

CONCEPTION DES NAVIRES ET TECHNOLOGIES DE RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX





À propos de Clear Seas

Clear Seas est une organisation canadienne indépendante sans but lucratif qui fournit de l'information factuelle afin de permettre aux gouvernements, à l'industrie et au public de prendre des décisions éclairées en matière de transport maritime. Elle cherche ainsi à susciter la prise de conscience et la confiance pour que chacun ait le sentiment de faire partie intégrante du secteur maritime, secteur qu'elle conçoit comme durable, sécuritaire, dynamique et ouvert à tous, aujourd'hui et pour les générations à venir.

Les études et publications de Clear Seas peuvent être consultées sur clearseas.org.

Conseil d'administration de Clear Seas

Serge Le Guellec

Ancien président et directeur général de Transport Desgagnés Inc. (Québec, Qc)

Julie Gelfand

Ancienne commissaire à l'environnement pour le Vérificateur général du Canada (Ottawa, Ont.)

Aldo Chircop

Professeur et titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur le droit et la politique maritimes à l'Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

Ginny Flood

Ancienne vice-présidente aux relations gouvernementales pour Suncor Energy Inc. (Calgary, Alb.)

Udloriak (Udlu) Hanson

Vice-président du développement communautaire et stratégique pour Baffinland Iron Mines (Iqaluit, Nun.)

Capitaine Shri Madiwal

Vice-président aux opérations et à la chaîne d'approvisionnement pour l'Administration portuaire Vancouver Fraser (Vancouver, C.-B.)

Richard Sparrow

Directeur de la conservation dirigée par des Autochtones à la Grizzly Bear Foundation, et conseiller élu de xwməθkwəyəm (Bande indienne de Musqueam) (Vancouver, C.-B.)

Anthony Teo

Ancien responsable des Amériques pour Rightship (Houston, Texas)

Jane Weldon

Ancienne cheffe exécutive du Plan de protection des océans à Transports Canada, et ancienne directrice générale de la Sécurité et sûreté maritimes (Ottawa, Ont.)

Équipe de recherche et auteurs du rapport



ABL Consulting

Stefano Scarpa, Directeur – Décarbonation maritime

Carlos Pichel Montoya, Architecte naval senior



Dillon Consulting

Emily Davis, Gestionnaire de projet

Dave Creber, Responsable, gestion environnementale



University of British Columbia

Simone Philpot, Chercheuse postdoctorale

Amanda Giang, Professeure associée, Département de génie mécanique



Clear Seas

Clara Kaufmann, Responsable de la recherche

Résumé

Le transport maritime est essentiel à l'économie et à la société. Cependant, les navires grossissent et leur nombre augmente, si bien qu'on s'interroge aussi de plus en plus sur leurs possibles impacts négatifs sur l'environnement, qu'ils soient le résultat d'accidents ou simplement des activités de navigation normales. Les navires produisent des polluants atmosphériques, font du bruit, et rejettent dans la mer des déchets et des produits chimiques. Tout cela perturbe les écosystèmes, précieux et fragiles, où ces navires circulent. Si nous voulons en venir à éliminer l'impact du transport maritime, il nous faut tenir compte de tous les effets.

Pour ce faire, la technologie propose plusieurs pistes. Mais les navires sont des systèmes complexes, et l'ensemble des technologies à bord doivent être compatibles, être utilisées en toute sécurité, et contribuer à l'atteinte des objectifs économiques et opérationnels. L'éventail des technologies offertes s'élargit sans cesse. Or, les navires sont des espaces restreints de conception complexe; , il n'est donc pas aisé de décider quand et comment innover en y introduisant de nouvelles technologies pour améliorer la performance environnementale.

La présente étude fait ressortir 28 technologies de réduction des impacts environnementaux en développement ou déployées dernièrement sur de nouvelles constructions ou dans le cadre de projets de modernisation de bâtiments. On peut les regrouper sous les catégories suivantes :

- Amélioration de l'hydrodynamique (7)
- Amélioration de l'aérodynamique (1)
- Amélioration de l'armement (7)
- Amélioration de la propulsion (9)
- Améliorations opérationnelles (4)

Ces technologies sont prometteuses pour réduire les conséquences environnementales suivantes du transport maritime :

- Émission de gaz à effet de serre (GES) et pollution atmosphérique
- Bruit, vibration et autres perturbations physiques
- Pollution de l'eau due aux rejets des navires
- Introduction d'espèces envahissantes

La vaste majorité des technologies relevées ici sont plutôt tournées vers la réduction des GES et de la pollution atmosphérique, les trois autres domaines n'étant couverts que dans une moindre mesure. On peut supposer que cette situation est due au désir de se conformer à la réglementation en matière de pollution atmosphérique et de réduire les coûts grâce aux économies de carburant.

La conception des navires est habituellement un processus itératif et spiralaire. Les décisions sont revues et raffinées à répétition à mesure que les plans se précisent, le but étant de respecter toutes les exigences opérationnelles, réglementaires et budgétaires. L'armateur, le concepteur, et le chantier naval participent tous à ce processus, chacun apportant sa contribution à différents moments pour s'assurer que le navire remplira bien tous les objectifs fixés. La sélection des technologies dépend du contexte et des parties prenantes en jeu dans chaque cas. L'analyse du processus de conception pour les nouvelles constructions et les projets de modernisation des navires a révélé à quel point les décisions étaient influencées par les questions de coûts et de conformité réglementaire. En regard de ces deux éléments, la réduction des impacts environnementaux n'est qu'une préoccupation secondaire – sauf quand la réglementation en vigueur force à en tenir compte.

Certains outils sont utiles pour orienter les décisions concernant les technologies de réduction des impacts environnementaux. Ces outils permettent de réduire les incertitudes, d'empêcher certaines erreurs, de soupeser les avantages et inconvénients des options (avec les compromis liés à chacune), d'augmenter la traçabilité, de s'adapter aux modifications réglementaires, et d'évaluer les interactions entre les technologies. On a toutefois remarqué en préparant cette étude que les outils décisionnels formels étaient peu utilisés par les concepteurs et les décideurs.

Le présent rapport rassemble les pratiques décisionnelles trouvées auprès des architectes, constructeurs et propriétaires navals qui choisissent de réduire les impacts environnementaux. Il servira de catalogue de référence, mais sera aussi utile à toute personne souhaitant comprendre comment accroître l'adoption de ce type de technologie.

Acronymes et abréviations

ACH	ailettes de casque d'hélice
AER	Annual Efficiency Ratio (coefficient du rendement annuel)
AESM	Agence européenne pour la sûreté maritime
AMCEZ	autres mesures de conservation efficaces par zone
AMP	aires marines protégées
BWMS	Ballast Water Management Systems (systèmes de gestion des eaux de ballast)
C.-B.	Colombie-Britannique
CCB	capture du carbone à bord
CES	conduits d'égalisation de sillage
CH ₄	méthane
CO ₂	dioxyde de carbone
COV	composés organiques volatils
CVC	chauffage, ventilation et climatisation
dB	décibel
DEL	diode électroluminescente
DP	dynamic positioning (positionnement dynamique)
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EEDI	indice nominal de rendement énergétique
EEXI	Energy Efficiency Existing Indicator (indice d'efficacité énergétique des navires existants)
EGCS	Exhaust Gas Cleaning Systems (dispositifs d'épuration des gaz d'échappement)
EPA	United States Environmental Protection Agency
éq. CO ₂	équivalent CO ₂
ESG	environnemental, social et de gouvernance
ESI	Environmental Ship Index (indice environnemental des navires)
GCC	Garde côtière canadienne
GES	gaz à effet de serre
GFS	GHG Fuel Standard (norme sur les carburants à faible émission de GES)
GNL	gaz naturel liquéfié
HEPA	High-Efficiency Particulate Air (filtre à haute efficacité)
HFO	Heavy Fuel Oil (mazout lourd)
IA	intelligence artificielle
IIC	indicateur d'intensité carbone
JAT	juste-à-temps
km	kilomètres
km ²	kilomètres carrés
L	litre
m	mètre
m ³	mètres cubes
MEPC	Marine Environment Protection Committee (Comité de protection du milieu marin)
MFN	mécanique des fluides numérique
MPO	Ministère des Pêches et Océans
N ₂ O	oxyde nitreux
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

NO _x	oxydes d'azote
OMI	Organisation maritime internationale
PM	particules (particulate matter)
RCS	réduction catalytique sélective
RGE	dispositif de recirculation des gaz d'échappement
ROMM	Réseau d'observation de mammifères marins
SEQE	système d'échange de quotas d'émission
SIG	Système d'information géographique
SO _x	oxydes de soufre
SPS	Special Purpose Ships (navire à usage spécial)
TC	Transports Canada
UBC	University of British Columbia (Université de la Colombie-Britannique)
UE	Union européenne
URN	underwater radiated noise (bruit rayonné sous-marin)
VFD	Variable Frequency Drive (variateur de fréquence)
VTC	Variation to Contract (clause de variation de contrat)
ZCE	zones de contrôle des émissions

Table des matières

À propos de Clear Seas	ii
Conseil d'administration de Clear Seas	iii
Équipe de recherche et auteurs du rapport	iv
Résumé	
Acronymes et abréviations	vii
1.0 Introduction	10
1.1 Visée et objectifs de l'étude	10
1.2 Approche et méthodologie	11
2.0 Impacts environnementaux de la navigation maritime	12
2.1 Émission de gaz à effet de serre et pollution atmosphérique	12
2.2 Bruits et vibrations d'origine anthropique	13
2.3 Rejets opérationnels et accidentels	13
2.3.1 Propagation d'espèces envahissantes par les eaux de ballast	13
2.3.2 Eaux grises et eaux noires	14
2.3.3 Eaux de lavage des épurateurs	14
2.3.4 Déchets solides	14
2.3.5 Eaux de cale et déchets d'hydrocarbures	15
2.4 Impacts biophysiques	15
3.0 Technologies de réduction des impacts environnementaux des navires	16
3.1 Technologies de réduction des impacts environnementaux connues	16
3.1.1 Améliorations de l'hydrodynamique	16
3.1.2 Améliorations de l'aérodynamique	32
3.1.3 Améliorations de l'armement	33
3.1.4 Améliorations de la propulsion	36
3.1.5 Améliorations opérationnelles	48
3.2 Impacts environnementaux influencés par les technologies	50
4.0 Conception de navires : priorités et processus décisionnel	52
4.1 Portrait du processus décisionnel dans la conception de navires	52
4.2 Rôles et responsabilités dans le processus décisionnel	53
4.3 Priorités au stade de la conception	55
4.4 Priorités au stade de la construction	56
4.4.1 Projets de nouvelles constructions	56
4.4.2 Projets de modernisation	58
4.5 Incitatifs, sanctions et sélection de technologies	59
4.6 Risques et incitatifs dans le processus décisionnel	59
4.7 Importance de l'ampleur des opérations dans le processus décisionnel	60
4.8 Prise en considération de l'incertitude dans le processus décisionnel	60
4.9 Outils d'aide au processus décisionnel	61
5.0 Conclusion	62
6.0 Références	63

1.0 Introduction

1.1 Visée et objectifs de l'étude

On prend de plus en plus conscience de l'étendue des répercussions que les navires ont sur l'environnement. Même lorsqu'ils fonctionnent normalement et de manière sécuritaire, les navires peuvent générer de la pollution atmosphérique, des rejets chimiques, des gaz à effet de serre et de la pollution sonore, ou encore perturber les habitats et y introduire des espèces envahissantes. Les technologies visant à atténuer ces impacts se multiplient, mais il peut être difficile de s'y retrouver et de faire des choix éclairés, d'autant plus que certaines technologies (comme les épurateurs ou les revêtements de la coque) peuvent avoir des effets secondaires inattendus. Les interactions ne sont pas faciles à envisager, vu leur complexité.

Pour que le transport maritime atteigne un impact zéro, il faudra mettre en place un nouvel ensemble d'outils décisionnels qui aideront l'industrie à évaluer les impacts et à distinguer les solutions possibles pour mettre en place les plus porteuses. Le projet Transport maritime à impact zéro, mené par Clear Seas en collaboration avec le Conseil national de recherches Canada (CNRC) et l'Université de la Colombie-Britannique (UBC), vise justement à concevoir un tel cadre d'évaluation.

Dans le cadre du projet Transport maritime à impact zéro, les chercheurs ont choisi Dillon-ABL pour mener une étude visant spécifiquement à examiner et rassembler les pratiques décisionnelles des architectes, constructeurs et propriétaires navals concernant les technologies de réduction des impacts environnementaux. Ce rapport en présente les constats et recense les technologies de réduction des impacts actuellement disponibles.

Les technologies évaluées dans le présent rapport sont principalement des technologies maritimes non axées sur les carburants, et excluent donc les carburants marins de remplacement. Ceux-ci ont déjà été largement étudiés pour leurs émissions moindres de GES, alors que les autres technologies de réduction des impacts environnementaux sont moins connues. Les carburants à faible teneur en carbone coûtent cher à mettre au point et à produire; parce qu'elles améliorent l'efficacité et permettront de réduire la consommation de ces carburants rares, les technologies non axées sur les carburants sont et demeureront essentielles.

L'étude poursuivait deux grands buts :

- Lister les technologies de réduction des impacts environnementaux actuellement employées ou envisagées dans la conception des navires.
- Schématiser le processus décisionnel entourant les étapes de conception des navires et d'acquisition de technologies pour améliorer la performance environnementale.

Ce travail augmentera la compréhension des technologies de réduction des impacts environnementaux et du processus décisionnel entourant le choix de ces technologies pour un navire, en plus de contribuer à l'élaboration du cadre décisionnel du projet Transport maritime à zéro impact.

1.2 Approche et méthodologie

Pour produire cette étude, nous avons effectué une analyse documentaire des technologies, consulté des spécialistes du domaine, eu des entretiens semi-structurés avec des professionnels de la conception navale et examiné plusieurs études de cas. Voici les étapes suivies :

Étape 1. Étude technologique

Réalisation d'une analyse documentaire des technologies de réduction des impacts environnementaux des navires. L'équipe de recherche de la UBC a consulté les moteurs de recherche universitaires, les références d'articles et les algorithmes de recommandations de revues de recherche pour rassembler de la documentation. L'équipe de Dillon-ABL en a ensuite produit une synthèse présentant le paysage technologique actuel et les technologies clés envisagées par les acteurs du secteur et en recherche.

Étape 2. Consultation des spécialistes du domaine

L'équipe de Dillon-ABL a analysé les options technologiques en usant de son expertise interne en génie maritime, en architecture navale et en décarbonisation pour expliquer les finesses propres aux différentes technologies de réduction des impacts environnementaux et leurs applications concrètes.

Étape 3. Entretiens ciblés

L'équipe de recherche de la UBC a réalisé, en concertation avec l'équipe de Dillon-ABL, des entretiens ciblés avec des professionnels de diverses organisations (privées et publiques) du secteur de la conception navale afin de mieux saisir les processus de mise en œuvre et de prise de décision liés aux technologies de réduction des impacts environnementaux. Les renseignements recueillis ont ensuite été examinés pour revoir, confirmer et ajuster les éléments qui étaient ressortis de l'analyse documentaire et les conclusions qu'avait tirées l'équipe de Dillon-ABL sur la manière dont les décisions sont habituellement prises concernant l'adoption des technologies de réduction des impacts.

Étape 4. Validation

L'équipe de Dillon-ABL a échangé avec des membres de son réseau professionnel (intervenants clés, experts du secteur, organisations phares) pour valider et compléter les données issues des entretiens. Elle a ainsi pu vérifier ses constats, recueillir des données supplémentaires et augmenter la fiabilité et la crédibilité des résultats présentés.

2.0 Impacts environnementaux de la navigation maritime

La navigation maritime a des répercussions physiques, chimiques, biologiques et acoustiques sur l'environnement. En s'appuyant sur la revue de la littérature et les avis d'experts glanés lors d'entretiens, la présente section en propose un tour d'horizon. Ce sont ces impacts environnementaux qui sont visés par les technologies répertoriées dans la prochaine section.

2.1 Émission de gaz à effet de serre et pollution atmosphérique

Les moteurs de navires rejettent dans l'atmosphère du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4), de l'oxyde nitreux (N_2O), des oxydes d'azote (NO_x), des particules, du carbone noir, des composés organiques volatils (COV), des oxydes de soufre (SO_x) et des substances appauvrissant la couche d'ozone (Walker et al., 2019; Transports Canada, 2010). Ces polluants ont des effets conséquents sur l'environnement et la santé humaine. Par exemple, les NO_x contribuent à la formation d'ozone troposphérique (ou smog) lorsqu'ils réagissent avec les composés organiques volatils (COV) en présence de la lumière du soleil (Transports Canada, 2010). Ils entrent également dans la formation de pluies acides et augmentent les charges en éléments nutritifs, ce qui entraîne la prolifération des algues (de Vries, 2021). Les SO_x se répandent à des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, contribuant à la dissémination de particules nuisibles pour la santé et aux pluies acides, qui ont des conséquences écologiques destructrices (EPA, 2023, a, b). L'ozone troposphérique est nocif pour les humains et cause des décès prématurés et une perte de productivité (Santé Canada, 2021). On sait qu'il perturbe aussi les écosystèmes en réduisant la productivité primaire et l'absorption de CO_2 , et en induisant une sénescence prématurée chez les plantes (ECCC, 2011). Selon les acteurs de l'industrie qui cherchent des solutions technologiques pour en réduire l'impact, la pollution atmosphérique est un enjeu d'une importance primordiale; dans les entretiens, on considérerait d'ailleurs la réduction des gaz à effet de serre (GES) comme une priorité absolue.

