grande diversité d'options de réduction des émissions de GES devrait surgir étant donné que les choix de carburants de remplacement sont effectués par diverses compagnies maritimes qui doivent fonder leurs achats de navires et de carburants en fonction de leurs intérêts commerciaux et des exigences dans la configuration de leurs services.

Les défis de décarbonation auxquels est confrontée l'industrie maritime internationale sont énormes. Les objectifs réglementaires évoluent et les moyens de les atteindre demeurent incertains. La revue de récentes propositions de parcours fournit des indications sur l'adoption possible de carburant, mais suggère aussi que l'utilisation future de carburant concernera plusieurs types de carburant. Les écarts de prix et les caractéristiques opérationnelles des navires sont susceptibles d'être des facteurs décisifs. La transformation du transport maritime au cours des 25 prochaines années constitue une révolution similaire à celle survenue à la fin du 19^e siècle lorsque la voilure a été remplacée par des combustibles fossiles.

Références

- [1] IMO (2023) *Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted*, [En ligne],
[\[https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx\]](https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx).
- [2] J.D. Ampah, A.A. Yusuf, S. Afrane, C. Jin & H. Liu (2021) «Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector», *Journal of Cleaner Production*, 320
- [3] E.A. Bouman, E. Lindstad, A.I. Rialland & A.H. Strømman (2017) «State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52: 408-421.
- [4] J. Martins & F.P. Brito (2020) «Alternative Fuels for Internal Combustion Engines», *Energies*, 13(16), 33 p.
- [5] M.S. Eide, C. Chryssakis & Ø. Endresen (2013) «CO₂ abatement potential towards 2050 for shipping, including alternative fuels», *Carbon Management*, 4(3): 275-289.
- [6] J. Ren & M. Lützen, (2017) «Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17: 1003-1019.
- [7] B. Slack, U.P. Nguyen, S. Novikov & C. Comtois (2024) *Décarbonation du transport maritime : examen systématique des carburants de remplacement et des technologies vertes*, Publication No. CIRRELT 2024-13, Montréal: Université de Montréal, 54 p. [En ligne],
[\[https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2024/05/RAPPORT2024_maritime_Carburant-Techno_verts_QC.pdf\]](https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2024/05/RAPPORT2024_maritime_Carburant-Techno_verts_QC.pdf).
- [8] P. Balcombe, J. Brierley, C. Lewis, L. Skatvedt, J. Spiers, A. Hawkes & P. Staffell (2019) «How to decarbonise international shipping: options for fuels, technologies and policies», *Energy Conversion and Management* 182: 72-88.
- [9] T.S. Brahmin, F. Wiese, M. Munster (2019) «Pathways to Climate-Neutral Shipping; a Danish case study», *Energy*, 188, 30 p.
- [10] DNV (2019) *Comparison of Alternative Marine Fuels*. Report No. 2019-0567, 69 p.

- [11] J. Hansson, S. Månsson, S. Brynolf & M. Grahm (2019) «Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders», *Biomass and Bioenergy*, 126: 159-173.
- [12] WWF – Canada (2020) *An Opportunity for Zero-Emission Shipping in Canada*, Report prepared by DNV-G, 64 p.
- [13] H. Xing, C. Stuart, S. Spence & H. Chen (2023) «Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050», *Journal of Cleaner Production*, 297.
- [14] IMAR (2021) *Les carburants alternatifs dans le transport maritime au Québec*, Rimouski : Institut maritime du Québec, 103 p.
- [15] American Bureau of Shipping (ABS) (2023) *Beyond the Horizon: view of the emerging energy value chains*. Spring: ABS, 93 p.
- [16] D.P. Carlisle, P.M. Feetham, M.J. Wright, D.A. & H. Teagle (2023) «Public response to decarbonisation through alternative shipping fuels», *Environment, Development and Sustainability*, 26: 20737-20756.
- [17] Z.M. Munim, M.M.H. Chowdhury, T. Tusher & T. Notteboom (2023) «Towards a prioritization of alternative energy sources for sustainable shipping», *Marine Policy*, 152.
- [18] Lloyd's Register (2023) *The future of maritime fuels: what you need to know*, Lloyd's Register Maritime Decarbonisation Hub, 39 p.
- [19] ICCT (2024) *Feasibility Study of Future Energy Options for Great Lakes Shipping*, International Council on Clean Transportation (Report prepared with DNV-G, 135 p.
- [20] International Energy Agency (2020) *World Energy Outlook*, Paris: IEA, 463 p.
[En ligne],
[\[https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020\]](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020),
- [21] A. Laasma, R. Otsason, U. Tapaninen & O. Hilmola (2022) «Evaluation of Alternative Fuels for Coastal Ferries», *Sustainability*, 14.
- [22] C.C. Raftis, T. Vanelslander, E. van Hassel (2023) «A Global Analysis of Emissions, Decarbonization, and Alternative Fuels in Inland Navigation – A Systematic Literature Review», *Sustainability*, 15.
- [23] IMO (2018) *Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, Resolution MEPC.304 (72) (adopted on 13 April 2018), London: International Maritime Organization.

[24] H. Bach, & T. Hansen (2023) «IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy», *Marine Policy*, 147.

[25] J. Monios & A.K.Y. Ng (2021) «Competing institutional logics and institutional erosion in environmental governance of maritime transport», *Journal of Transport Geography*, 94.

[26] IMO (2025) *Draft regulations will set mandatory marine fuel standard and GHG emissions pricing for shipping to address climate change*. April. London: International Maritime Organization.

[27] ABS, CE Deft & Arcsilea (2023) *Update on Potential of Biofuels in Shipping*. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 205 p.

[28] IMAR (2022) *Domestic Great Lakes and St. Lawrence Shipping Industry: Transition to Biofuels*. Rimouski: Institut maritime du Québec, 35 p.