



La route vers un transport maritime à émission quasi nulle : règlements et technologies

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées

(M. Sc. A.)

PAR

© **Ahmed ATEB**

Janvier 2022

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamad Issa, codirecteur de recherche, IMQ

Sasan Karganroudi, examinateur externe, ITMI

Dépôt initial le 14 décembre 2021

Dépôt final le 10 janvier 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

C'est avec un grand plaisir que je consacre ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur **Adrian Ilinca** de l'Université du Québec à Rimouski, de m'avoir offert l'opportunité de travailler avec lui, de son soutien et sa gentillesse tout au long de mon projet. Je tiens à remercier également mon codirecteur, le professeur **Mohamad Issa** de l'Institut maritime du Québec à Rimouski pour les intéressantes discussions que nous avons eu et pour ses conseils avisés.

Même si c'est loin de vous, ma famille et ma fiancée, je vous remercie aussi pour toutes vos suggestions, avoir été à mes côtés, et m'avoir soutenu dans mes études.

Je tiens finalement à remercier les amis que j'ai pu rencontrer pendant ma maîtrise, avec qui j'ai passé des moments inoubliables et qui m'ont soutenu pendant celle-ci.

RÉSUMÉ

L'augmentation des frais de transport maritime due aux prix du carburant ainsi que les restrictions croissantes sur les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes de soufre (SO_x), et des oxydes d'azote (NO_x) imposées par les nouvelles politiques écologiques, ont poussé les compagnies maritimes à promouvoir l'intégration de technologies utilisant des sources d'énergie alternatives sur leurs navires.

Ce travail présente une étude des différentes technologies pour améliorer l'efficacité énergétique et écologique dans les navires marchands, ainsi qu'une analyse des paramètres de fonctionnement des épurateurs des gaz et de la Réduction Catalytique Sélective (RCS) à bord.

Dans le but d'évaluer l'impact d'un épurateur à gaz sur les émissions du dioxyde de carbone et sur le dioxyde de soufre, une simulation d'un trajet pour un navire marchand reliant deux ports méditerranéens a été prise en considération.

Dans un premier temps, nous présentons un aperçu des émissions émises par les moteurs et génératrices diesel marins, suivi des réglementations adoptées récemment par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) pour lutter contre le changement climatique et les pollutions provenant des navires.

La deuxième partie, porte sur l'état de l'art et présente les différentes technologies et solutions disponibles pour rencontrer les exigences de l'annexe VI du MARPOL (maritime Pollution) adoptées par l'OMI et entrer en force depuis 2018. Une étude comparative (avantages et inconvénients) pour chacune des technologies et solutions sélectionnées complétera le chapitre 2.

Parmi les nombreuses solutions qui ont été proposées et étudiées au chapitre 2, seuls les épurateurs à gaz combinés avec la RCS, ont démontré un grand potentiel pour absorber les SO_x, NO_x et le CO₂. Pour cela, le chapitre 3 détaillera ces deux technologies et présentera leurs potentiels une fois adoptés.

Finalement, le chapitre 4 présentera la simulation théorique et les résultats obtenus pour un navire marchand reliant deux ports en Méditerranée et doté d'un épurateur à gaz avec une RCS. Le chapitre 5 conclura les discussions et les résultats obtenus.

Mots clés : Transport maritime, pollution atmosphérique, épurateur de gaz d'échappement, efficacité énergétique, OMI, MARPOL Annexe VI.

ABSTRACT

The increase in shipping costs due to fuel prices as well as the increasing restrictions on carbon dioxide (CO₂), sulfur oxides (SO_x), and nitrogen oxides (NO_x) emissions imposed by new environmental policies, have pushed shipping companies to promote the integration of technologies using alternative energy sources on their ships.

This work presents a study of different technologies to improve energy and environmental efficiency in merchant ships, as well as an analysis of the operating parameters of gas scrubbers and Selective Catalytic Reduction (SCR) on board.

In order to evaluate the impact of a gas scrubber on carbon dioxide and sulphur dioxide emissions, a simulation of a merchant ship journey between two Mediterranean ports was considered.