Les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) n'ont pas tous le même potentiel de réchauffement climatique ou la même durée de vie. En s'accumulant dans l'atmosphère, ils provoquent ce qu'on appelle un effet de serre, qui intensifie le réchauffement atmosphérique. Le carbone noir contenu dans les gaz d'échappement des navires exacerbe encore cet effet. La combustion de carburant dans les moteurs des bateaux rejette de grandes quantités de CO_2 . En 2018, les émissions mondiales du transport maritime s'élevaient à 1 056 millions de tonnes (Deng et Mi 2023), soit 2,9 % des émissions anthropiques mondiales de CO_2 (Commission européenne, s.d). Le gaz naturel liquéfié (GNL), utilisé comme carburant dans le transport maritime, entraîne quant à lui une fuite de méthane, c'est-à-dire le rejet de méthane non brûlé qui n'a pas été complètement consommé par le moteur.

Les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre (GES) dépendent du type de carburant, du moteur, des technologies intégrées pour gérer les polluants et de l'efficacité du moteur des navires (Walker et al., 2019). Entre 2012 et 2018, on estime que les émissions de CO_2 générées par le transport maritime ont augmenté de 11 % et les émissions de méthane de 145 %, en raison de l'utilisation accrue du GNL comme carburant marin. Selon les prédictions, en l'absence d'efforts politiques supplémentaires, ces émissions augmenteront de 16 % entre 2018 et 2030, et de 50 % d'ici 2050 (International Council on Clean Transportation, s.d.).

2.2 Bruits et vibrations d'origine anthropique

Le transport maritime commercial est devenu, ces dernières années, une source de plus en plus importante de bruits sous-marins d'origine anthropique (aussi appelés bruit rayonné sous-marin ou URN, pour Underwater Radiated Noise). Les bruits sont principalement générés par l'hélice et les machineries à bord des navires (Transports Canada, 2020). Les navires produisent des fréquences sonores basses qui se propagent sur de très grandes distances en milieu marin. Le bruit rayonné sous-marin peut interférer avec les fréquences utilisées par les mammifères marins pour communiquer, s'orienter, se nourrir et se reproduire. Ces interférences constituent une menace pour plusieurs espèces (Transports Canada, 2020). Pour de nombreux participants interrogés dans le cadre du rapport, les bruits et vibrations d'origine anthropique représentaient une préoccupation majeure. Toutefois, l'intensité de leur impact semble varier en fonction de l'industrie ou de la région, mais elle est particulièrement notable dans les zones où le bruit rayonné sous-marin affecte la faune marine, par exemple la population d'épaulards résidents du Sud vivant dans les eaux de la Colombie-Britannique, au Canada.

Une étude menée entre 2015 et 2018 dans le détroit de Georgie, au large de la côte Pacifique canadienne, a révélé que les porte-conteneurs de plus de 200 m de long, les vraquiers de plus de 200 m de long, les traversiers, les navires-citernes et les vraquiers de moins de 200 m de long étaient les cinq classes de navires les plus bruyantes. Leur niveau moyen de bruit rayonné se situaient entre 189,7 dB pour les porte-conteneurs de plus de 200 m de long et 185,9 dB pour les vraquiers de moins de 200 m de long (Port de Vancouver, 2019). Le bruit dépend également de la vitesse du navire, de sa conception, ainsi que de l'entretien de l'hélice et de la coque (OMI, 2013b). Toutefois, le volume absolu ne devrait pas être le seul critère à prendre en considération lors de l'évaluation des impacts des URN; il faut aussi tenir compte de la constance du bruit que produit la circulation au fil du temps, même à des niveaux plus faibles. Le bruit est un problème particulièrement chronique dans les zones côtières proches des voies de navigation, des routes de traversiers et des ports, d'autant plus que l'habitat essentiel des baleines et les principales routes maritimes se recoupent (Breeze et al., 2022). Les répercussions du bruit sur les mammifères marins sont difficiles à évaluer et procèdent de nombreux facteurs, dont la salinité, le type de bruit, les conditions du fond océanique, la température, la vulnérabilité des espèces et la profondeur de l'eau (Bradley et Stern, 2008).

2.3 Rejets opérationnels et accidentels

De par ses activités et parfois par accident, le transport maritime rejette des polluants dans l'environnement marin. Les rejets accidentels sont dus à des incidents imprévus (ex. fuites ou déversements), tandis que les rejets opérationnels sont causés par les activités usuelles des navires. Ils comprennent, sans s'y limiter, les déchets, les carburants, les lubrifiants et produits chimiques, qui posent tous des risques environnementaux et nécessitent des stratégies de gestion efficaces. Voici quelques exemples de rejets opérationnels et accidentels :

2.3.1 Propagation d'espèces envahissantes par les eaux de ballast

L'eau retenue dans les citernes de ballast est régulièrement pompée dans les eaux environnantes afin d'assurer la stabilité du navire en réponse aux changements de poids de la cargaison ou aux conditions en mer. Étant donné que les eaux de ballast peuvent contenir des espèces marines, des microbes et de nombreux autres éléments, elles contribuent, quand elles sont rejetées, à l'introduction d'espèces envahissantes nuisibles. Les navires de transport maritime transfèrent globalement environ 3 à 5 milliards de tonnes d'eaux de ballast par an (Walker et al., 2019). Bien que tous les navires soient tenus de mettre

en œuvre un plan de gestion des eaux de ballast (résolution MEPC.50(31) du Comité de protection du milieu marin), cela n'empêche pas la propagation d'espèces aquatiques envahissantes (Walker et al., 2019).

2.3.2 Eaux grises et eaux noires

Les eaux grises sont les eaux usées produites par diverses activités accomplies à bord (douches, cuisine, lessive, nettoyage). Les eaux grises contiennent une grande variété de contaminants, notamment des produits pharmaceutiques, des détergents, des particules alimentaires, des bactéries et des microplastiques, qui nuisent à la qualité de l'eau et augmentent les charges en nutriments dans les eaux réceptrices, mettant à risque la santé des humains et de la faune marine (Nuka Research and Planning Group, 2019; Vard Marine Inc., 2019). Les navires de charge produisent environ 125 L d'eaux grises par personne et par jour, tandis que les navires de croisière en génèrent plus du double en raison du nombre relativement élevé de passagers et de membres d'équipage (Vard Marine Inc., 2019).

Les eaux usées, également appelées eaux noires, comprennent les déchets corporels humains et autres rejets associés provenant des systèmes septiques, comme l'eau des toilettes et les boues d'épuration. Les eaux noires sont principalement composées d'eau, mais contiennent également des contaminants comme des matières solides, des nutriments, des agents pathogènes, des produits chimiques organiques, des métaux, des huiles et graisses, et du plastique (Clear Seas).

2.3.3 Eaux de lavage des épurateurs

Les eaux de lavage sont produites par les épurateurs, les systèmes d'épuration des gaz d'échappement. Les **épurateurs** servent à éliminer les SOx (oxydes de soufre) des gaz d'échappement des navires qui brûlent du mazout lourd (ou HFO, pour heavy fuel oil), permettant ainsi aux exploitants de respecter les limites réglementaires de SOx sans recourir à des carburants plus coûteux. L'eau de lavage est un sous-produit acide et très contaminé du processus d'épuration; elle est souvent relâchée directement dans l'océan. Les polluants qu'elle contient sont néfastes pour la vie aquatique et acidifient l'eau à l'endroit où ils sont rejetés. Bien que certains types d'épurateurs (en boucle fermée et hybrides) puissent capter l'eau de lavage pour la stocker afin qu'elle soit évacuée à terre, la plupart des navires équipés d'épurateurs la versent directement dans les eaux environnantes. De plus, même les technologies en boucle fermée en rejettent une certaine quantité, laquelle peut contenir des concentrations élevées de contaminants (Clear Seas).

2.3.4 Déchets solides

On estime que plus de 636 000 tonnes de débris se retrouvent dans la mer chaque année, les navires de croisière en étant la principale source (Dabrowska et al., 2021). Les déchets solides sont générés par la perte de cargaison, le déversement d'ordures et les débris de pont jetés ou perdus. Ces détritiques comprennent différentes matières (verre, métal, plastique, papier et déchets organiques), dont certaines posent un danger pour la vie marine (Walker et al., 2021). Les plastiques en particulier représentent une menace importante pour toutes les espèces, du plancton aux grands mammifères. Ils restent dans l'environnement pendant des années et sont peu susceptibles de se biodégrader (Jambeck, 2018; OMI, s.d.). Les plastiques peuvent être ingérés accidentellement par les oiseaux, les poissons et les cétacés, obstruer leur système digestif et entraîner la malnutrition ou la mort à cause d'un empoisonnement ou de lésions physiques. Les espèces marines peuvent aussi se retrouver piégées dans des objets en plastique

(OMI, s.d.). Les bactéries, les algues et d'autres types d'organismes envahissants sont également capables de se fixer et de proliférer sur les plastiques qui dérivent à travers le monde; une fois dans leur nouvel environnement, ils peuvent transmettre des maladies ou devenir envahissants (Jambeck, 2018). Selon les participants aux entretiens, les déchets solides (c'est-à-dire les ordures, le recyclage, les rejets par-dessus bord) ont un impact environnemental notable qui mérite davantage d'attention.

2.3.5 Eaux de cale et déchets d'hydrocarbures

Les déchets d'hydrocarbures générés par les navires comprennent l'huile des arbres d'hélice, les résidus de cargaison et les eaux de cale (Walker et al., 2019; Clear Seas, s.d.). Les eaux de cale, quant à elles, proviennent des activités du navire et contiennent un mélange d'huile, de boues, de produits chimiques, de détergents et d'autres polluants.

2.4 Impacts biophysiques

Les baleines sont l'espèce la plus souvent en cause. Le risque de collision mortelle augmente considérablement avec la taille et la vitesse du navire, mais dépend également du temps que l'espèce passe à la surface ou tout près, de son comportement en surface, de ses capacités auditives et des comportements qu'elle adopte en réaction aux navires (Schoeman et al., 2020). Le long de la côte Atlantique des États-Unis et du Canada et dans le golfe du Mexique, un total de 37 baleines ont été blessées à la suite de collisions avec des navires entre 2010 et 2017. Toutefois, ce nombre est probablement sous-estimé en raison des décès et blessures non déclarés (National Marine Fisheries Services, s.d.).

Entre 2017 et 2024, un peu plus du tiers (15 sur 41) des décès enregistrés de baleines noires de l'Atlantique Nord (une espèce en voie de disparition) ont été attribués à des collisions avec des navires (NOAA, 2025). Pour ce qui est des autres espèces de mammifères marins ou de tortues de plus petite taille, le nombre de décès est probablement encore plus sous-estimé, car les marins les remarquent moins, et les animaux morts sont moins souvent récupérés sur les plages (National Marine Fisheries Services, s.d.). On comprend encore mal les conséquences de la mortalité liée aux collisions sur les populations (Schoeman et al., 2020), mais ces collisions risquent de limiter sérieusement le rétablissement de la population de baleines noires de l'Atlantique Nord, l'une des plus vulnérables et des plus touchées par les incidents déclarés (Réseau d'observation de mammifères marins (ROMM) et al., 2022; Walker et al., 2019).

3.0 Technologies de réduction des impacts environnementaux des navires

Cette section présente un catalogue des technologies de réduction des impacts environnementaux des navires pouvant s'appliquer aux navires neufs et aux navires déjà en service. Ce résumé s'appuie sur l'expertise de Dillon-ABL et de spécialistes externes qui ont apporté leur expérience dans ce domaine lors de consultations ou d'entretiens. Nous répertorions d'abord les technologies connues, suivies d'un tableau indiquant les impacts environnementaux sur lesquels elles agissent.

3.1 Technologies de réduction des impacts environnementaux connues

Nous avons regroupé les technologies connues en cinq catégories que voici :

- a) **Améliorations de l'hydrodynamique.** Ces technologies visent à améliorer le comportement du navire face à la résistance de l'eau par l'optimisation de l'efficacité de la coque immergée et de ses appendices.
- b) **Améliorations de l'aérodynamique.** Ces technologies visent à optimiser la résistance à l'air du navire et son comportement face aux conditions de vent.
- c) **Améliorations de l'armement.** Cette catégorie englobe les technologies et les matériaux écoénergétiques visant à réduire la consommation électrique des installations à bord du navire et à améliorer son empreinte écologique globale.
- d) **Améliorations des systèmes mécaniques** (groupes électrogènes, moteurs, machines, etc.). Étant donné que les moteurs principaux et les groupes électrogènes sont les plus gros consommateurs d'énergie à bord d'un navire, ces systèmes présentent un potentiel élevé de gains d'efficacité et de réduction des émissions. Cette catégorie comprend les possibilités de remplacement de la propulsion conventionnelle par une propulsion éolienne.
- e) **Améliorations des systèmes opérationnels.** Cette catégorie traite des stratégies de navigation, des mégadonnées, des analyses informatiques, de la planification des itinéraires et des pratiques opérationnelles visant à réduire l'empreinte environnementale globale des navires.

3.1.1 Améliorations de l'hydrodynamique

Les améliorations de l'hydrodynamique des navires sont souvent basées sur des analyses informatiques de la dynamique des fluides ou sur des essais en bassin et peuvent entraîner une réduction significative des émissions pendant toute la durée de vie du navire, puisqu'une diminution de la résistance agit sur la consommation de carburant. Les formes de coque peuvent bénéficier des améliorations les plus marquées, notamment sur les sections de proue, qui peuvent permettre une réduction de la consommation de carburant pouvant atteindre 7 % (Tanttari, 2020). Les améliorations de l'hydrodynamique englobent un large éventail d'améliorations associées non seulement à la coque du navire, mais également à son gouvernail, à son hélice et à divers autres appendices. Ces améliorations visent à optimiser le comportement du navire face à la résistance de l'eau, à réduire la traînée, à améliorer sa maniabilité et à accroître son efficacité globale.

Au niveau de l'équipage, les améliorations de l'hydrodynamique ne nécessitent souvent que peu ou pas de nouvelles formations, ni de nouvelles opérations d'entretien ou d'augmentation de charge de travail.

Il est important que ces améliorations techniques soient installées au meilleur moment, en particulier pendant les périodes programmées de cale sèche, afin de réduire les coûts et les interruptions de service que leur mise en œuvre engendrerait autrement. Des synergies avec d'autres interventions sont possibles par la combinaison de plusieurs améliorations de l'hydrodynamique, comme l'association de propulseurs azimutaux à des améliorations techniques de la coque qui optimisent l'efficacité.

Il existe de nombreux types d'améliorations de l'hydrodynamique, que nous présentons ci-dessous.

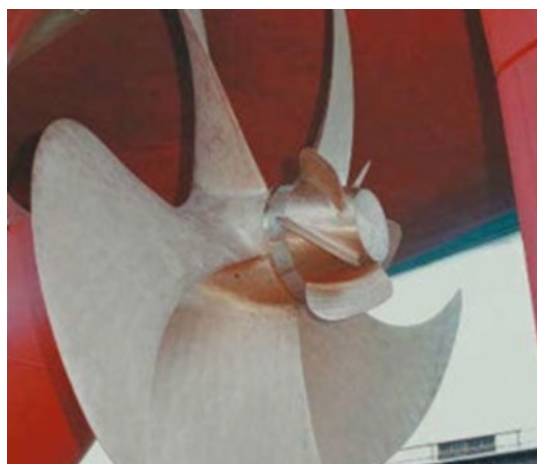
3.1.1.1 Hélices à haut rendement

Le perfectionnement de la géométrie des pales repose sur des profils hydrodynamiques visant à réduire le plus possible la traînée et la cavitation. La répartition non uniforme des cordes contribue à répartir les charges de manière homogène sur toute la longueur des pales, réduisant ainsi les pertes d'énergie dues aux pressions inégales. Pour créer des hélices à haut rendement, il faut optimiser des paramètres, tels que le nombre de pales, l'inclinaison, le rapport d'aspect et le rapport de surface des pales.

Les informations recueillies lors des entretiens révèlent que les innovations de conception des hélices sont très rentables et génèrent des économies de coûts substantielles. De plus, il est évident que les progrès réalisés dans la conception des hélices peuvent également réduire les impacts associés au bruit rayonné sous-marin et aux collisions. Par exemple, les améliorations techniques visant à réduire la cavitation peuvent diminuer efficacement le bruit sous-marin et un positionnement de l'hélice plus haut sur le navire peut réduire le risque de collision avec des baleines et d'autres mammifères marins. Il faut savoir qu'il existe différentes formes de cavitation sur les hélices correspondant à des vitesses d'apparition de la cavitation et à des caractéristiques sonores différentes.