In the first part, we present an overview of the emissions from marine diesel engines and generators, followed by the regulations recently adopted by the International Maritime Organization (IMO) to fight against climate change and pollution from ships.

The second part, on the state of the art, presents the different technologies and solutions available to meet the requirements of Annex VI of MARPOL (Maritime Pollution) adopted by the IMO and in force since 2018. A comparative study (advantages and disadvantages) for each of the selected technologies and solutions will complete chapter 2.

Among the many solutions that have been proposed and studied in Chapter 2, only gas scrubbers combined with SCR, have shown great potential to absorb SO_x, NO_x and CO₂. Therefore, Chapter 3 will detail these two technologies and present their potential once adopted.

Finally, Chapter 4 will present the theoretical simulation and the results obtained for a merchant ship connecting two ports in the Mediterranean and equipped with a gas scrubber with SCR. Chapter 5 will conclude the discussions and the results obtained.

Keywords: Shipping, air pollution, exhaust gas scrubbers, IMO, MARPOL (Annex VI), energy efficiency.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vi
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	1
CHAPITRE 1 Introduction gÉNÉrale : Impact environnemental du transport maritime.....	1
1.1 IMPORTANCE DU TRANSPORT MARITIME.....	1
1.1.1 Transport maritime mondiale.....	1
1.1.2 La progression du commerce maritime mondial.....	2
1.1.3 Le transport maritime au Québec.....	2
1.2 LES EMISSIONS POLLUANTES DES NAVIRES.....	5
1.2.1 Les émissions de gaz à effet de serre, comparaison selon les trois modes du transport.....	5
1.2.2 Les émissions côtières et dans les ports (exemple port de Montréal).....	9
1.2.3 Les effets des émissions de polluants atmosphériques du transport maritime au Canada.....	12
1.2.4 Prévention de la pollution causée par les navires : protocole de Marpol.....	14
1.3 CONCLUSION.....	20
CHAPITRE 2 Les technologies optimisant l'efficacité ÉNERGÉtique et ÉCOLOGIQUE dans les navires.....	21
2.1 INTRODUCTION.....	21
2.2 TECHNOLOGIES DE CONTROLE DES EMISSIONS.....	22
2.2.1 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de prétraitement.....	22
2.2.2 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de traitement interne :.....	29

2.2.3 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de post-traitement :	32
2.3 L'INNOVATION AU SERVICE DU TRANSPORT MARITIME ET LES RECENTES TECHNOLOGIES	38
2.3.1 La propulsion éolienne.....	38
2.3.2 Les systèmes hybrides.....	42
2.3.3 Optimisation par des solutions électriques	44
2.3.4 Architecture navale pour la réduction de la consommation du carburant	48
2.3.5 Navigation à vitesse réduite (slow steaming)	51
2.3.6 Récapitulatif des avantages et inconvénients.....	53
2.4 CONCLUSION	56
CHAPITRE 3 <u>Equation Chapter 3 Section 1</u> Les épurateurs à gaz pour une Émission quasi-nulle	58
3.1 INTRODUCTION	58
3.2 LES TECHNIQUES D'ABSORPTION ET LE TRAITEMENT DES GAZ DANGEREUX	59
3.2.1 Liquide de lavage.....	60
3.2.2 Les types de contacteurs gaz-liquide	60
3.3 LES EPURATEURS A GAZ D'ECHAPPEMENT.....	63
3.3.1 Les épurateurs humides.....	63
3.3.2 Les épurateurs secs	68
3.3.3 Comparaison entre les différentes technologies des épurateurs	70
3.3.4 Installation d'un système hybride sur un navire	71
CHAPITRE 4 <u>Equation Chapter 4 Section 1</u> Étude de cas technologie alfa laval.....	75
4.1 PARAMETRES ET DONNEES	75
4.1.1 Le trajet	75
4.1.2 Épurateur hybride Alfa Laval	76
4.1.3 Caractéristique du fioul.....	79
4.1.4 Moteur diesel Wärtsilä 8L26.....	79
4.2 CALCULS DE LA CONSOMMATION DU FIOUL	80
4.3 CALCULS DES EMISSIONS DE SO ₂	80
4.4 CALCULS DES EMISSIONS DE CO ₂	82

4.5	DISCUSSION ET INTERPRETATION	84
4.6	LA TECHNOLOGIE SCR POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE NO _x	86
4.6.1	Système Selective Catalytic Reduction SCR	86
4.7	UTILISATION COMBINÉE D'UN DISPOSITIF D'ÉPURATION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT ET D'UN DISPOSITIF SCR.....	90
4.7.1	Application	91
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	93
	ANNEXES.....	97
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Croissance économique mondiale (du produit intérieur brut (PIB)), 2016-2018	1
Tableau 2. L'intensité des émissions de GES en 2010	7
Tableau 3. Inventaire des émissions pour le port de Montréal pour 2007 [7].....	9
Tableau 4. Limite de soufre dans le carburant selon l'annexe 6 de MARPOL[5].....	18
Tableau 5. Avantages et limites entre les carburants alternatifs pour les applications marines [22] [27] [29].....	28
Tableau 6. Avantages et limites des solutions de traitement interne	31
Tableau 7. Avantages et limites des solutions de post-traitement.....	37
Tableau 8. Avantages et limites des moyens de propulsion éoliens.	53
Tableau 9. Avantages et limites de système hybride.	54
Tableau 10. Avantages et limites des solutions électriques.	54
Tableau 11. Avantages et limites des technologies de l'architecture navale.	55
Tableau 12. Avantages et limites de la réduction de la vitesse de croisière.....	56
Tableau 13. Comparaison entre les différentes catégories des scrubbers [74].....	70
Tableau 14. Coût en (USD) des technologies de réduction utilisant un laveur d'eau de mer [22].	72
Tableau 15. Coût annuel en USD avec un combustible à haute teneur en soufre et un épurateur de SO _x [75].....	73
Tableau 16. Coût annuel en USD en utilisant un carburant à faible teneur en soufre sans épuration [75].....	74
Tableau 17. Les efficacités des épurateurs selon les différentes valeurs de teneur en soufre du combustible[75].	77
Tableau 18. Évaluation et comparaison de la réduction du CO ₂ à l'aide de la solution MEA[73].....	78
Tableau 19. Caractéristique des différents types du fioul.	79
Tableau 20. Les caractéristiques du moteur 8L26[77].....	79

Tableau 21. Évaluation de la consommation de carburant.	80
Tableau 22. Les émissions de SO ₂ avant l'intervention du scrubber.	81
Tableau 23. Les émissions de SO ₂ en intégrant le scrubber.	82
Tableau 24. Facteurs d'émission des carburants - transport maritime de marchandises [78].	82
Tableau 25. Évaluation des émissions de CO ₂ avant l'intégration du scrubber.	83
Tableau 26. Les émissions de CO ₂ après lavage	83
Tableau 27. Estimations des coûts matériels de la SRC (US\$/kW) [15].	90
Tableau 28. Coûts horaires associés à l'urée pour les types classiques de moteurs (US\$) [15].	90

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Trafic maritime international, diverses années [1].	2
Figure 2. Réseau portuaire commercial stratégique du Québec [2].	4
Figure 3. Comparaison de l'efficacité énergétique – Flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010) [3].	5
Figure 4. Émissions de GES par secteur d'activité au Québec[4].	6
Figure 5. Répartition des émissions de GES au Québec en 2017 selon le type de gaz et les secteurs d'activité [4].	6
Figure 6. Les émissions de CO ₂ du transport maritime en 2015 [6].	9
Figure 7. Émissions annuelles de CO ₂ éq.[7].	10
Figure 8. Émissions annuelles de NO _x [7].	11
Figure 9. Émissions annuelles de SO _x .	12
Figure 10. Conséquences des pluies acides[9].	13
Figure 11. Les zones les plus exposées aux pollutions sur la carte [8].	14
Figure 12. Les limites de Nox [15].	17
Figure 13. Évolution des limites de teneur en soufre dans les carburants marins [16].	18
Figure 14. Zones avec des limites d'émission de soufre inférieures (ECA) [17].	19
Figure 15. Méthodes de réduction des émissions de SO _x et de NO _x des moteurs diesel marins [22].	22
Figure 16. Émissions relatives de gaz pour le GNL et le HFO [21].	24
Figure 17. NM F.-A.-Gauthier (Premier traversier à être propulsé au GNL en Amérique du Nord) [23].	24
Figure 18. Amélioration du procédé de production de l'ammoniac par utilisation de sources d'énergies renouvelables [28].	27
Figure 19. Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [15].	29
Figure 20. Système EGR [15].	31
Figure 21. Schéma d'un système d'épuration humide en boucle ouverte [31].	33