Ailettes de casque d'hélice (ACH) : Installées à l'avant du moyeu de l'hélice, les ailettes de casque d'hélice modifient le débit d'eau entrant dans l'hélice, ce qui réduit les tourbillons et améliore l'efficacité globale.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et rénovations de gros navires	Amélioration du rendement propulsif	Coûts de mise en œuvre



(Hansen, 2011)

Extrémités de pales en angle : Ces extrémités de pales contribuent à réduire la formation de tourbillons, lesquels entraînent des pertes d'énergie et de la cavitation. En fait, elles réduisent la différence de pression entre les extrémités des pales et l'eau environnante. Cette technologie est particulièrement utile sur les navires qui nécessitent une maniabilité précise, comme les traversiers, les remorqueurs et les bateaux de travail. Ces pales réduisent les pertes d'énergie associées aux tourbillons d'extrémités lors des changements fréquents de vitesse.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et rénovations de gros navires	Amélioration du rendement propulsif, réduction du bruit	Coûts de mise en œuvre



(Feizi, 2013)

3.1.1.2 Tuyères et conduits

Plusieurs types de tuyères et de conduits peuvent être installés autour ou à proximité des hélices pour réduire les turbulences du flux d'eau vers et depuis les hélices, ce qui améliore l'efficacité et réduit la consommation de carburant. Voici les différents types de tuyères et de conduits d'hélice disponibles pour les nouveaux navires et les navires déjà en service :

Les tuyères Kort sont installées autour de l'hélice pour accélérer le débit d'eau à la sortie de l'hélice. Surtout utiles à faible vitesse et à forte charge (p. ex. pour le remorquage), leur efficacité diminue à vitesse élevée.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et navires déjà en service utilisés à basse vitesse pour manœuvrer des charges lourdes	Amélioration du rendement propulsif	Efficacité réduite à vitesse élevée, augmentation du poids



(Damen, 2022)

Les conduits Mewis (Mewis Duct®) sont installés à l'avant de l'hélice, autour du carter de l'arbre de transmission. À l'intérieur du conduit, plusieurs ailettes dirigent l'eau vers l'hélice. Le gain d'efficacité est maximal lorsque les hélices déplacent de lourdes charges et tournent à une vitesse ne dépassant pas 20 nœuds (Mewis et Guiard, 2011).

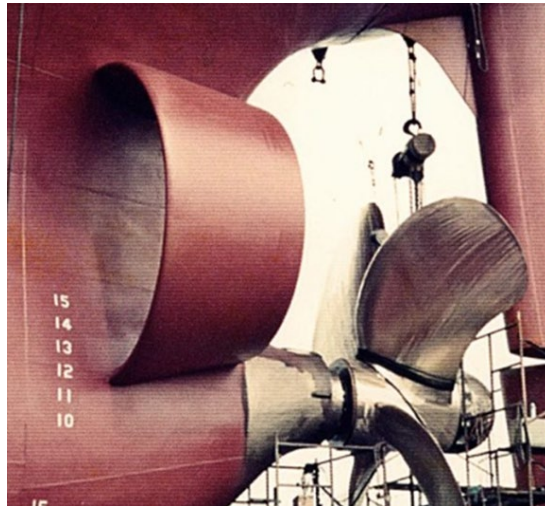
Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et rénovations de gros navires	Amélioration du rendement propulsif, réduction des vibrations	Coûts de mise en œuvre



(Becker Marine, 2020)

Conduits d'égalisation de sillage (CES) installés à l'avant des deux quadrants supérieurs d'une hélice sur les navires à coefficient de bloc élevé. À l'instar des conduits Mewis, les CES guident l'arrivée d'eau vers l'hélice et empêchent la formation de turbulences.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et rénovations de gros navires	Amélioration du rendement propulsif	Coûts de mise en œuvre



(Schneekluth Hydrodynamik, 2019)

3.1.1.3 Ailerons et guides

Les ailerons et les guides d'un navire contrôlent le mouvement de l'eau afin d'améliorer la maniabilité, la stabilité et l'efficacité énergétique. Les ailerons antiroulis, situés sur les côtés de la coque ou sous la ligne de flottaison, réduisent le roulis et améliorent la stabilité en générant une portance ou une résistance. Quant aux guides, placés près de l'hélice ou des propulseurs, ils optimisent l'efficacité de la propulsion par la direction du flux d'eau vers l'hélice (prétourbillon) ou par la récupération de l'énergie du sillage derrière l'hélice (post-tourbillon).

Voici différentes solutions possibles en fonction de l'emplacement et de la disposition des ailerons ou des guides :

Roue à aubes de Grim : Roue rotative de grand diamètre située à l'arrière de l'hélice, dont le diamètre est supérieur à celui de l'hélice, et dont la section varie entre les profils des aubes de turbine et ceux des pales d'hélice. Génère une poussée supplémentaire par l'accélération du débit d'eau sortant de l'hélice.

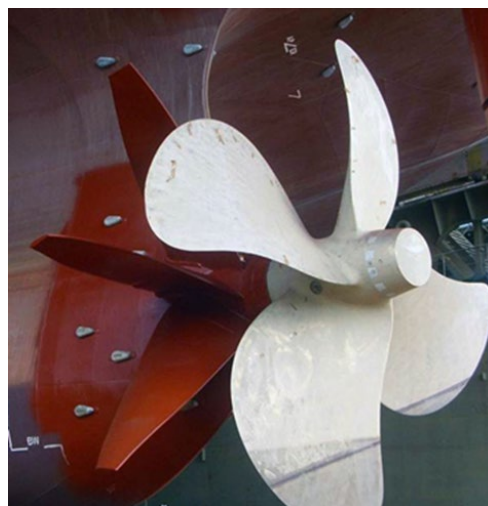
Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et rénovations de gros navires, toutes les vitesses	Amélioration du rendement propulsif	Coût de mise en œuvre, entretien requis



(Martinli, 2008)

Stator pré-tourbillon : Ailerons fixés à l'avant de l'hélice qui augmentent son efficacité en créant un tourbillon dans le flux d'eau.

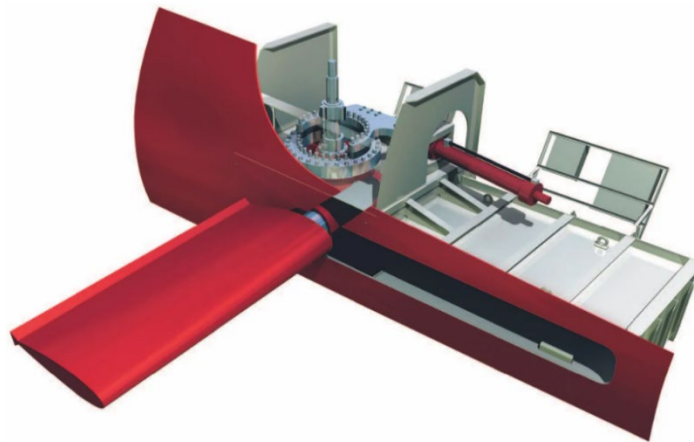
Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et navires déjà en service, navires à coefficient de bloc élevé	Amélioration du rendement propulsif	Coût de mise en œuvre



(Waterborne.eu, 2024)

Ailerons antiroulis rétractables : Les ailerons antiroulis sont des appendices fixés au bouchain de la coque qui contribuent à stabiliser le navire contre les mouvements de roulis. Les ailerons antiroulis peuvent être passifs s'ils sont simplement fixés en place ou actifs s'ils pivotent lorsque le navire se déplace. Les ailerons antiroulis augmentent la résistance de la coque et, par conséquent, la consommation de carburant. Les ailerons antiroulis rétractables peuvent être rentrés dans la coque lorsque l'état de la mer ne nécessite pas d'amortissement du roulis, ce qui augmente l'efficacité du navire par rapport à un navire équipé d'ailerons non rétractables classiques.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et navires déjà en service circulant en eaux calmes	Amélioration du rendement	Coût, entretien, espace requis et complexité



(Wartsila, 2024)

Grilles de propulseurs d'étrave : Les ouvertures des propulseurs d'étrave ont un impact négatif sur l'efficacité globale de la coque en raison de la perturbation du flux créée par ces ouvertures. Pour atténuer ce problème, il est possible d'installer des grilles dans les ouvertures. Ces grilles peuvent être de simples barres verticales ou avoir des géométries plus complexes, comme la solution Elogrid qui accroît l'efficacité des propulseurs d'étrave en dirigeant le flux vers l'hélice (Tanttari et coll., 2022).

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et navires déjà en service	Augmentation de l'efficacité de la coque et des propulseurs, réduction des vibrations	Coût



(Eliomatic, 2023)

3.1.1.4 Géométrie de l'étrave

L'étrave a une fonction déterminante dans l'efficacité d'un navire, car elle influence directement son déplacement dans l'eau. Une étrave bien conçue peut réduire la résistance à l'eau et atténuer la traînée, ce qui améliore le rendement énergétique. Il existe plusieurs géométries d'étraves remplissant des fonctions particulières, dont certaines sont décrites ci-dessous.

Étrave à bulbe : Située à l'avant de la coque d'un navire, cette étrave a une structure saillante en forme de bulbe. Elle crée un sillage qui interagit avec les vagues générées par le navire d'une manière qui réduit la résistance. L'efficacité d'une étrave à bulbe dépend du tirant d'eau du navire, ce qui la rend particulièrement efficace pour les navires capables de maintenir le tirant d'eau opérationnel prévu.

À l'origine, les étraves en bulbe étaient conçues en fonction de la vitesse de croisière habituelle du navire. Cependant, les modèles contemporains s'adaptent souvent à un éventail plus large de vitesses et de conditions de charge, avec parfois des configurations de bulbes réglables ou rétractables. Compte tenu de l'importance croissante accordée à la réduction des émissions de GES grâce à des pratiques telles que la navigation à vitesse réduite (qui consiste à réduire la vitesse des navires afin de diminuer la consommation de carburant et, par conséquent, les émissions), il pourrait être nécessaire de remplacer les étraves à bulbe calibrées pour des vitesses particulières par des modèles visant surtout à réduire les émissions de GES.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires à tirant d'eau constant	Amélioration du rendement	Gains limités à des paramètres particuliers de vitesse et de tirant d'eau



(Shipwright.biz, 2014)

Étrave inversée : Les étraves verticales ou inversées telles que l’Ulstein X-Bow, la Damen Axe-Bow et la Groot Cross-Bow sont conçues pour optimiser le rendement à différentes vitesses et différents tirants d’eau. Les étraves inversées réduisent le claquement et le tangage, ce qui améliore la tenue en mer (capacité du navire à naviguer et à maintenir sa stabilité dans diverses conditions maritimes). Elles permettent de réduire la marge de puissance en mer et, par conséquent, la puissance totale installée.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires de toutes tailles	Amélioration du rendement, réduction des vibrations en haute mer	Coût de mise en œuvre, incidence sur l’aménagement du navire



(Stoichevski, 2014)

Étrave brise-vagues : Cette configuration se caractérise par une étrave exceptionnellement effilée, presque en forme de couteau, conçue pour fendre les vagues plutôt que les chevaucher. Elle est particulièrement répandue sur les traversiers multicoques de taille moyenne.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouvelles constructions multicoques circulant à grande vitesse	Amélioration de la maniabilité et du confort	Coût de mise en œuvre, incidence sur l'aménagement du navire, complexité



(incat.com.eu, 2018)

Étrave ailée : Cette étrave est dotée d'une extension horizontale qui contribue à réduire la résistance globale et les chocs des vagues.

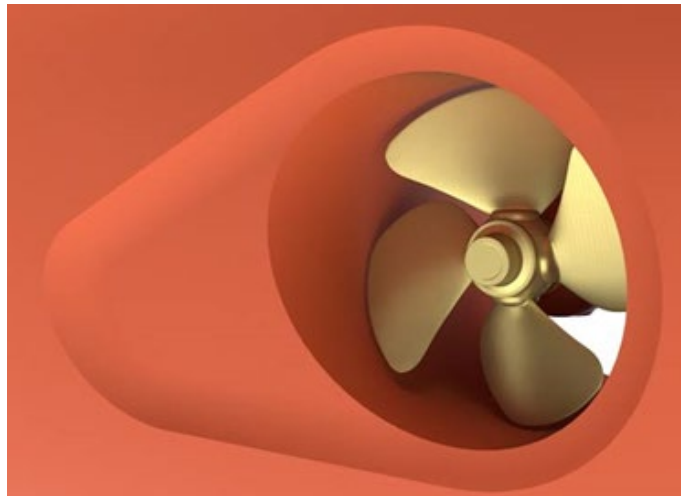
Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, formes d'étrave minces, convient seulement à certains états de mer	Amélioration du rendement, de la maniabilité et du confort	Coût de mise en œuvre, solution innovante dont l'application est limitée



(maritimeexecutive.com, 2020)

Améliorations des propulseurs d'étrave : La plupart des grands navires commerciaux sont équipés d'un ou deux propulseurs d'étrave installés dans des tunnels transversaux. La géométrie autour de l'ouverture des tunnels peut être améliorée au moyen de profilages. Les bords d'attaque ou de fuite des pales des propulseurs d'étrave sont alors incurvés ou bombés. Les profilages des extrémités des pales dirigent le flux d'eau au-delà de l'ouverture du tunnel avec le moins de perturbations possible.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires et navires déjà en service	Amélioration du rendement	Coût et complexité des modifications sur un navire en rénovation



(Wartsila, 2023)

3.1.1.5 Géométrie du gouvernail

L'efficacité d'un navire dépend fortement de la conception de son gouvernail, qui agit à la fois sur l'hydrodynamisme et sur la maniabilité du navire. La conception du gouvernail est fondamentale pour diriger le flux d'eau autour de la poupe et optimiser le sillage et l'hydrodynamisme du navire. Divers types de gouvernail sont présentés ci-dessous.

Gouvernail à volet : Un volet réglable est ajouté au bord de fuite du gouvernail, améliorant ainsi la réactivité de la direction. L'action amplifiée du volet permet d'utiliser un gouvernail globalement plus petit, ce qui réduit sa résistance hydrodynamique.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, de la maniabilité et du confort	Coût et entretien



(nauticexpo.com, 2018)

Gouvernail efficace : Les gouvernails efficaces intègrent le cornet du gouvernail au moyeu de l'hélice par le biais d'un bulbe. Ce bulbe améliore l'efficacité de la propulsion et réduit le bruit et les vibrations. Technologie brevetée par Wärtsilä.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, de la maniabilité et du confort	Coût et entretien



(Wärtsilä, 2016)

Gouvernail en porte : Au lieu d'un gouvernail unique situé derrière l'hélice, le système de gouvernail en porte est constitué de deux surfaces symétriques orientées verticalement qui entourent l'hélice des deux côtés. Les volets jumelés sont réglables indépendamment, ce qui permet un contrôle précis du flux d'eau. Cette configuration améliore l'efficacité hydrodynamique par la réduction de la résistance du gouvernail et par la génération d'une poussée supplémentaire, ce qui peut engendrer une réduction de la consommation d'énergie de 10 %, voire plus. Ce système est particulièrement avantageux pour les navires équipés d'hélices fortement sollicitées, tels que les porte-conteneurs et les navires polyvalents.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires de grande taille	Réduction de la consommation d'énergie pouvant dépasser 10 %, maniabilité	Coût de mise en œuvre, entretien, complexité



(Gaters, 2020)

3.1.1.6 Peintures antisalissures à haute performance

Les peintures antisalissures modernes sont conçues pour améliorer les performances hydrodynamiques du navire en réduisant le frottement et la traînée entre la coque et l'eau. Cette optimisation se traduit par des économies de carburant et une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Généralement appliquées sur les parties immergées des navires, notamment la coque et les hélices, ces peintures empêchent la fixation d'organismes marins, tels que les balanes, les algues et les mollusques. En empêchant les accumulations d'organismes marins qui peuvent rendre la surface des coques rugueuse, ces peintures aident à réduire la traînée, la consommation de carburant et les coûts d'exploitation. Quelques exemples de peintures antisalissures réductrices de friction sont présentés ci-dessous.

Copolymères autopolissants : Ces peintures libèrent progressivement des biocides (agents nocifs pour les organismes marins) à mesure que la couche extérieure s'érode ou se dissout. Cette libération contrôlée empêche les organismes nuisibles de se fixer sur la coque, de sorte que la surface demeure lisse.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Économies de carburant, réduction des émissions, efficacité, facilite l'entretien et réduit les coûts d'exploitation des navires	Libération de toxines

Peintures à base de silicone : Reconnues pour leurs propriétés hydrofuges, les peintures à base de silicone créent des surfaces lisses qui empêchent la prolifération d'organismes nuisibles et réduisent la traînée. Ces peintures sont efficaces, mais généralement plus coûteuses que les peintures antisalissures traditionnelles à base de biocides. Plusieurs exigent des valeurs minimales de temps de navigation et de vitesse de fonctionnement, indiquées par les fabricants. Les documents publicitaires des fabricants annoncent des économies de carburant et des réductions des émissions de GES allant de 3 à 10 %, voire plus. Certaines variantes, telles que les peintures hydrogels, modifient la surface de la coque afin qu'elle apparaisse comme liquide aux organismes marins, ce qui les décourage à s'y fixer.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Économies de carburant et réduction des émissions de GES allant de 3 % à plus de 10 %, produits respectueux de l'environnement	Coûteux, durée de vie inférieure aux peintures copolymères, entretien

Systèmes antisalissures à ultrasons : De nombreux transducteurs ultrasoniques sont installés contre les parois intérieures de la coque et émettent des sons à différentes fréquences. Ces sons créent une couche de haute pression autour de la coque, qui empêche les petits organismes de s'y fixer. Le système peut être réglé sur différentes fréquences pour cibler divers organismes, tels que les biofilms, les algues, les anatifes et les mollusques. Les systèmes antisalissures à ultrasons sont plus efficaces lorsqu'ils sont associés à une couche de peinture antisalissure correctement appliquée.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, facilite l'entretien du navire	Coût, bruit sous-marin

3.1.1.7 Lubrification à l'air de la coque

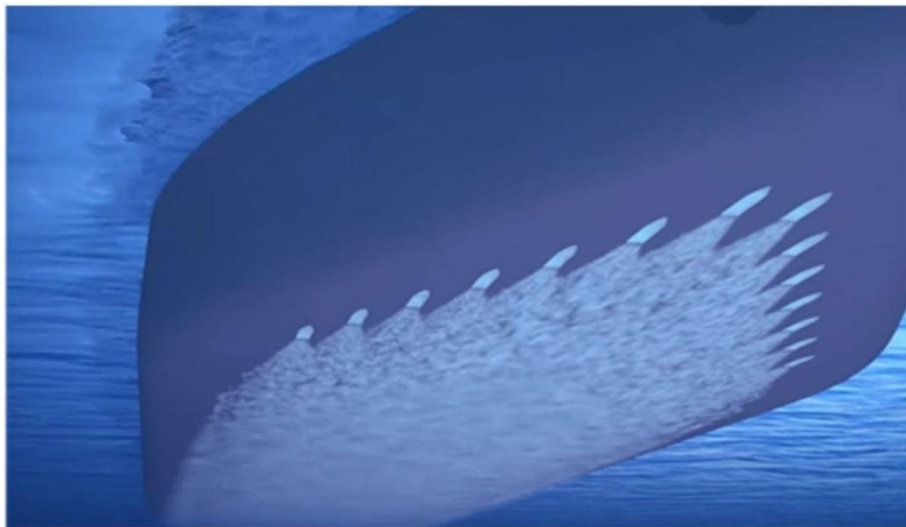
La lubrification à l'air de la coque consiste à interposer une couche de bulles d'air ou une fine couche d'air entre la coque du navire et l'eau. La couche d'air réduit la résistance de frottement entre la coque du navire et l'eau environnante. La résistance au frottement, également appelée frottement de surface, constitue un facteur déterminant de la consommation énergétique des navires lorsqu'ils se déplacent dans l'eau. La réduction de cette résistance permet aux navires de fonctionner avec un meilleur rendement énergétique. Ces systèmes permettent de réaliser des économies de carburant (et donc de réduire les émissions) de 5 à 10 %. Ils sont particulièrement efficaces sur les navires à fond plat, à vitesse relativement élevée et à faible tirant d'eau. Quelques exemples de systèmes de lubrification à l'air de la coque sont présentés ci-dessous.

Les **systèmes d'injection de bulles** introduisent de minuscules bulles d'air depuis la surface du navire ou le long de la coque, qui créent une couche d'air entre la coque et l'eau. Cette couche continuellement maintenue réduit la friction de l'eau sur la coque.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, utile seulement dans certains états de mer	Amélioration du rendement, réduction du bruit sous-marin	Coût, entretien, complexité et espace occupé à bord du navire

Les **systèmes à vide d'air** sont constitués d'une cavité structurelle ou d'une chambre intégrée à la coque du navire et remplie d'air, qui vise à éliminer le contact direct entre la coque et l'eau, et donc à réduire la friction.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, utile seulement dans certains états de mer	Amélioration du rendement, réduction du bruit sous-marin	Coût, entretien, complexité et espace occupé à bord du navire



(Love, 2020)

3.1.1.8 Conception de la coque

3.1.1.8.1 Géométrie de la coque

Il existe des techniques de carénage et d'hydrodynamisation des coques qui permettent d'améliorer la géométrie de la coque du navire et son efficacité hydrodynamique. Le carénage d'une coque consiste à lisser les imperfections sur la surface courbe de la coque. Le travail de carénage commence dès la conception de la coque, par l'analyse de la courbure de la coque à l'aide d'un logiciel 3D et s'applique donc aux nouveaux navires. Quant à l'hydrodynamisation, elle consiste à concevoir la forme de la coque de manière à réduire la résistance du navire contre l'eau. Une optimisation de la forme de la coque permet de réduire la traînée du navire et, par conséquent, sa consommation de carburant. L'hydrodynamisation et le carénage de la coque peuvent également aider à réduire le bruit sous-marin produit par le navire.

La conception de la coque a souvent été évoquée dans les entretiens avec les participants et a été systématiquement désignée comme étant un facteur crucial pour réduire divers types d'impacts environnementaux, notamment la réduction des émissions (comme l'augmentation du rendement énergétique grâce à la réduction de la traînée et la réduction du bruit sous-marin). Les efforts d'optimisation de la conception des coques sont également considérés comme étant plus rentables que d'autres technologies.

En outre, l'optimisation de la géométrie de la coque afin qu'elle soit légère et efficace et l'utilisation d'acier à haute résistance mécanique dès la conception aident à réduire le poids total à vide du navire et donc à réduire la consommation de carburant par tonne de cargaison.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires	Amélioration du rendement, réduction du bruit sous-marin	Coût de conception

3.1.2 Améliorations de l'aérodynamique

Les améliorations de l'aérodynamisme sont des modifications apportées à la conception du navire ou à ses composantes qui visent à réduire la résistance contre l'air ou la traînée du navire dans l'air. Ces améliorations visent principalement à réduire le profil aérodynamique du navire et à optimiser la circulation de l'air autour des structures. Les améliorations aérodynamiques visent à optimiser le rendement énergétique par des corrections aux formes du navire qui diminuent la résistance au vent. Les exemples d'améliorations aérodynamiques sont nombreux : formes plus élancées, carénages, repositionnement ou reconfiguration des structures, essais en soufflerie pour optimiser les flux d'air, etc.

3.1.2.1 Carénage des superstructures

Des structures de déviation du vent peuvent être installées sur la superstructure ou le gaillard d'avant des navires pour en réduire la traînée aérodynamique. Des déflecteurs sont installés sur plusieurs porte-conteneurs et vraquiers, qui bénéficient le plus de ces améliorations aérodynamiques.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Navires à superstructures élevées ou transportant des marchandises sur le pont	Amélioration du rendement	Coût d'investissement



(FullAvanteNews, 2022)

3.1.3 Améliorations de l'armement

Les améliorations de l'armement sont des technologies et des matériaux écoénergétiques qui réduisent la consommation d'énergie des systèmes embarqués du navire (appelée « consommation secondaire »). Ces technologies et matériaux visent à optimiser la consommation d'énergie de divers systèmes du navire, notamment les systèmes d'éclairage et de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), ainsi que les machines auxiliaires, dans le but de réduire la consommation d'énergie globale du navire.

3.1.3.1 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) à haut rendement offrent un bon contrôle climatique à l'intérieur du navire avec un minimum d'énergie, ce qui contribue à diminuer la consommation de carburant et l'empreinte carbone du navire. Les systèmes CVC à haut rendement se caractérisent notamment par la création de zones (pour réguler automatiquement les paramètres climatiques de différentes zones en fonction des besoins en temps réel), par des compresseurs à vitesse variable (qui ajustent leur puissance en fonction des besoins en chauffage et en refroidissement) et par l'intégration de filtres à haut rendement, tels que les filtres HEPA, qui améliorent l'efficacité de la filtration tout en prolongeant la durée de vie des systèmes CVC.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement et du confort	Coût, complexité

3.1.3.2 Isolation à haut rendement

Les systèmes d'isolation réduisent le travail des systèmes CVC. L'énergie nécessaire pour maintenir les espaces de vie à la température et au taux d'humidité souhaités constitue l'une des principales sources de consommation électrique à bord d'un navire. L'utilisation de matériaux isolants modernes en sandwich dans les planchers flottants et les panneaux de cloison améliore l'isolation climatique et acoustique, protège efficacement les espaces intérieurs des éléments extérieurs et réduit la transmission du son entre les zones. De plus, les matériaux isolants modernes à haut rendement sont plus légers que les méthodes d'isolation traditionnelles.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Améliore le rendement, demande peu d'espace et réduit le bruit à bord	Coût d'investissement

3.1.3.3 Éclairage à DEL

Les lampes à DEL ont une efficacité énergétique nettement supérieure à celle des lampes fluorescentes ou à incandescence traditionnelles. En raison de leur faible consommation d'énergie et du peu de chaleur que ces lampes produisent, les navires qui en sont équipés consomment moins d'énergie. De plus, les lampes à DEL ont une durée de vie plus longue, ce qui contribue à réduire les coûts d'exploitation des armateurs. La simplicité d'installation de la plupart des solutions d'éclairage à DEL élimine le besoin de modifications complexes sur le navire, ce qui en augmente l'attrait.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction de l'entretien grâce à la durée de vie supérieure, réduction des coûts d'exploitation	Coût, sensibilité aux distorsions harmoniques

3.1.3.4 Incinérateurs

Les incinérateurs embarqués constituent des outils de gestion des déchets essentiels pour le traitement efficace des déchets solides et des boues usées. La combustion à bord des déchets solides, des résidus biologiques et des boues huileuses permet de réduire le volume et le poids des déchets et, par

conséquent, de faciliter et compacter le système de gestion des déchets. Par contre, les incinérateurs produisent des gaz à effet de serre et des particules. Il existe aussi des incinérateurs à récupération qui captent et utilisent une partie de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement. Les cendres résiduelles du processus d'incinération sont collectées à bord et éliminées dans les ports.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Réduction du volume et du poids des déchets	Coût, entretien, génère des émissions (GES)

3.1.3.5 Gazéificateurs

Dotés d'une structure semblable à celle des incinérateurs, les gazéificateurs se distinguent par leur approche de traitement des déchets. Au lieu de brûler les déchets, les gazéificateurs utilisent de la chaleur pour les décomposer en charbon et en gaz, ce dernier étant ensuite utilisé pour alimenter le processus de gazéification.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, approche circulaire, réduction de l'espace et du poids des déchets	Coût, complexité, entretien

3.1.3.6 Compacteurs de déchets

Les compacteurs réduisent le volume des déchets solides à bord des navires. Le compactage des déchets facilite leur stockage et leur gestion, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de l'espace à bord du navire.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction du volume des déchets	Coût

3.1.3.7 Systèmes avancés de traitement des eaux de ballast

Des ballasts d'eau sont utilisés dans les navires pour ajuster et améliorer la stabilité et la résistance longitudinale en charge. Les navires chargent et déchargent leurs ballasts avec de l'eau de mer à l'aide de pompes, ce qui peut entraîner des transferts de micro-organismes entre différentes zones géographiques et différents écosystèmes. Bien que le traitement et le rejet des eaux de ballast soient régis par l'OMI et le Code BWMS, plusieurs technologies sont à la disposition des armateurs. Tous les systèmes fonctionnent en deux étapes : la première est un préfiltrage de l'eau de ballast à l'aide d'un filtre physique à tamis et la seconde est un traitement ou un microfiltrage de l'eau qui élimine les micro-organismes plus petits. Les technologies les plus couramment utilisées pour la filtration de deuxième étape sont le traitement thermique, le traitement aux ultraviolets, le traitement par ultrasons et le traitement chimique. Parmi celles-ci, le traitement thermique réduit les impacts environnementaux du navire, car il utilise la chaleur résiduelle des moteurs principaux ou des groupes électrogènes du navire pour pasteuriser les micro-organismes présents dans l'eau.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Facilite la gestion des micro-organismes	Coût, complexité, entretien

3.1.4 Améliorations de la propulsion

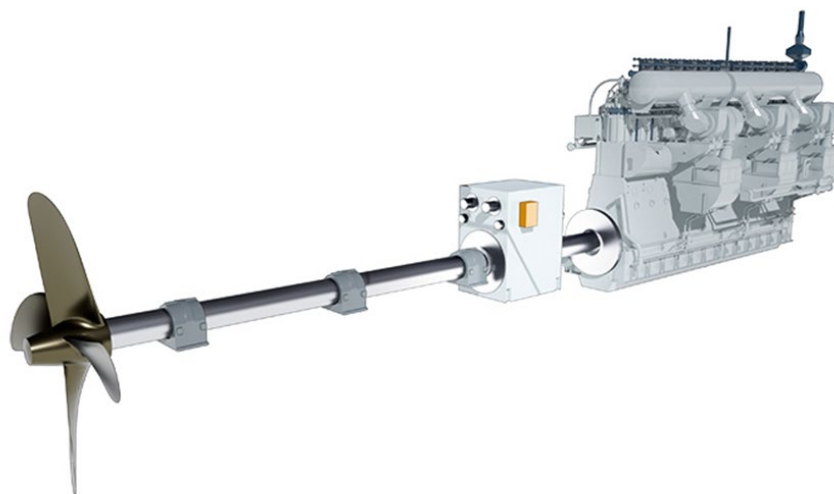
Les améliorations de la propulsion agissent sur les systèmes de propulsion du navire (incluant les systèmes mécaniques, les groupes électrogènes, les moteurs et les propulseurs). Étant donné que les moteurs principaux et les groupes électrogènes sont des consommateurs d'énergie importants, la mise en œuvre d'améliorations à ce niveau présente un bon potentiel d'augmentation de l'efficacité et de réduction des émissions.

Les personnes rencontrées lors des entretiens ont systématiquement souligné que les améliorations mécaniques peuvent générer d'importantes réductions des impacts environnementaux, en particulier grâce à la propulsion éolienne. Elles ont cependant admis que les avantages de la propulsion éolienne dépendent fortement de facteurs tels que le type de navire, les routes commerciales et les modes d'exploitation, comme indiqué dans les sections suivantes du présent document. De plus, les personnes consultées ont souligné la nécessité de former davantage le personnel et craignent une augmentation potentielle de la charge de travail associée à la mise en œuvre de certaines de ces innovations, ce qui peut constituer un obstacle important à leur adoption.

3.1.4.1 Générateurs à arbre

Les générateurs à arbre sont des groupes électrogènes reliés aux moteurs principaux ou auxiliaires d'un navire et utilisés comme prise de mouvement. Le moteur principal actionne le générateur à arbre, lequel remplace un moteur à combustion secondaire. L'énergie électrique produite par les générateurs à arbre peut être utilisée pour alimenter la propulsion et les équipements secondaires. Ces générateurs présentent les inconvénients d'augmenter l'effort des moteurs et d'exiger que les moteurs fonctionnent à quai.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction des émissions de GES, réduction du bruit	Des systèmes supplémentaires de gestion de l'énergie sont nécessaires

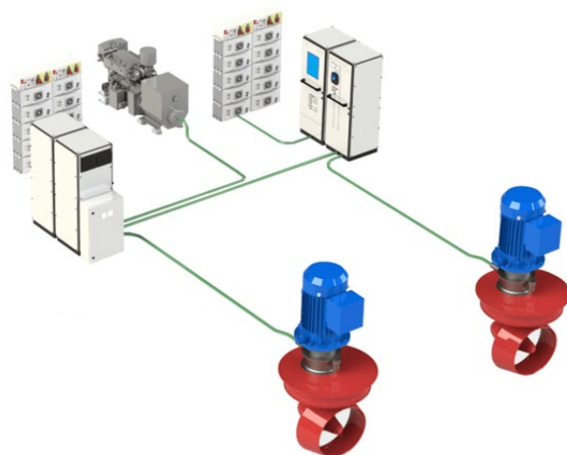


(Wartsila, 2024)

3.1.4.2 Groupe électrogène diesel

Un groupe électrogène diesel comprend un ou plusieurs moteurs diesel qui actionnent des groupes électrogènes afin de produire de l'électricité. Cette électricité est ensuite gérée et distribuée aux moteurs électriques de propulsion par le biais de tableaux électriques. Les groupes électrogènes diesel séparent le moteur diesel de l'hélice, apportant une flexibilité opérationnelle et une modularité supérieures par rapport aux systèmes à entraînement direct classiques. Cette flexibilité accrue dans la production d'énergie améliore l'efficacité globale de la propulsion du navire, en particulier dans les situations nécessitant un fonctionnement à puissance partielle. De plus, les groupes électrogènes diesel produisent généralement moins de vibrations et de bruit que les configurations à entraînement direct classiques.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Navires transportant des cargaisons ayant des poids très différents.	Amélioration du rendement, réduction des émissions de GES, réduction du bruit	Coût, non réalisable sur certains navires



(Teknik Ukeblad, 2020)

3.1.4.3 Variateurs de fréquence

Un variateur de fréquence (VF) régule la vitesse et la puissance produite par des moteurs électriques. Les variateurs de fréquence permettent de contrôler avec précision le fonctionnement des moteurs électriques en ajustant la fréquence et la tension fournies au moteur. La possibilité de faire fonctionner les moteurs électriques à des vitesses variables en fonction de l'effort à fournir permet une utilisation plus efficace de l'énergie par rapport aux moteurs à vitesse constante classiques. Les moteurs peuvent ainsi toujours fonctionner à leur vitesse optimale, ce qui réduit les gaspillages d'énergie.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, considérations de poids	Coût, complexité

3.1.4.4 Systèmes hybrides à batteries

Ces systèmes hybrides emploient des générateurs à arbre et des batteries au lithium pour aider les moteurs principaux à fournir la puissance de propulsion requise. L'énergie électrique stockée dans les batteries peut être utilisée pour la navigation à vitesse réduite, les manœuvres portuaires et l'alimentation des équipements. Les batteries sont reliées au système de gestion de l'énergie du navire et sont rechargées par la prise de force des moteurs principaux ou par une connexion à quai.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires	Amélioration du rendement, réduction des émissions de GES, réduction du bruit	Espace et poids, systèmes supplémentaires de sécurité et de gestion de l'énergie



(Nones, 2017)

3.1.4.5 Piles à combustible

Des piles à combustible peuvent faire partie d'un système hybride à batteries, ayant pour mission de fournir une charge électrique aux batteries. Les piles à combustible transforment de l'hydrogène en énergie électrique. La technologie actuelle des piles à combustible présente certaines limites pour les gros navires. Les solutions actuellement disponibles sont limitées à une puissance de l'ordre du kilowatt, ce qui pose des difficultés pour répondre aux besoins plus importants, de l'ordre du mégawatt, qui caractérisent généralement les grands navires. Cet écart souligne un obstacle important à l'adoption des piles à combustible dans les systèmes de propulsion marine et met en évidence la nécessité de poursuivre les efforts pour augmenter leurs capacités et les adapter aux exigences du transport maritime.