Figure 22. Schéma d'un système d'épuration humide en boucle fermée[31].	34
Figure 23. Système « Selective Catalytic Reduction » [15].	35
Figure 24. Réaction chimique dans le catalyseur SCR[15].	36
Figure 25. Cargo transocéanique Wind challenger [36].	39
Figure 26. Oceanbird/Wallenius Marine [36].	39
Figure 27. Rotor Sail de Norsepower [37].	40
Figure 28. Le concept de Michelin repose sur des voiles gonflables [39].	41
Figure 29. Navire MV Ankle.	42
Figure 30. L'unité eConowind Ventifoils[34].	42
Figure 31. Aquarius Eco Ship par Eco Marine Power - Navire à voile assistée [42].	42
Figure 32. Technologie EnergySail [43].	43
Figure 33. Principe du PEAK SHAVING [46].	44
Figure 34. L'objectif du PEAK SHAVING [45].	45
Figure 35. L'installation des batteries à bord [48].	45
Figure 36. Illustration du nouvel alternateur de Genset-Synchro (Stator et Rotor rotatifs) couplé à un moteur diesel [48].	46
Figure 37. Moteur électrique (compensateur) [48].	47
Figure 38. Système nageoire de baleine [52].	48
Figure 39. La technologie à bulles [54].	49
Figure 40. Le dispositif HI-FIN [55].	50
Figure 41. Arc bulbeux avant et après modification [54].	51
Figure 42. Les différents types de contacteurs gaz-liquide [71].	61
Figure 43. La hiérarchie des systèmes d'épuration marine[73].	63
Figure 44. Système d'épuration humide en boucle ouverte[74].	64
Figure 45. Système d'épuration humide en boucle fermé[74].	65
Figure 46. Système de nettoyage des eaux de lavage [75].	67

Figure 47. Système d'épuration hybride[74].	68
Figure 48. Système d'épuration sec [74].	69
Figure 49. Schéma d'un système de lavage hybride [75].	71
Figure 50. Route maritime entre la Tunisie et la Turquie sur la carte.....	76
Figure 51. Calculateur utilisé	76
Figure 52. Scrubber alfa Laval[75].	77
Figure 53. Influence de la solution de monoéthanolamine sur les niveaux de CO ₂ [73].	78
Figure 54. Comparaison des émissions de SO _x avant et après l'intégration du laveur.....	84
Figure 55. Comparaison des émissions de CO ₂ avant et après l'intégration du laveur avec la solution MEA.	85
Figure 56. LP-SCR [79].	87
Figure 57. HP-SCR [79].	87
Figure 58. Dispositif SCR marin[74].	89
Figure 59. Modèle simple des principaux composants du système SCR et épurateur d'eau à l'intérieur de la salle des machines [80].	91
Figure 60. Comparaison entre différentes technologies [80].	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

SO_x	Oxydes de soufre
NO_x	Oxyde d'azote
CO₂	Dioxyde de carbone
GES	Gaz à effet de serre
OMI	Organisation maritime internationale
ECA	Emission Restriction Area
GNL	Gaz naturel liquéfié
HFO	Heavy Fuel Oil
MDO	Marine Diesel Oil
SCR	Selective Catalytic Reduction
DWI	Direct Water Injection
EGR	Exhaust gas recirculation
EGCS	Exhaust gas cleaning systems
NaOH	Hydroxyde de sodium
COV	Composés organiques volatils
MEA	Monoéthanolamine
EVP	Equivalent vingt pieds