3.1.4.6 Épurateurs d'oxydes de soufre

Les épurateurs de SO_x (oxydes de soufre), également appelés dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (EGCS, pour Exhaust Gas Cleaning Systems), éliminent les oxydes de soufre des gaz d'échappement des navires avant leur rejet dans l'atmosphère.

Les entretiens ont révélé une évolution des mentalités vis-à-vis des épurateurs. Nous avons notamment observé un déclin de l'intérêt pour les épurateurs, attribué à la réduction des écarts de coût entre les

carburants à faible teneur en soufre et les carburants classiques. Cette tendance réduit l'intérêt économique de l'installation d'épurateurs par rapport à l'achat de carburants à faible teneur en soufre. D'autres facteurs doivent être pris en considération, notamment l'impact négatif des eaux de lavage des épurateurs si elles sont rejetées directement dans le milieu marin. Les systèmes en circuit fermé qui stockent l'eau de lavage à bord nécessitent des équipements de stockage, de traitement et, à terme, d'élimination à terre des sous-produits de l'eau de lavage, et rejettent tout de même une quantité moindre, mais fortement contaminée, de déchets. Ces informations soulignent le caractère dynamique et l'évolution rapide des technologies dans le secteur maritime.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service, moteurs fonctionnant au mazout	Réduction des émissions de SO ₂	Rejet des eaux usées, entretien, coût

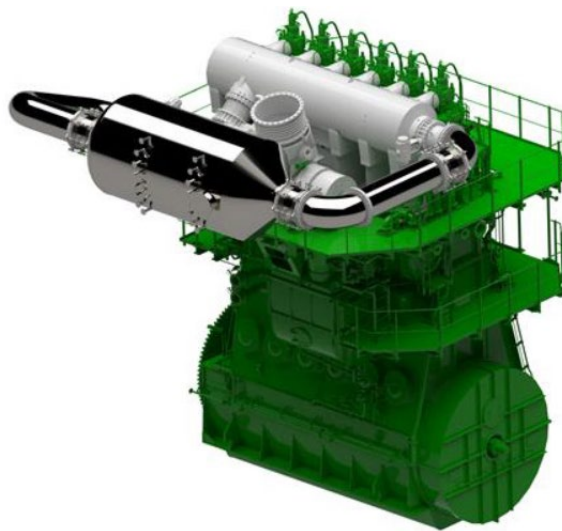


(Andritz.com, 2024)

3.1.4.7 Réduction catalytique sélective

Les convertisseurs catalytiques utilisés dans l'industrie maritime sont généralement appelés systèmes de réduction catalytique sélective (RCS). Ils constituent un moyen économique et efficace en termes de consommation de carburant pour réduire les émissions de particules, d'oxyde d'azote et de dioxyde d'azote des moteurs diesel. Les systèmes de RCS installés sur les navires sont des systèmes actifs qui nécessitent un agent réducteur (le plus souvent de l'urée) pour fonctionner. La mise en œuvre d'un système de RCS nécessite de l'espace pour les réservoirs d'urée et augmente les besoins d'entretien de la centrale électrique.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Moteurs au mazout	Réduction des émissions de GES	Espace, entretien, coût et complexité

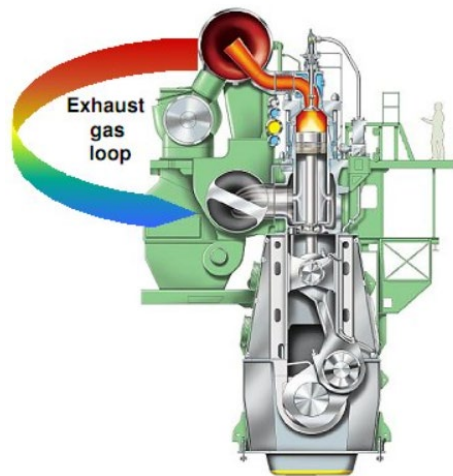


(jsea.or.jp,2022)

3.1.4.8 Recirculation des gaz d'échappement

Le dispositif de recirculation des gaz d'échappement (RGE) utilise les gaz d'échappement pour réduire les émissions d'oxyde d'azote des moteurs diesel. Ces systèmes présentent cependant les inconvénients non négligeables d'augmenter les exigences d'entretien du moteur et de réduire la puissance disponible. Ils conviennent particulièrement aux moteurs à faible vitesse que l'on trouve généralement sur les grands vraquiers.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Moteurs au mazout fonctionnant à faible vitesse.	Réduction des émissions de GES	Coût et entretien



(Egcsa, 2014)

Boucle de circulation des gaz d'échappement

3.1.4.9 Récupération de chaleur résiduelle

Un système de récupération de chaleur résiduelle utilise une technologie qui capte et exploite la chaleur résiduelle provenant de diverses sources, telles que les gaz d'échappement des moteurs principaux ou des groupes électrogènes. Sachant que les moteurs à combustion interne des navires gaspillent généralement plus de 50 % de l'énergie du carburant sous forme de gaz d'échappement et de pertes thermiques (Farhat, 2022), il existe un potentiel important de récupération d'énergie à bord. En général, un échangeur de chaleur est installé dans la cheminée pour récupérer la chaleur résiduelle du moteur à combustion, qui est ensuite convertie en vapeur ou en électricité par le biais de chaudières ou de turbines.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement	Coût, complexité, entretien

3.1.4.10 Capture du carbone à bord

Les systèmes de capture du carbone à bord (CCB) séparent le dioxyde de carbone présent dans les gaz d'échappement pendant le fonctionnement du navire. Les principales méthodes de capture du carbone utilisent des produits chimiques (souvent à base d'ammoniac) et de la chaleur pour capturer et retenir le

dioxyde de carbone. Une fois capturé à bord, le dioxyde de carbone stocké peut être vidangé dans un port disposant d’installations appropriées. Plusieurs personnes rencontrées reconnaissent le potentiel des systèmes de capture du carbone pour réduire les impacts environnementaux et certains coûts, mais les défis liés au stockage et à la vidange du carbone capturé constituent des obstacles à leur adoption à grande échelle. De plus, certains soulignent la variabilité des mesures d’efficacité de ces systèmes, ce qui jette un doute sur leur viabilité dans l’industrie maritime.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Exige des opérations à terre.	Réduction des émissions de GES (CO ₂)	Coût, entretien, complexité, encombrement, poids



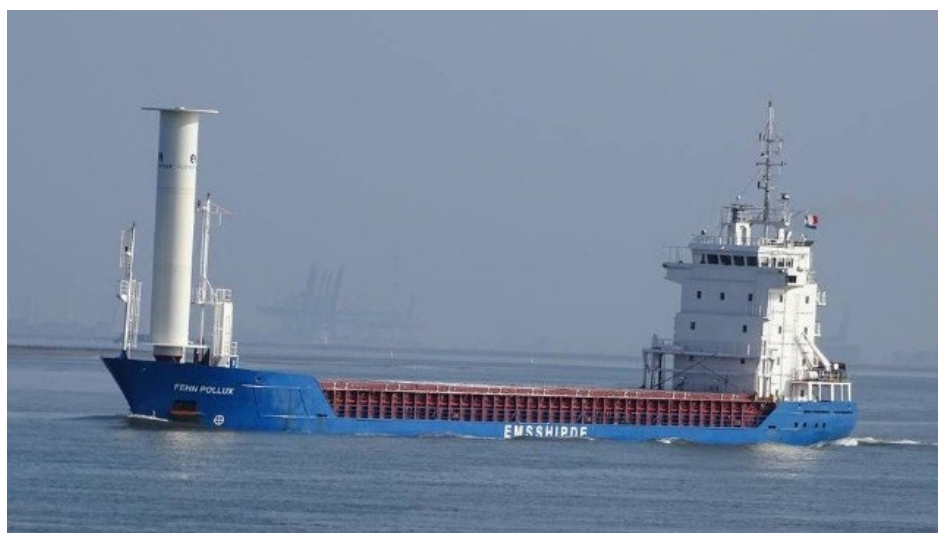
(Hiles, 2020)

3.1.4.11 Propulsion éolienne

L’utilisation de la propulsion éolienne dans la conception des navires repose sur l’exploitation de la puissance du vent pour améliorer l’efficacité des bateaux et réduire leurs impacts environnementaux. Plusieurs technologies peuvent être utilisées (voiles rigides/semi-rigides, rotors, voiles géantes, etc.) pour capter l’énergie du vent et agir en complément, voire remplacer, les systèmes de propulsion traditionnels (moteurs). De manière générale, les économies de carburant découlant de la propulsion éolienne combinée à une optimisation des itinéraires en fonction des conditions météorologiques peuvent atteindre 30 % pour des navires modifiés et davantage pour de nouveaux navires. La plupart des projets de propulsion éolienne dans le transport maritime international sont en réalité des projets de propulsion assistée par le vent, ce qui signifie que la majeure partie de la puissance de propulsion est fournie par des moteurs à combustion interne. Par contre, il est possible que l’énergie éolienne soit utilisée comme puissance de propulsion principale pour le transport local et certaines applications spéciales.

Les rotors Flettner sont des cylindres rotatifs placés sur le pont des navires qui exploitent la poussée aérodynamique générée par la rotation. Ils sont reliés aux groupes électrogènes principaux ou à des batteries du navire. Générant de la portance et de la puissance de propulsion, ils permettent de réaliser des économies de carburant allant de 5 % à 20 %, selon la taille du rotor, la conception du navire et les conditions de vent dominantes. L’installation de ces équipements sur des navires déjà en service implique des coûts initiaux importants (EMSA, 2023).

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. En fonction de l'itinéraire, en combinaison avec le routage météorologique.	Amélioration du rendement, génération d'une force de propulsion substantielle, réduction du bruit, diminution de toutes les émissions atmosphériques (y compris les polluants).	Les équipages doivent recevoir des formations, car ces technologies sont encore peu connues. Ne fonctionne pas complètement face au vent ou complètement sous le vent.



(Downing, 2020)

Voiles rigides / semi-rigides : Ces structures ont une forme similaire à des ailes d'avion, mais elles sont verticales et de construction rigide ou semi-rigide. Elles peuvent générer une plus grande puissance de propulsion par unité de surface que les voiles traditionnelles en tissu. Avec plus de 20 installations déjà en place et d'autres en cours de construction ou à l'étude, cette technologie est de plus en plus répandue.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Utilisation dépendante de l'itinéraire (moins que les rotors)	Amélioration du rendement, réduction du bruit, diminution des émissions atmosphériques (y compris les polluants).	Les équipages doivent recevoir des formations, car ces technologies sont encore peu connues



(Saul, 2023)



(Wallenius Marine, 2020)



(Lewis, 2021)

Voiles souples : Ces voiles existent dans plusieurs configurations à haut rendement et offrent l’avantage de pouvoir être rangées dans un espace réduit lorsqu’elles ne sont pas utilisées.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Utilisation dépendante de l’itinéraire.	Amélioration du rendement, réduction du bruit, réduction des émissions (incluant les polluants atmosphériques).	Les équipages doivent recevoir des formations, car ces technologies sont encore peu connues



(Cockburn, 2021)

Voiles d’aspiration : Les voiles d’aspiration, telles que les Ventifoils ou les turbovoiles, sont dotées d’une aile fixe avec des ouvertures et des ventilateurs internes ou des mécanismes similaires qui génèrent un courant d’aspiration, maximisant ainsi la force de propulsion. Ces systèmes ont un potentiel considérable d’économies de carburant et de réduction des émissions. Des voiles d’aspiration ont été installées sur des navires de transport de marchandises et un premier pétrolier équipé de voiles d’aspiration est déjà en service.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service, utilisation dépendante de l’itinéraire	Amélioration du rendement, génération d’une grande puissance de propulsion, réduction du bruit, réduction des émissions (incluant les polluants atmosphériques)	Les équipages doivent recevoir des formations, car ces technologies sont encore peu connues



(Chambers, 2022)

Voiles géantes : Le déploiement de voiles géantes mobiles ou fixes à de grandes hauteurs (jusqu'à plusieurs centaines de mètres) permet de capter des vents plus forts pouvant être utilisés pour faciliter la propulsion ou de générer à la fois une poussée et de l'électricité.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service, utilisation dépendante de l'itinéraire.	Amélioration du rendement, réduction du bruit, réduction des émissions (incluant les polluants atmosphériques).	Les équipages doivent recevoir des formations, car ces technologies sont encore peu connues.



(Berrill, 2023)

3.1.5 Améliorations opérationnelles

Les améliorations opérationnelles visent à augmenter le rendement, réduire les émissions et atténuer les impacts environnementaux engendrés par les navires en service. Elles incluent l'optimisation de la route, l'arrivée juste-à-temps, le nettoyage de coque et l'alimentation électrique à quai.

3.1.5.1 Optimisation de la route

Les outils d'optimisation de la route (notamment au moyen de capteurs installés sur les navires et de l'analyse de mégadonnées) fournissent des prédictions en temps réel des conditions météorologiques, ce qui permet aux sociétés de transport maritime de mieux planifier les routes. En considérant diverses variables, comme la configuration des vents, les courants marins et la prévision des tempêtes, elles peuvent choisir la route présentant les conditions les plus favorables, ce qui contribue à réduire la durée des trajets et la consommation de carburant. Ces outils facilitent la planification stratégique des arrêts pour le soutage et l'optimisation des niveaux de carburants à bord. Les outils d'apprentissage automatique peuvent aussi servir à optimiser la route grâce à l'analyse prédictive, améliorant ainsi le rendement opérationnel. Ces constats soulignent une possible synergie entre les technologies de pointe, l'analyse des mégadonnées et les stratégies opérationnelles pour maximiser la performance des navires et amoindrir leurs impacts environnementaux.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction des émissions	L'équipage et la société de gestion de navires doivent apprivoiser la méthode, contraintes dues aux contrats d'affrètement

3.1.5.2 Arrivée juste-à-temps

Le concept d'arrivée juste-à-temps (JAT) consiste à optimiser l'horaire d'arrivée des navires au port pour limiter les temps d'attente. Cette stratégie améliore le rendement opérationnel et diminue les émissions lors des escales. Selon les recherches, l'adoption mondiale des arrivées JAT pourrait réduire jusqu'à 30 % des émissions (MarineTraffic, 2022).

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction des émissions	Contraintes dues aux contrats d'affrètement et autres obligations juridiques, la société de gestion de navires doit approuver la méthode

3.1.5.3 Nettoyage de la coque

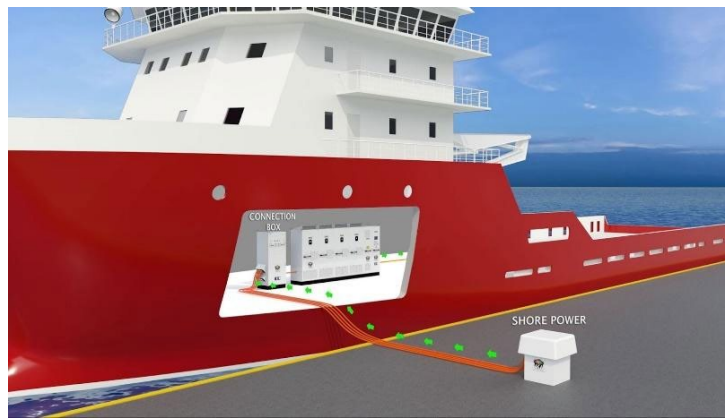
Il est essentiel de respecter des pratiques rigoureuses de nettoyage de coque pour prévenir l'accumulation d'organismes salissants sur les parties submergées des navires. Une coque propre permet à la fois de diminuer la traînée (et donc de réduire la consommation de carburant) et de limiter les effets néfastes causés par les espèces envahissantes. Mieux nettoyer la coque (notamment par l'adoption de coques autonettoyantes) a souvent été mentionné dans les entretiens comme moyen de réduire les impacts environnementaux.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service	Amélioration du rendement, réduction des émissions, facilitation de l'entretien	Possibilité de salissure marine

3.1.5.4 Alimentation électrique à quai

On parle d'alimentation électrique (ou branchement) à quai lorsqu'un navire amarré dans un port coupe ses génératrices pour se brancher au réseau électrique terrestre. Cette pratique diminue considérablement la consommation de carburant et les émissions pendant le séjour à quai. Pour la faciliter, les ports doivent munir les postes d'amarrage de connexions électriques haute tension adéquates. On pourrait ainsi réduire la totalité des émissions lorsque les navires sont amarrés.