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU TRANSPORT MARITIME

1.1 IMPORTANCE DU TRANSPORT MARITIME

1.1.1 Transport maritime mondiale

Le fret maritime fait référence au mode de transport impliqué dans le mouvement des marchandises ou des gens par voie maritime. Il est considéré comme le principal mode de transport à longue distance de la plupart des matières premières (pétrole brut, gaz, charbon, minerais, blé, soja, fer, cuivre...). Le transport maritime est un pilier du commerce international et l'un des principaux moteurs de la mondialisation. En outre, l'utilisation de voies d'eau pour transporter des marchandises et des personnes sera toujours un moyen qui évoluera au cours du temps. Cette évolution a eu lieu grâce au développement du commerce mondial et à l'augmentation des échanges de marchandises entre les pays.

Selon le rapport de la CNUCED 2018, plus de 80% des échanges commerciaux se font par voie maritime. Ce dernier est considéré comme la méthode la moins consommatrice d'énergie, ainsi il contribue d'une façon massive à la dynamique économique et au développement industriel des nations. C'est pour cela que l'on constate que le rôle du transport maritime est indispensable au bon fonctionnement de marché international.

Tableau 1. Croissance économique mondiale (du produit intérieur brut (PIB)), 2016-2018

Région ou pays	2016	2017	2018
Monde	2.5	3.1	3.0
Pays développés	1.7	2.3	2.1
Pays en développement	3.9	4.5	4.6
Pays à économie en transition	0.3	2.1	2.2
Pays les moins avancés	3.5	4.3	4.9

Source : Calculs du secrétariat de la CNUCED, United Nations, 2018 et UNCTAD, 2018a.

La croissance du produit intérieur brut PIB en 2017 était de 3,1%, supérieure aux 2,5% de 2016 (tableau 1). L'économie mondiale montre une tendance à une reprise substantielle, et en même temps, elle a un effet d'entraînement positif sur le trafic maritime [1].

1.1.2 La progression du commerce maritime mondial

Le trafic maritime international est en plein essor, avec une augmentation de 4% du volume des transports en 2017, la plus forte des cinq dernières années. Compte tenu de la reprise économique et de l'amélioration du commerce de marchandises au niveau mondial, la CNUCED estime qu'en 2017 ces volumes se sont élevés à 10,7 milliards de tonnes [1].

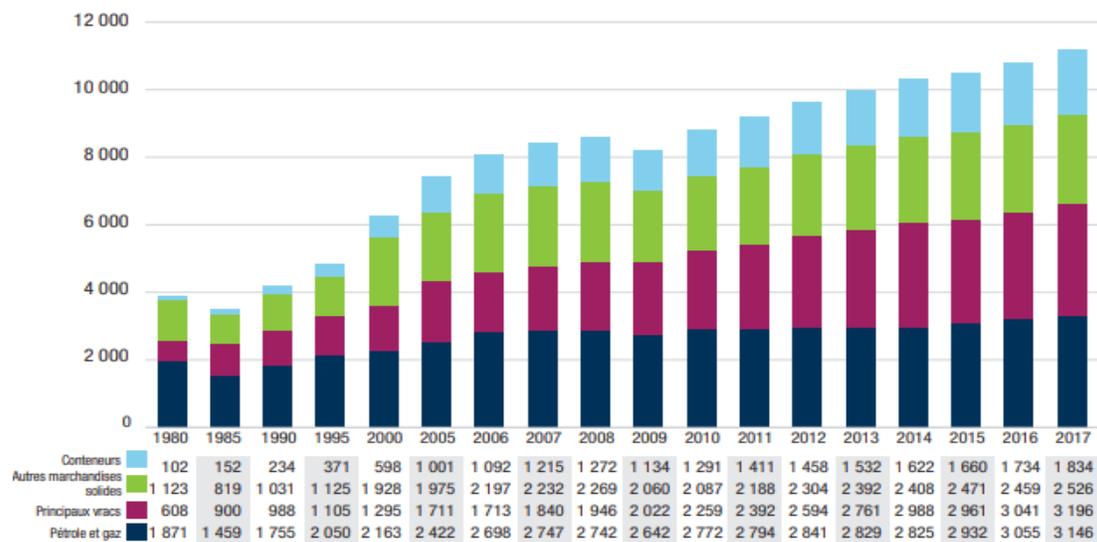


Figure 1. Trafic maritime international, diverses années [1].

1.1.3 Le transport maritime au Québec

Le système de transport maritime et portuaire du Québec est représenté par un ensemble d'établissements et d'organismes qui sont étroitement impliqués dans la chaîne de réception, d'expédition et de distribution des produits industriels et de déplacement des passagers. L'importance de ce système est habituellement mesurée en fonction du trafic maritime, des tonnages entrants et sortants ou du nombre de passagers transportés sur le Saint-Laurent et ses affluents et plus rarement, en fonction de sa contribution à l'économie d'une région [2].

Le transport maritime québécois est un maillon important d'une chaîne de transport diversifiée. Il fait partie d'une série d'activités économiques, y compris l'importation, l'exportation et le mouvement interne de marchandises entre l'expéditeur et le destinataire final. En plus du transport de marchandises, le transport maritime comprend une composante de transport de passagers avec d'importantes activités de tourisme fluvial, notamment des croisières internationales, des croisières d'excursion, des activités nautiques, des services de traversier et des services aux communautés éloignées. Les activités du secteur maritime ont grandement contribué au développement économique du Québec. Le chiffre d'affaires total des entreprises québécoises des secteurs maritime et portuaire, incluant le tourisme fluvial, s'élève à plus de 3,1 milliards de dollars. Ces entreprises créent plus de 18 000 emplois directs ou indirects pour une masse salariale annuelle de 1 milliard de dollars. Le gouvernement du Québec et le gouvernement du Canada tirent de ces activités des recettes fiscales et parafiscales annuelles qui s'élèvent respectivement à 204,6 millions de dollars et à 140,7 millions de dollars [2].

1.1.3.1 Profil du transport maritime au Québec

Le système de navigation du Québec se propage sur le long du fleuve Saint-Laurent et de ses baies, y compris la rivière Saguenay et la partie de la Voie maritime du Saint-Laurent entre les écluses de Saint-Lambert et la frontière ontarienne. Le système portuaire du Saint-Laurent joue un rôle important dans le commerce international du Canada en donnant accès aux marchés étrangers et à la région des Grands Lacs qui constitue le cœur industriel de l'Amérique du Nord. La vingtaine de ports qui composent ce système exercent des responsabilités différentes, certains sont des administrations portuaires canadiennes, d'autres font partie de Transports Canada, au gouvernement du Québec ou sont des ports privés ou municipaux (figure 2). Les cinq administrations portuaires canadiennes au Québec, soit Montréal, Québec, Saguenay, Sept-Îles et Trois-Rivières, sont des organisations fédérales autonomes qui exploitent des infrastructures portuaires [2].