Application	Avantages	Inconvénients
Nouveaux navires, navires déjà en service. Infrastructures portuaires nécessaires.	Amélioration du rendement, réduction des émissions	Augmentation des coûts pour les organisations portuaires, mise à niveau du réseau électrique et production d'énergie renouvelable supplémentaire



(AKA Energy Systems, 2021)

3.2 Impacts environnementaux influencés par les technologies

Les technologies énumérées ci-dessus peuvent influencer, de façon favorable ou non, différents impacts environnementaux. Le tableau 1 illustre dans une matrice les impacts environnementaux à considérer pour chaque technologie listée dans ce document.

Tableau 1. Relation entre les technologies de réduction des impacts environnementaux des navires et les effets sur le transport maritime

			Impacts environnementaux de la navigation maritime			
			Émission de gaz à effet de serre (GES) et pollution atmosphérique	Bruit, vibration et autres perturbations physiques	Pollution de l'eau due aux rejets des navires (eaux de ballast, eaux grises, eaux noires, eaux de cale, eaux de lavage des épurateurs) et déchets solides	Introduction d'espèces envahissantes
Technologies de réduction des impacts environnementaux	Amélioration de l'hydrodynamique	Hélices à haut rendement	X	X		
		Tuyères et conduits	X	X		
		Ailerons et guides	X			
		Géométrie de l'étrave	X			
		Géométrie du gouvernail	X	X		
		Peintures antisalissures à haute performance	X		X	X
		Conception de la coque	X	X		
	Amélioration de l'aérodynamique	Carénage des superstructures	X			
	Amélioration de l'armement	Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)	X			
		Isolation à haut rendement	X			
		Éclairage à DEL	X			
		Incinérateurs	X		X	
		Gazéfieurs	X		X	
		Compacteurs de déchets	X		X	
		Systèmes avancés de traitement des eaux de ballast			X	X
	Amélioration de la propulsion	Épurateurs d'oxydes de soufre	X		X	
		Réduction catalytique sélective	X			
		Recirculation des gaz d'échappement	X			
		Récupération de chaleur résiduelle	X			
		Capture du carbone à bord	X		X	
		Piles à combustible	X	X	X	
		Variateurs de fréquence	X	X		
		Groupe électrogène diesel	X	X		
		Propulsion éolienne	X	X		
	Améliorations opérationnelles	Optimisation de la route	X	X		X
		Arrivée juste-à-temps	X			
		Nettoyage de la coque	X	X		X
		Alimentation électrique à quai	X	X		

4.0 Conception de navires : priorités et processus décisionnel

Cette section traite du processus de conception de navires : priorités clés, facteurs, avantages, inconvénients et compromis, normes, et autres considérations qui entrent en jeu dans le processus décisionnel. Le but est de brosser un portrait plus clair du processus décisionnel entourant l'adoption de technologies de réduction des impacts environnementaux.

4.1 Portrait du processus décisionnel dans la conception de navires

La conception de navires est généralement considérée comme un processus itératif qui suit une approche spiralaire (**figure 5**), les décisions étant souvent revues et ajustées au fur et à mesure qu'avance le processus. L'armateur, le concepteur et le chantier naval participent à ce processus itératif, souvent à différents stades du projet, jusqu'à aboutir au navire qui respectera les exigences opérationnelles et réglementaires, les normes de l'industrie et le budget prévu. La **figure 5** ci-dessous présente les étapes de conception types et les principaux acteurs concernés à chacune d'elles.

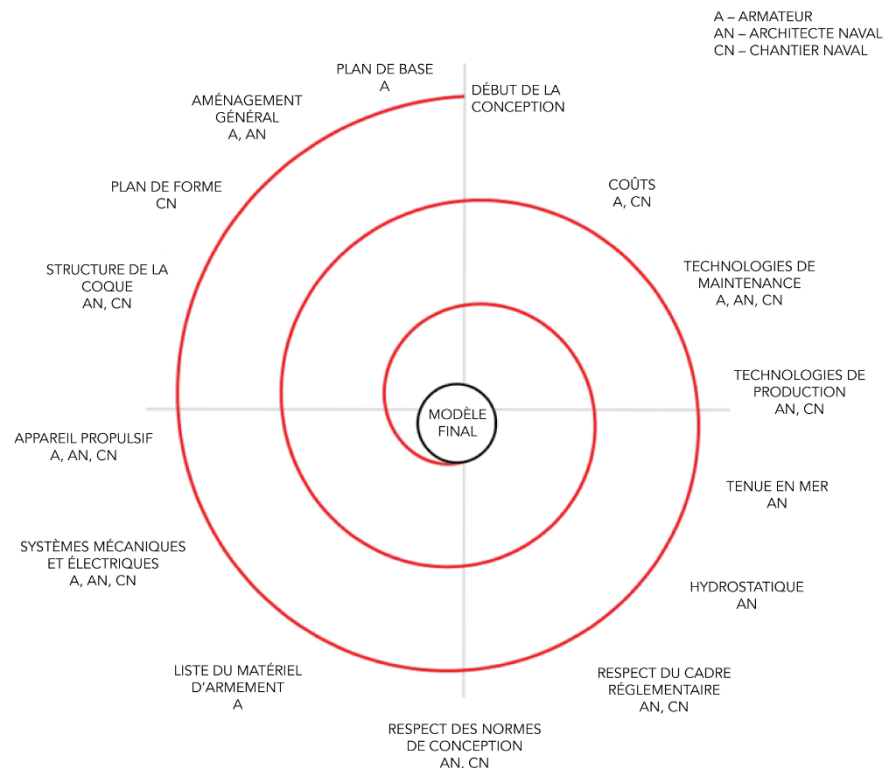


Figure 1. Étapes de conception d'un navire

Le processus décisionnel visant le choix de technologies ou de dispositifs particuliers tient compte de différents facteurs, notamment :

- du type de navire, de la mission et du profil d'exploitation, entre autres : vitesse, autonomie, tirant d'eau, limites de tirant d'air, exigences pour la navigation en passage restreint (p. ex.

chenal);

- des exigences réglementaires, qui englobent les règlements en vigueur aussi bien que les règlements attendus, par exemple de nouvelles normes environnementales;
- de considérations d'ordre opérationnel, comme les charges d'exploitation, les exigences relatives à la formation de l'équipage et les besoins en matière de maintenance;
- de la structure, de la fonction et de l'aménagement du navire, en fonction d'autres facteurs tels que le poids, l'espace disponible et la disposition des composantes, de même que de leur rôle dans des fonctions cruciales comme la gestion de la cargaison, des paramètres qui permettent en outre d'évaluer si les systèmes vitaux (comme les systèmes de production d'eau douce ou d'électricité) ont la capacité nécessaire pour alimenter les technologies sélectionnées;
- de la connaissance des technologies de réduction des impacts, les architectes navals ayant tendance à opter pour des technologies qu'ils maîtrisent bien ou qu'ils ont déjà utilisées parce qu'ils en connaissent bien les risques, le rendement, les interfaces, la configuration et le poids.

4.2 Rôles et responsabilités dans le processus décisionnel

Les principaux acteurs de la conception d'un navire sont les suivants (figure 6) :

- **Armateur** : Responsable de définir les exigences et les contraintes budgétaires. L'armateur encadre la gestion et l'exploitation du navire, et privilégie généralement les technologies qu'il connaît et dont la fiabilité a été éprouvée.
- **Architecte naval** : Architectes et ingénieurs navals chargés d'élaborer des plans de navires dont les caractéristiques techniques respectent les exigences de l'armateur et les contraintes budgétaires. Ces derniers évaluent différentes options technologiques pour la conception de la coque, les systèmes de propulsion, la stabilité et l'aménagement général.
- **Chantier naval** : Responsable de la construction des navires selon les plans fournis par l'architecte naval. Le chantier naval travaille en étroite collaboration avec l'armateur et l'architecte naval en vue de garantir l'intégration des choix de conception dans le processus de construction, ce qui exige notamment des installations et une expertise à la hauteur des technologies choisies.
- **Société de gestion de navires** : Joue un rôle central dans la coordination des différents acteurs de la conception en s'assurant, grâce à son expertise, que les composantes technologiques des navires correspondent aux objectifs opérationnels, réglementaires et financiers établis. Si son rôle principal consiste à fournir à l'armateur et aux affréteurs des services de gestion de flotte divers, par exemple de gestion technique, commerciale ou financière, elle aide aussi l'armateur dans la sélection des technologies aux différents stades de la conception et veille, en collaboration avec les sociétés de classification et les organismes de réglementation, à ce que les navires respectent les exigences opérationnelles.
- **Fabricants/fournisseurs d'équipement** : Entreprises externes chargées de la fabrication de la plus grande partie des équipements du navire, répertoriées dans la liste des fabricants du cahier des charges ou du contrat de construction navale. L'architecte naval s'appuie sur les renseignements fournis par les fabricants d'équipements, particulièrement en ce qui touche les technologies émergentes.
- **Sociétés de classification** : Établissent les normes techniques de conception, de construction,

d'exploitation et de maintenance des navires. Les sociétés de classification examinent et approuvent les plans techniques, supervisent la construction et s'assurent que les navires respectent la réglementation au moyen de vérifications et d'inspections.

- **Administration du pavillon** : Veille au respect des règlements nationaux et internationaux sur la sécurité, l'environnement et le travail tout au long du cycle de vie des navires. Les administrations du pavillon peuvent déléguer certaines fonctions aux sociétés de classification.
- **Organismes de réglementation** : Organisations, comme l'OMI et Transports Canada (TC), qui édictent et appliquent les règlements régissant la conception, la construction et l'exploitation des navires, afin d'assurer la sécurité et le respect des normes environnementales.
- **Affréteur** : Loue des navires pour une période définie. Les affréteurs peuvent avoir des préférences en matière de technologies embarquées, ce qui influencera le choix des équipements et la performance des navires.
- **Assureur maritime** : Évalue les risques d'exploitation et fournit une couverture. L'assureur encourage parfois des mesures de sécurité particulières et peut tenir compte des pratiques écologiques et de l'historique des réclamations relatives à la technologie pour établir la prime.
- **Prêteurs maritimes institutionnels** : Fournissent des capitaux pour l'acquisition, l'exploitation et la maintenance des navires et des infrastructures maritimes, soit du financement spécialement conçu pour l'industrie, comme les hypothèques maritimes, le crédit-bail et le financement de projets. Certains établissements financiers favorisent l'investissement soucieux de l'environnement par l'entremise de modalités accessibles et avantageuses, tandis que d'autres refusent de soutenir les projets qui ne relèvent pas de cette approche. À cet égard, on trouve dans la taxonomie des activités durables de l'Union européenne des critères qui définissent ce type d'investissement. Il y a également les principes de Poséidon, des normes facultatives visant la décarbonisation du transport maritime qui rassemblent 34 grandes institutions financières des quatre coins du globe autour d'un même engagement : aligner leur portefeuille de financement des navires sur les objectifs de durabilité de l'environnement.

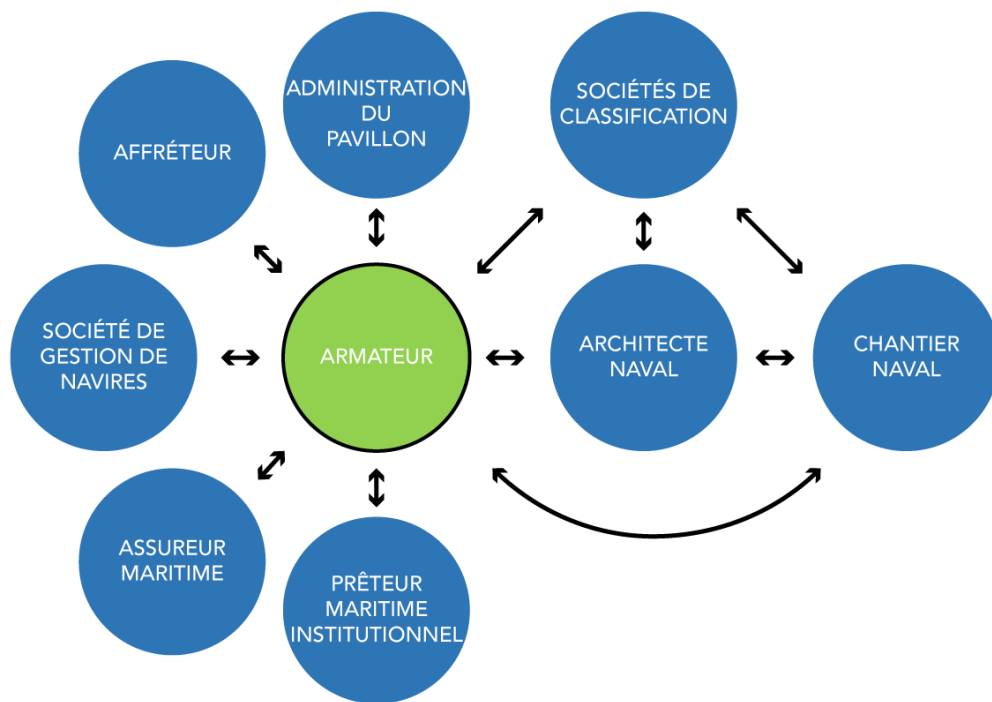


Figure 6. Acteurs du processus décisionnel

4.3 Priorités au stade de la conception

La conceptualisation d'un navire est une tâche complexe qui vise essentiellement à transposer les exigences et attentes de l'armateur en une conception fiable présentant un risque quantifiable et minimal pour le constructeur de navires (ou l'entité responsable du plan de base). Avant d'évaluer les technologies de réduction des impacts environnementaux, il faut prendre en considération les éléments suivants :

Charge de propulsion : La charge de propulsion est la puissance ou la force nécessaire pour faire avancer un navire dans l'eau. Différentes méthodes permettent de la calculer : calculs empiriques, analyse de régression, bassin d'essais des carènes, mécanique des fluides numérique (MFN). Pour ce faire, l'architecte naval devra d'abord déterminer les principales caractéristiques du navire, notamment ses dimensions, la forme de la coque, le déplacement d'eau et la vitesse. C'est au cours de ce processus que l'architecte peut envisager des améliorations du point de vue de l'hydrodynamique.

Profil d'exploitation : Le profil d'exploitation du navire fournit une description quantitative du mode de fonctionnement prévu, à l'aide de variables comme le temps passé à quai, à vitesse économique ou maximale, en manœuvre ou en positionnement dynamique (ou DP, pour dynamic positioning)¹. Dans le cas des navires à vocations multiples, il peut y avoir différents profils à considérer, un élément dont il faudra tenir compte pour choisir les technologies de réduction des impacts les plus appropriées. Par exemple, pour un navire qui demeure surtout en positionnement dynamique et dont le temps de transit est limité, on se concentrera davantage sur la réduction de la charge en positionnement dynamique, en tenant compte, entre autres, de la taille du navire, de la surface exposée au vent, du type de propulseurs

¹ Dans le domaine du transport maritime, le « positionnement dynamique » désigne un système permettant aux navires de maintenir leur position et de garder le cap automatiquement grâce à une combinaison de propulseurs, de systèmes de propulsion et de capteurs.

et de l'efficacité de ces derniers. À l'inverse, pour un navire de commerce international naviguant à des vitesses quasi constantes pendant de longues périodes, il sera plus profitable de privilégier l'aspect hydrodynamique mentionné plus haut. Par ailleurs, pour réduire les impacts le plus possible, l'armateur et l'architecte naval doivent établir clairement les exigences strictes et les exigences négociables en fonction du profil d'exploitation. Par exemple, des améliorations sur le plan de la manutention portuaire (chargement/déchargement) pourraient favoriser des escales plus courtes et permettre des vitesses de transit plus lentes sans nuire à l'échéancier global.

Conditions de l'environnement : Le profil d'exploitation est lié à des conditions ambiantes typiquement contraignantes. Dans le contexte du transport maritime, cela se traduit souvent par l'établissement d'une marge de puissance, une exigence généralement énoncée dans le cahier des charges ou les prescriptions de l'armateur. En effet, les extrêmes de température peuvent augmenter considérablement la charge du système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), particulièrement sur les gros navires à passagers et les navires à usage spécial (ou SPS, pour Special Purpose Ships).

Équilibre des charges : La charge de propulsion et de manœuvre et la charge de l'équipement secondaire à bord s'additionnent dans le calcul des charges, qui détermine l'énergie requise pour chaque opération et la puissance installée nécessaire. En analysant les pics et les creux d'énergie, on pourra envisager des méthodes de répartition des charges, par exemple l'utilisation de batteries.

Les entretiens ont révélé que le plus souvent, pendant la phase de conception, l'armateur (ou l'exploitant) collabore avec le chantier naval, des architectes tiers et des consultants afin de réaliser des évaluations qui renforceront sa confiance dans les performances de l'appareil avant le déploiement de la construction.

4.4 Priorités au stade de la construction

Les décisions prises pendant la phase de construction relèvent principalement de l'armateur et reposent largement sur la réglementation. En l'absence de réglementation toutefois, il arrive souvent que l'intégration des technologies de réduction des impacts environnementaux soit négligée.

4.4.1 Projets de nouvelles constructions

Lors de l'analyse des technologies de réduction des impacts environnementaux, durant la phase initiale de conception, l'armateur rédige avec l'architecte naval un cahier des charges détaillant l'ensemble des aspects à intégrer dans la construction. L'architecte l'éclaire sur l'adoption de certaines technologies en fonction des principales caractéristiques du navire, et lui suggère des solutions de rechange au besoin. Ces choix dépendent cependant aussi de l'emplacement du chantier naval et des conditions dans lesquelles la construction aura lieu. En effet, les chantiers navals ne disposent pas tous de l'expertise ou des ressources nécessaires pour construire ou installer des technologies complexes, voire uniques, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires si la nécessité de se procurer des outils spécialisés, d'offrir de la formation ou de recourir à la sous-traitance s'impose. Les décisions relatives aux technologies doivent ainsi être prises avant la signature du contrat, à l'étape de l'étude de faisabilité ou peu après, c'est-à-dire au cours de la phase de conception, car tout changement entrepris plus tard, y compris sur ce plan en particulier, pourrait s'avérer très coûteux, voire inabordable. Dans bien des cas, le contrat de construction ou de réparation navale comportera une clause de modification de contrat (ou VTC, pour Variation to Contract) permettant à l'armateur de formuler de nouvelles demandes après la signature, clause dont

l'application pourrait toutefois engendrer des coûts importants. En général, plus le processus de construction ou de réparation est complexe, plus les coûts liés à la modification sont élevés.

Au bout du compte, c'est l'armateur qui a le dernier mot, car c'est à lui que revient le choix des technologies du navire, un processus décisionnel qui devra être éclairé par la prise en compte de différents facteurs que voici.

4.4.1.1 Coût en capital

Investissement de départ nécessaire à la mise en place de la nouvelle technologie. Le retour sur investissement dépend du coût en capital et des coûts d'exploitation de la technologie par rapport aux autres options.

4.4.1.2 Coûts d'exploitation

Implication sur les coûts (hausse ou baisse) de la mise en place de la technologie. Les coûts d'exploitation englobent les dépenses de carburant, les frais de formation d'équipage et les coûts de maintenance.

4.4.1.3 Conformité réglementaire

Les technologies intégrées doivent être conformes aux réglementations nationales et internationales applicables. L'armateur privilégiera l'adoption de technologies qui garantissent le respect de règlements en vigueur ou à venir.

4.4.1.4 Compétitivité

Si la conformité réglementaire et les coûts influent sur la compétitivité, d'autres facteurs peuvent améliorer la valeur commerciale future du navire, par exemple la perception de l'innovation et la responsabilité environnementale.

4.4.1.5 Fiabilité et risques

Malgré l'attrait des nouvelles technologies, que ce soit sur papier ou lors d'essais menés dans des conditions contrôlées, l'armateur priorisera la fiabilité de la technologie en cherchant à réduire les perturbations des activités pouvant découler d'une mauvaise connaissance de la technologie, du manque de services portuaires ou de problèmes techniques imprévus.

4.4.1.6 Tendances de l'industrie

Les tendances technologiques dans les flottes similaires peuvent influencer considérablement les décisions de l'armateur sur ce plan, celui-ci pouvant se sentir obligé d'adopter certaines technologies pour demeurer compétitifs et en phase avec l'évolution de l'industrie.

4.4.1.7 Connaissances

Les connaissances de l'armateur sur la technologie ciblée influenceront grandement son choix. Une bonne maîtrise de la technologie par l'équipage garantira le bon déroulement des opérations et évitera des risques d'exploitation supplémentaires. Le niveau d'expertise des fournisseurs d'équipement maritime joue également un rôle important dans la décision de l'armateur, car il a une incidence directe non seulement sur les coûts d'exploitation et de maintenance, mais aussi sur la faisabilité globale de l'adoption de la technologie.

4.4.1.8 Financement

Les options de financement sont d'une importance fondamentale pour l'armateur qui envisage l'adoption de nouvelles technologies. Pour couvrir les coûts d'investissements et d'exploitation, il peut être nécessaire de considérer différents modèles financiers, comme les prêts traditionnels, le crédit-bail ou des partenariats. Toutefois, selon le coût total et le niveau de risque, l'armateur pourrait ne pas avoir accès à certaines formes de financement ou encore ne pas bénéficier de conditions d'emprunt avantageuses. Les subventions gouvernementales peuvent d'autre part s'avérer d'une aide précieuse dans le processus d'investissement technologique.

Les opinions recueillies dans le cadre des entrevues réalisées font ressortir l'importance déterminante des coûts dans le processus décisionnel; ils constitueraient ainsi une entrave considérable à l'adoption ou à l'exploration de technologies dont la mise en œuvre exigerait des capitaux supplémentaires, d'où l'importance d'évaluer soigneusement les conséquences financières et le rendement potentiel des investissements liés à leur intégration dans les systèmes existants ou les opérations.

4.4.2 Projets de modernisation

Les décisions concernant l'intégration de technologies dans un navire déjà en service (modernisation) reposent en grande partie sur les mêmes principes que ceux décrits plus haut pour la construction de nouveaux navires. Cependant, l'armateur qui souhaite entreprendre un projet de modernisation devra en outre tenir compte d'autres facteurs importants :

- Compatibilité avec les systèmes déjà en place : Même si de nouvelles technologies sont disponibles, il est possible qu'elles ne soient pas toutes compatibles avec les technologies déjà en place à bord du navire. L'armateur pourrait hésiter à adopter des technologies qui nécessiteraient des modifications importantes sur le navire.
- Durée de vie du navire : Un autre point à considérer est la durée de vie utile restante du navire par rapport au degré pressenti de retour sur investissement. Il s'agit ici de déterminer combien de temps le navire peut encore servir à des activités rentables par rapport aux profits qu'il peut générer pendant cette période, une évaluation fondée notamment sur l'état actuel du navire, l'historique de maintenance, l'usure, la demande du marché pour les services qu'il offre, les flux de rentrées prévus et le coût de remplacement. En comparant la durée de vie restante du navire avec le retour sur investissement attendu, les parties prenantes seront à même de prendre des décisions éclairées sur la gestion des actifs, le renouvellement de la flotte et de l'allocation des capitaux dans le secteur maritime.
- Temps d'improvision et ralentissement potentiel des affaires : Malgré l'intérêt de l'armateur pour certaines technologies, la perspective d'une période d'improvision importante et d'un ralentissement des affaires résultant d'une mise hors service prolongée du navire est susceptible de le dissuader de leur mise en œuvre. Les armateurs doivent souvent trouver un équilibre entre le temps d'affrètement, l'exploitation du navire, les inspections et passages en cale sèche planifiés, et la maintenance régulière. Il arrive par ailleurs que la modernisation ne soit effectuée que partiellement pendant que le navire est en mer, de manière à perturber le moins possible les horaires de navigation.
- Contraintes d'espace et ajustements structurels : Le système installé dans le cadre d'un projet de

modernisation nécessite parfois des aménagements d'espace différents de ceux du système existant. Des modifications structurelles importantes pourraient notamment amener les sociétés de classification à demander des plans et des analyses supplémentaires pour s'assurer que la structure du navire est adéquate, des contraintes susceptibles de diminuer l'enthousiasme de l'armateur quant à l'instauration des technologies qui, quoique attrayantes au premier abord, posent en fait des défis logistiques dans la pratique.

4.5 Incitatifs, sanctions et sélection de technologies

La plus importante sanction pécuniaire influençant la sélection de technologies est la tarification du carbone. L'objectif est d'augmenter le coût d'utilisation des combustibles fossiles habituels pour favoriser l'adoption de technologies et de combustibles qui réduisent les émissions de GES.

Le principal exemple est le système d'échange de quotas d'émission (ETS) de l'UE qui est entré en vigueur en 2024 pour tous les navires d'expédition dont la jauge brute est supérieure ou égale à 5 000 tonnes. En 2025, les navires doivent déclarer leurs émissions et verser une somme équivalant à 40 % de leurs émissions de GES (ou 50 % de leurs émissions pour les voyages en provenance ou à destination d'un port n'appartenant pas à l'UE). D'ici 2027, ils devront verser une somme équivalant à 100 % de leurs émissions de GES. La somme à verser sera calculée par tonne d'éq. CO₂, le coût actuel étant situé à 100 euros par tonne d'éq. CO₂ (en date de février 2023). Parallèlement, le système d'échange de quotas d'émission (SEQE) du Royaume-Uni devrait entrer en vigueur en 2026.

L'OMI a présenté un calendrier de mise en œuvre de mesures économiques qui seront imposées à partir de 2027. Des discussions sur ces mesures sont en cours au sein de l'organisation. Quelques options sont considérées, dont un SEQE, une taxe sur le carbone, ou une combinaison des deux.

4.6 Risques et incitatifs dans le processus décisionnel

Les entretiens ont fait ressortir le rôle essentiel de la répartition des risques pour stimuler l'innovation dans les processus décisionnels en matière de conception des navires. Certaines personnes interrogées ont mentionné que les risques associés à l'innovation peuvent constituer des obstacles à l'adoption de nouvelles technologies. Il est donc nécessaire d'offrir aux propriétaires et aux exploitants de navires des incitatifs ou de l'aide financière pour atténuer ces risques.

Les entretiens ont aussi révélé que les incitatifs influencent de manière significative le choix des technologies utilisées dans l'industrie maritime, quoique leur incidence varie selon les règlements régionaux. On a notamment insisté sur l'importance des incitatifs (allègements fiscaux, soutien à l'adoption de carburants de remplacement) pour gérer les coûts associés aux technologies plus respectueuses de l'environnement. Des préoccupations ont quand même été soulevées relativement à l'efficacité des incitatifs comme seul facteur d'adoption des technologies. La responsabilité sociale d'entreprise et la fierté de prendre part à des initiatives environnementales sont d'autres facteurs qui influencent le processus décisionnel.

4.7 Importance de l'ampleur des opérations dans le processus décisionnel

L'ampleur des opérations joue un rôle dans le processus décisionnel. Par exemple, on a mentionné dans les entretiens que les petits propriétaires de navires font face à des défis lorsqu'ils investissent dans des technologies novatrices en raison, notamment, des limites financières et contraintes de capacité. Ces contraintes peuvent nuire à leur capacité à adopter des solutions avancées dans le but d'améliorer leur performance environnementale ou leur efficacité opérationnelle. Comparativement, les grandes entreprises sont plus à même d'avoir les ressources et les capacités nécessaires pour surmonter ces obstacles. Leur ampleur leur permet d'allouer de plus gros budgets à la recherche, à la conception et à la mise en œuvre de technologies novatrices. Ces entreprises peuvent également réaliser des économies d'échelle et ainsi négocier de meilleurs prix auprès des fournisseurs de technologies, et elles sont en mesure d'absorber les coûts initiaux plus efficacement. L'ampleur des opérations influence donc grandement la faisabilité et la réussite de l'adoption de technologies novatrices dans l'industrie maritime.

4.8 Prise en considération de l'incertitude dans le processus décisionnel

La présente section décrit le rôle de l'incertitude dans le processus décisionnel, de même que l'évaluation des risques et des possibilités lors de la sélection et de la mise en œuvre de technologies de réduction des impacts environnementaux.

Les participants aux entrevues ont mentionné diverses stratégies adoptées pour tenir compte des incertitudes, des risques et des possibilités dans le cadre du processus décisionnel. Ces stratégies comprennent l'atténuation des risques au moyen de la surveillance des technologies adoptées par les acteurs majeurs de l'industrie, ce qui donne des perspectives sur la disposition de différents ports à prendre en charge des technologies particulières (la capacité de stockage de carburants de remplacement, par exemple). Certaines organisations ont attendu que d'autres exploitants utilisent des technologies sur de bonnes durées pour confirmer leur efficacité et ensuite les adopter à leur tour. La souplesse constitue également une mesure de réduction des risques. La prise en compte de différents combustibles dans la sélection des types de moteurs en est un exemple. Ces mesures nécessitent souvent un compromis, toutefois, comme l'augmentation de l'espace requis et des coûts.

En outre, des modèles de fiabilité et des analyses des modes de défaillance et de leurs effets ont quelquefois servi à évaluer les risques de défaillances de l'équipement et leur fréquence afin d'éclairer le processus décisionnel. L'un des principaux thèmes qui ressort des entretiens est la répartition et le transfert des risques entre les donneurs d'ouvrage, les exploitants de chantiers navals et les concepteurs. Les coûts et la fiabilité font partie des principales sources d'incertitude mentionnées par les personnes interrogées. La création de scénarios permet toutefois d'évaluer différents facteurs. Les analyses internes – comme, dans un cas, les simulations de Monte-Carlo – sont considérées comme des outils précieux pour estimer le poids et la charge électrique afin de réduire l'incertitude. Les incertitudes relatives à la réglementation à venir, quant à elles, sont plus une question de jugement.

4.9 Outils d'aide au processus décisionnel

Les recherches menées dans le cadre de cette étude n'ont révélé aucun outil normalisé d'aide au processus décisionnel pour soutenir la sélection de technologies de réduction des impacts environnementaux dans le secteur maritime. Bien que des modèles et des simulations soient largement utilisés pour appuyer la conception et le processus décisionnel à différentes étapes, aucun bel exemple d'utilisation d'outils d'aide plus généraux, couvrant l'ensemble des impacts environnementaux, n'a émergé en cours d'étude.

Des outils d'aide au processus décisionnel pourraient soutenir les acteurs du transport maritime dans la détermination de solutions technologiques de rechange adaptées pour réduire l'impact environnemental des navires. Ces outils pourraient entre autres permettre de faire ce qui suit :

- Répondre à l'incertitude et à la complexité inhérentes à la prise de décisions relatives à la mise en œuvre de technologies de réduction des impacts.
- Expliciter les jugements implicites afin d'éviter les erreurs décisionnelles et de favoriser la communication entre les équipes.
- Donner une vue d'ensemble des options disponibles ainsi que de l'environnement et du processus décisionnel, et fournir de l'aide et des techniques formelles pour évaluer les compromis à consentir selon plusieurs critères.
- Offrir un processus de reproductibilité pouvant être utilisé par d'autres et être ajusté à l'aide de différents intrants au fil du temps afin de s'adapter aux changements, aux incertitudes et aux facteurs externes (particulièrement utile pour la reddition de comptes, la production de rapports ESG abordant les facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance, et le financement).
- Anticiper l'évolution de la réglementation et s'y adapter.
- Rendre compte des interactions entre les technologies à l'aide de sous-modèles.

Des systèmes informatisés d'aide au processus décisionnel pourraient faciliter le stockage, l'organisation et l'analyse d'une panoplie d'informations, allant bien au-delà des capacités cognitives des décideurs. De tels systèmes peuvent apporter un soutien en situation d'incertitude caractérisée par l'incomplétude des données ou l'imprévisibilité. Grâce à des algorithmes avancés et à leurs capacités de traitement des données, ces systèmes sont en mesure de traiter de grandes quantités d'informations, de dégager des tendances et d'offrir des perspectives qui échapperaient à la seule cognition humaine. Ils sont donc des outils puissants pour aider les décideurs à prendre avec confiance des décisions plus éclairées dans des contextes marqués par la complexité et l'incertitude.

5.0 Conclusion

Ce rapport examinait les technologies de réduction des impacts environnementaux dans le transport maritime, ces données ayant été bonifiées par une étude technologique rigoureuse et des entretiens ciblés. L'étude technologique s'est penchée sur l'amélioration de l'hydrodynamique, de l'aérodynamique, de l'armement et de la propulsion, de même que sur les stratégies opérationnelles. La majorité des technologies offertes visent à améliorer l'efficacité afin de réduire la consommation de carburant. On peut supposer que cette situation est due au désir de se conformer à la réglementation en matière de pollution atmosphérique et de réduire les coûts grâce aux économies de carburant.

L'analyse de la conception et du processus décisionnel dans le cadre de projets de construction de nouveaux navires et de modernisation de navires en service a fait ressortir les rôles essentiels que jouent les coûts et la conformité réglementaire dans le processus décisionnel. L'étude souligne quant à elle l'importance de tenir compte des compromis à faire selon les différentes technologies de réduction des impacts environnementaux. En général, la réduction des impacts environnementaux demeure actuellement une préoccupation secondaire – sauf quand la réglementation en vigueur force à en tenir compte.