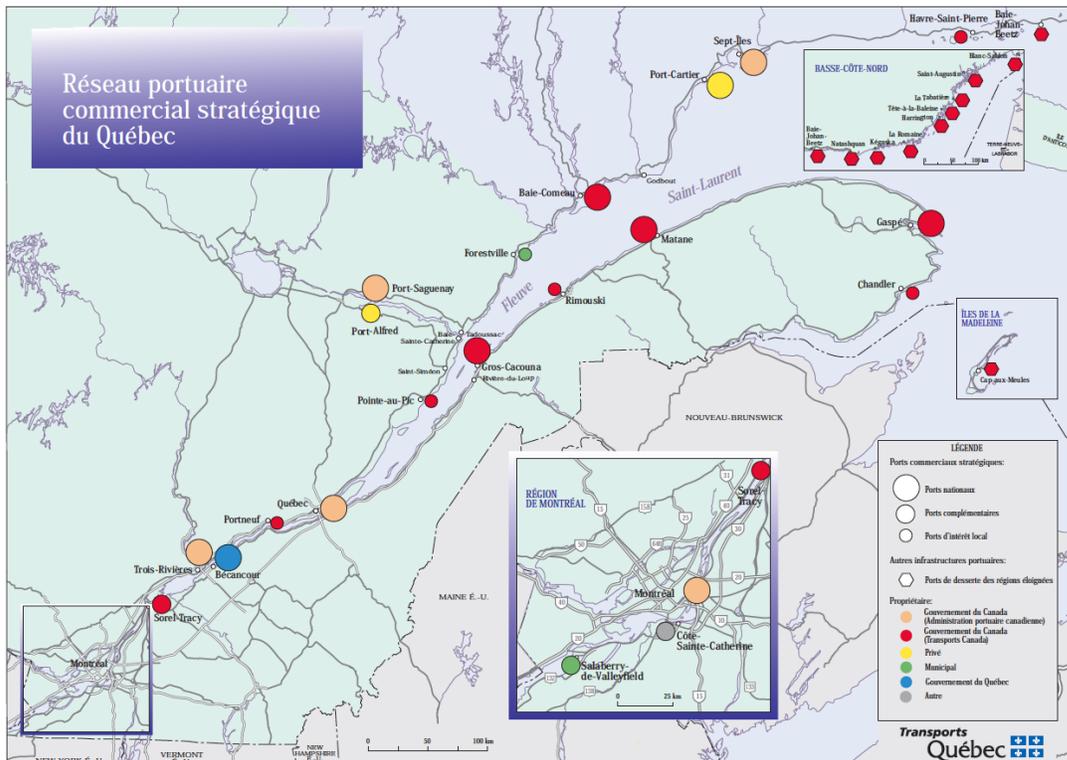


Figure 2. Réseau portuaire commercial stratégique du Québec [2].

1.1.3.2 Efficacité énergétique dans le secteur maritime au Québec

Selon l'analyse comparative de la consommation de carburant et des moteurs utilisés en 2010 par chacun des modes, les navires sont capables de transporter des tonnes de marchandises avec une consommation de carburant moindre que les chemins de fer ou les camions. L'analyse de l'efficacité énergétique de chaque groupe de navires présente les résultats liés aux modes ferroviaire et routier [3]:

- Les flottes des navires aux dimensions de la voie maritime peuvent être 24% plus économes que les trains (ou 24 % plus loin que les trains) et 531 % plus économes que les camions.
- Les flottes américaines peuvent être 11 % plus économes que les trains et 592% plus économes que les camions.

- Les flottes combinées du réseau Grands Lacs-Voie maritime peuvent être 14 % plus économes que les trains et 594 % plus économes que les camions.



Figure 3. Comparaison de l'efficacité énergétique – Flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010) [3].

1.2 LES ÉMISSIONS POLLUANTES DES NAVIRES

1.2.1 Les émissions de gaz à effet de serre, comparaison selon les trois modes du transport

Comme le montrent les figures 4 et 5, les secteurs des transports et de l'industrie sont les plus importantes sources d'émissions de gaz à effet de serre au Québec, représentant près de 75 % des émissions totales en 2017. Les secteurs résidentiel, commercial et institutionnel ainsi que l'agriculture ont contribué à 10,3 % et 9,8 % des émissions du Québec en 2017.

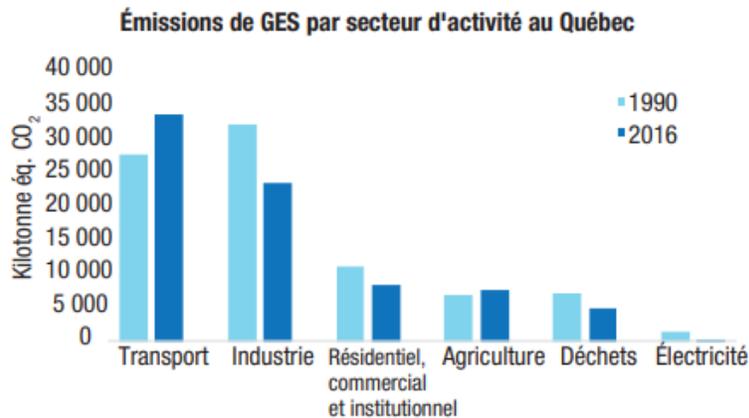


Figure 4. Émissions de GES par secteur d'activité au Québec[4].