Actuellement, les outils normalisés d'aide au processus décisionnel ne sont pas communément utilisés pour choisir des technologies de réduction des impacts environnementaux dans le secteur maritime. Leur utilisation pourrait cependant offrir une aide précieuse aux acteurs du transport maritime qui cherchent des solutions technologiques de rechange adaptées pour réduire l'impact environnemental des navires.

6.0 Références

- ABB (2019). *ABB Azipod® takes marine propulsion to the North Pole and beyond*. <https://new.abb.com/news/detail/30623/abb-azipodr-takes-marine-propulsion-to-the-north-pole-and-beyond>
- ABB (2024). *ABB s'associe à Seaspan Shipyards pour la construction d'un nouveau brise-glace polaire de la Garde côtière canadienne*. <https://new.abb.com/news/fr/detail/112993/abb-sassocie-a-seaspan-shipyards-pour-la-construction-dun-nouveau-brise-glace-polaire-de-la-garde-cotiere-canadienne>
- Algoma Central Corporation (2022). *2021 Sustainability Report*. https://www.algonet.com/wp-content/uploads/2022/07/2022-Sustainability-Report-Final_web.pdf
- Algoma Central Corporation (2024). *Protect marine ecosystems and biodiversity*. <https://www.algonet.com/sustainability/environment/>
- Blenkey, N. (20 juin 2022). *Danish e-ferry sets new world distance record*. *MarineLog*. <https://www.marinelog.com/news/video-danish-e-ferry-sets-new-world-distance-record/>
- Blenkey, N. (21 août 2023). *Cargill-chartered Pyxis Ocean is first ship to sail with WindWing*. *MarineLog*. <https://www.marinelog.com/news/video-cargill-chartered-pyxis-ocean-is-first-ship-to-sail-with-windwings/>
- Blenkey, N. (25 novembre 2023). *Seaspan Shipyards selects Steerprop bow thrusters for polar icebreaker*. *MarineLog*. <https://www.marinelog.com/news/seaspan-shipyards-selects-steerprop-bow-thrusters-for-polar-icebreaker/>
- Bradley, D. L., Stern, R. (2008). *Underwater sound and the marine mammal acoustic environment -A guide to fundamental principles*. https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/sound_bklet.pdf
- Breeze, H., Nolet, V., Thomson, D., Wright, A. J., Marotte, E., Sanders, M. (2022). « Efforts to advance underwater noise management in Canada: Introduction to the Marine Pollution Bulletin Special Issue ». *Marine Pollution Bulletin*, 178(113596). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113596>
- Breeze, H., Nolet, V., Thomson, D., Wright, A. J., Marotte, E., Sanders, M. (2022). *Efforts to advance underwater noise management in Canada: Introduction to the Marine Pollution Bulletin Special Issue*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X22002788>
- Bureau Veritas (2023). *Marine Environment Protection Committee Summary Report (MEPC 80 – juillet 2023)*.
- Bureau Veritas Marine & Offshore (2023). *An Overview of Ammonia as Fuel for Ships*. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/shipping-decarbonization/future-fuels/ammonia#:~:text=There%20are%20several%20advantages%20to,is%20widely%20and%20freely%20available>

Byrnes, T., Dunn, R. (2020). Boating-and Shipping-Related Environmental Impacts and Example Management Measures: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 908. <https://doi.org/10.3390/jmse8110908>

Chakraborty, S. (28 octobre 2022). « Controllable Pitch Propeller (CPP) Vs Fixed Pitch Propeller (FPP) ». *Maritime Insight*. <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/controllable-pitch-propeller-cpp-vs-fixed-pitch-propeller-fpp/>

Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., Renken, K. (2021). « A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology ». *Sustainability*, 13(4), 1880. <https://doi.org/10.3390/su13041880>

Clear Seas (2023). Évaluation des polluants présents dans les eaux usées provenant des épurateurs – Pour une réglementation éclairée des systèmes d'épuration des gaz d'échappement des navires, août 2022. Clear Seas – Centre pour le transport maritime responsable. Consulté le 13 février 2023 [en ligne]. <https://clearseas.org/wp-content/uploads/2019/04/WB-Assessing-Pollutants-in-Scrubber-Discharge-Water-Report-Final-FR.pdf>

Clear Seas (s.d.). *Pollution atmosphérique et transport maritime*. <https://clearseas.org/pollution-atmospherique/>

Clear Seas. (s.d.). *Gestion des déchets provenant des navires commerciaux*. <https://clearseas.org/gestion-des-dechets-provenant-des-navires-commerciaux/>

Commission européenne (s.d.). *Reducing emissions from the shipping sector*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en

Conseil national de recherches Canada (2023). *Briser la glace en toute simplicité*. <https://nrc.canada.ca/fr/histoires/briser-glace-toute-simplicite>

Dąbrowska, J., Sobota, M., Świąder, M., Borowski, P., Moryl, A., Stodolak, R., Kucharczak, E., Zięba, Z., Kazak, J.K. (2021). « Marine Waste-Sources, Fate, Risks, Challenges and Research Needs ». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2):433. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020433>

de Vries, W. (2021). « Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review ». « Current Opinion ». *Environmental Science and Health*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>

Deng, S., Mi, Z. (2023). « A review on carbon emissions of global shipping ». *Mar Dev*1, 4(2023). <https://doi.org/10.1007/s44312-023-00001-2>

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (2011). *Évaluation scientifique canadienne du smog – Faits saillants et messages clés*. N° de catalogue : En88-5/2011F-PDF. https://publications.gc.ca/collections/collection_2012/ec/En88-5-2011-fra.pdf

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (2023). *Émissions de gaz à effet de serre : facteurs et incidences*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre-facteurs-incidences.html>

Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., Khaled, M. (2022). « A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations ». *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100387.

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387>

Garde côtière canadienne – Bureau régional de l'Atlantique (2017). *Statement of Requirements: Supply of New Bubbler Compressors for CCGS Henry Larsen*.

https://buyandsell.gc.ca/cds/public/2017/11/09/530ab6d523c17c688bd118c95a3ed7b0/ABES.PROD.PW_OLZ.B012.E6949.ATTA001.PDF

Garde côtière canadienne (2021). Le gouvernement du Canada annonce la construction de brise-glaces polaires pour renforcer la présence du Canada dans l'Arctique et fournir des services indispensables aux Canadiens. <https://www.canada.ca/fr/garde-cotiere-canadienne/nouvelles/2021/05/le-gouvernement-du-canada-annonce-la-construction-de-brise-glaces-polaires-pour-renforcer-la-presence-du-canada-dans-l-arctique-et-fournir-des-servi.html>

Garde côtière canadienne (2022). Navigation dans les glaces en eaux canadiennes – Chapitre 5 : Conception et construction des navires pour la navigation dans les glaces. <https://www.ccg-gcc.gc.ca/publications/icebreaking-deglacage/ice-navigation-glaces/page06-fra.html>

Garde côtière canadienne (2022). *Overview of the Canadian Coast Guard in the Arctic*. Arctic Marine Natural Gas Supply Chain Study. <https://clearseas.org/wp-content/uploads/2022-Arctic-LNG-Feasibility-Study-Workshop-Canadian-Coast-Guard-Presentation-Overview-of-the-Canadian-Coast-Guard-in-the-Arctic.pdf>

Garde côtière canadienne (2023). Comment les changements climatiques et les initiatives de résilience et d'adaptation influent-ils sur les opérations et les fonctions des gardes côtières : Forum des gardes côtières de l'Atlantique nord, Sommet de 2023. <https://www.ccg-gcc.gc.ca/publications/corporation-information-organisation/initiatives-impact-fra.html>

Gouvernement de la Colombie-Britannique (2023). *Marine Emissions*. <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/air/air-pollution/emissions/transportation/marine>

Gouvernement du Canada (2023). *Règlement sur la pollution par les bâtiments et sur les produits chimiques dangereux* (DORS/2012-69). <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2012-69/page-2.html>

Gouvernement du Canada (2024). *Projets de brise-glaces polaires*. <https://www.canada.ca/fr/services-publics-appvisionnement/services/achats/maritime-defense/strategie-nationale-construction-navale/projets/grands-navires/brise-glaces-polaires.html>

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen,

J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, États-Unis, 1535 p.

Hansen, R. (2011). *Model and Full Scale Evaluation of a 'Propeller Boss Cap Fins' device fitter to an aframax tanker*. https://www.marinepropulsors.com/smp/files/downloads/smp11/Paper/TA2-1_Hansen.pdf

Ingpen, B. (2015). « Diesel-electric propulsion system ». *Maritime Studies South Africa*. <https://maritimesa.org/grade-12/diesel-electric-propulsion-system/#:~:text=Fitted%20below%20the%20hull%20of,the%20watch%20on%20the%20bridge.>

International Council on Clean Transportation (s.d.). *Maritime shipping*. <https://theicct.org/sector/maritime-shipping/>

Jambeck, J. (2018). *Marine plastics*. The Smithsonian Institution. <https://ocean.si.edu/conservation/pollution/marine-plastic>

Lloyd's Register (2023). *80^e session du Comité de la protection du milieu marin de l'OMI (MEPC 80)*. Consulté le 20 février 2024.

Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS) (2022). Reducing methane emissions onboard vessels: An overview of methane emission sources and levels onboard vessels and the technologies, solutions, and regulatory drivers that can help reduce them. <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/publications/Reducing-methane-emissions-onboard-vessels.pdf>

Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS) (2023). *Concept Design of a 15,000 TEU ammonia-fueled container vessel*. <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/concept-design-of-a-15-000-teu-ammonia-fueled-container-vessel/>

Mar, K. A., Unger, C., Walderdorff, L., Butler, T. « Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health ». *Environmental Science & Policy* 134 (2022): 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>

Marine Environment Protection Committee (MEPC) (2024). « Reduction of GHG emissions from ships: Comments on document MEPC 81/7/4 related to Cslip for low-pressure dual-fuel (LPDF) 4-stroke engines based on the results of the Fugitive and Unburned Methane Emissions from Ships (FUMES) project – Submitted by WWF, Pacific Environment, and CSC ». *Marine Environment Protection Committee, 81st session (Agenda item 7, MEPC 81/7/20)*.

MarineTraffic (2022). *Just in Time Arrival – Emission reduction potential in global container shipping*. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2022/06/JIT-Container-Study.pdf>

Maritime Magazine (2021). *Algoma commande le premier navire de la classe Equinox 2.O*. <https://maritimemag.com/fr/algoma-commande-le-premier-navire-de-la-classe-equinox-2-o-en-anglais/>

Mewis, F., Guiard, T. (2011). « Mewis Duct©–new developments, solutions and conclusions ». *Second International Symposium on Marine Propulsors*, 18.

Ministère de la Justice du Canada (2025). *Loi de 2001 sur la marine marchande du Canada* (L.C. 2001, ch. 26). <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-10.15/>

National Marine Fisheries Services (NOAA Fisheries) (s.d.). *Understanding vessel strikes*. <https://www.fisheries.noaa.gov/insight/understanding-vessel-strikes>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2025). *2017-2025 North Atlantic Right Whale Unusual Mortality Event*. <https://www.fisheries.noaa.gov/national/marine-life-distress/2017-2025-north-atlantic-right-whale-unusual-mortality-event>

Neuman, S. (2023). « New technology uses good old-fashioned wind to power giant cargo vessels ». *NPR*. <https://www.npr.org/2023/10/05/1200788439/wind-power-cargo-ships-carbon-emissions>

Nuka Research and Planning Group (2019). *Bilateral workshop – Grey water discharges from vessels*. http://d2akrl9rvxl3z3.cloudfront.net/downloads/grey_water_discharges_from_vessels_workshop_summary.pdf

Office of the Parliamentary Budget Officer (2021). *The Polar Icebreaker Project: A Fiscal Analysis*. <https://distribution-a617274656661637473.pbo-dpb.ca/d8c1cae885be92c964a0216e28e5ff1867e56bc0d63d14af361d24a6ef94cd81>

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (s.d.). « Travaux de l'OCDE en faveur d'un océan durable ». *Océan*. <https://www.oecd.org/fr/themes/oceans.html>.

Organisation maritime internationale (OMI) (2013a). *IMO: What it is* [PDF]. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/About/Documents/What%20it%20is%20Oct%202013_Web.pdf

Organisation maritime internationale (OMI) (2013b). *Noise from commercial shipping and its adverse impacts on marine life*. https://ocr.org/ocr/pdfs/policy/2014_Shipping_Noise_Guidelines_IMO.pdf

Organisation maritime internationale (OMI) (2019a). *Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL)*. [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

Organisation maritime internationale (OMI) (2019b). *International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code)*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>

Organisation maritime internationale (OMI) (2023a). *Ship Noise*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Noisex.aspx>

Organisation maritime internationale (OMI) (2023b). *Improving the energy efficiency of ships*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>

Organisation maritime internationale (OMI) (s.d.). *EEXI and CII -Ship carbon intensity and rating system*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>

Organisation maritime internationale (OMI) (s.d.). *Prevention of pollution by garbage from ships*. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/garbage-default.aspx>

Pêches et Océans Canada (2023). *Plan ministériel 2023-2024* (N° de catalogue Fs1-82F-PDF). <https://www.dfo-mpo.gc.ca/rpp/2023-24/dp-fra.html>

Port de Vancouver (2019). Whales & shipping: How the ECHO Program is working to reduce the cumulative effect of commercial vessel traffic on whales in the Salish Sea. <https://iaac-aeic.gc.ca/050/documents/p80054/129854E.pdf>

Santé Canada (2021). Les impacts sur la santé de la pollution de l'air au Canada : Estimation des décès prématurés et des effets non mortels – Rapport 2021 (N° de catalogue H144-51/2021F-PDF). <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/2021-health-effects-indoor-air-pollution/hia-report-fra.pdf>

Schoeman, R., Patterson-Abrolat, C., Plön, S. (2020). « A global review of vessel collisions with marine animals ». *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00292>

Seaspan (2023). *Polar Progress: Find out what's happening behind the scenes in the development of Canada's new Polar Icebreaker*. <https://www.seaspan.com/stories/polar-progress-find-out-whats-happening-behind-the-scenes-in-the-development-of-canadas-new-polar-icebreaker/>

Seaspan (2024). *Seaspan Shipyards completes 'Prototype Block' for Canadian Coast Guard's future Polar Icebreaker*. <https://www.seaspan.com/press-release/seaspan-shipyards-completes-prototype-block-for-canadian-coast-guards-future-polar-icebreaker/>

Seaspan (s.d.). *Polar Icebreaker*. <https://www.seaspan.com/seaspan-shipyards/shipbuilding/polar-icebreaker/>

Strantzali, E., Livanos, G., Aravossis, K. (2023). « A Comprehensive Multicriteria Approach for Alternative Marine Fuels ». *Energies*, 16(22), 7498. <https://doi.org/10.3390/en16227498>

Tanttari, J. (2020). « Fuel savings through hydrodynamic improvements ». Elomatic. <https://www.elomatic.com/fuel-savings-through-hydrodynamic-improvements/>

Tanttari, J., Hämäläinen, R., Rautaheimo, P. (2022). « The Hydrodynamics of Elogrid ». *SNAME International Marine Design Conference* (p. D021S002R002). SNAME.

Transports Canada (2010). *Transport maritime – Émissions atmosphériques*. <https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/navigation-dans-arctique/emissions-atmospheriques>

Transports Canada (2020). *Comprendre les bruits sous-marins d'origine anthropique*. <https://tc.canada.ca/fr/initiatives/plan-protection-oceans/comprendre-bruits-marins-origine-anthropique>

Transports Canada (2023). *Cadre canadien sur les corridors maritimes verts*.

<https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/pollution-marine-intervention-environnementale/corridors-maritimes-verts/cadre>

U.S. EPA (2020). « Integrated science assessment (ISA) for oxides of nitrogen, oxides of sulfur and particulate matter ecological criteria (Final Report) ». *U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC., EPA/600/R-20/278*. Consulté le 4 décembre 2023 [En ligne].

<https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=349473>

U.S. EPA, « Integrated science assessment (ISA) for sulfur oxides - Health criteria (Final Report) ». *U.S. Environmental Protection Agency, Washington, EPA/600/R-17/451, Dec. 2017*. Consulté le 4 décembre 2023 [En ligne].

<https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=338596>

Vard Marine Inc. (2019). *Greywater generation estimates for the BC coasts*.

https://d2akrl9rvxl3z3.cloudfront.net/downloads/greywater_generation_estimates_for_the_bc_coast_report.pdf

Vard Marine Inc. (2023). Ship energy efficiency and underwater radiated noise (Report No. 545-000-01, Rev. 3). Préparé pour Transports Canada.

Walker, T. R., Adebambo, O., Del Aguila Feijoo, M. C., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S. J., Morrison, C. E., Romo, J. et al. (2019). « Environmental Effects of Marine Transportation ». *World Seas: An Environmental Evaluation*, J. Hamel (éditeur), 505-530. <https://dx.doi.org/10.1016%2FB978-0-12-805052-1.00030-9>

WSP Canada (2014). *Risk assessment of marine spills in Canadian waters – Phase 1: Oil spill south of 60th Parallel*. https://www.wcel.org/sites/default/files/file-downloads/131-17593-00 ERA Oil-Spill-South 150116_pp1-124.pdf