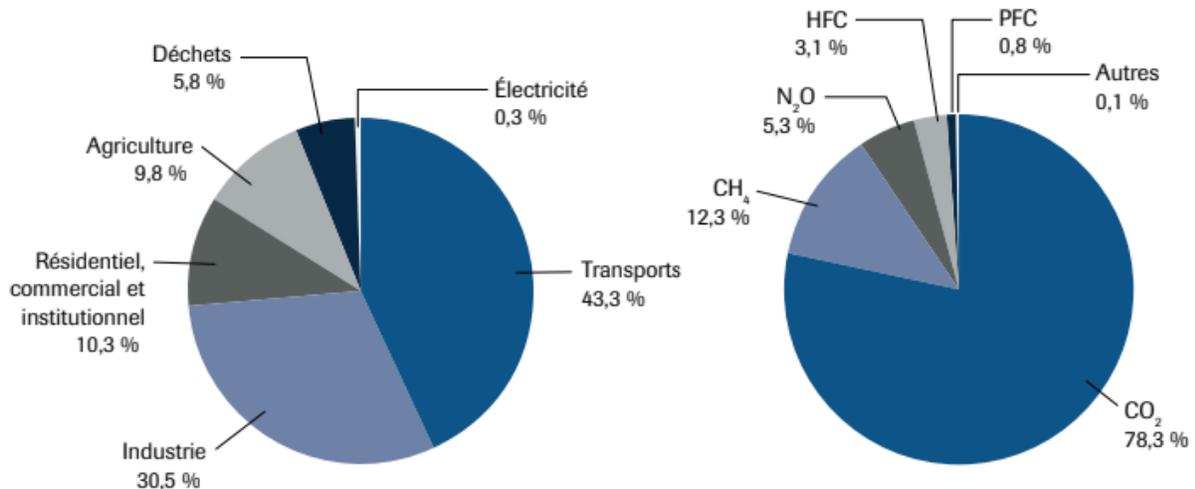


Figure 5. Répartition des émissions de GES au Québec en 2017 selon le type de gaz et les secteurs d'activité [4].

L'analyse de RTG (Research and Traffic Group) des émissions de gaz à effet de serre montre que les émissions de GES par tonne métrique-km (ou millier de tonnes courtes de marchandises par mille) qui se produisent par les voies maritimes sont inférieures à celles par voies ferrées ou par voies routières.

- Pour 1 tonne métrique de marchandises sur 1 km transporté par la flotte des navires, les modes ferroviaire et routier émettent respectivement 22 % et 450% de GES de plus que le mode maritime.

- Pour 1 tonne courte de marchandises sur 1 mille transporté par la flotte américaine, les modes ferroviaire et routier émettent respectivement 15 % et 534 % de GES de plus que le mode maritime.
- Pour 1 tonne métrique de marchandises sur 1 km transporté par la flotte combinée du réseau Grands Lacs, les modes ferroviaire et routier émettent respectivement 19 % et 533 % de GES de plus que le mode maritime.

Le tableau 2 fournit des données plus détaillées et comprend une colonne indiquant l'intensité relative par rapport au mode maritime. La colonne d'indice indique la quantité d'émissions produites par chaque mode en comparaison du mode maritime. Par exemple, en 2010, pour chaque tonne métrique d'émissions de gaz à effet de serre produite par une flotte de type Voie maritime qui a transporté une tonne métrique de marchandises de la Voie maritime sur 1 kilomètre, le modèle ferroviaire générerait 1,22 tonne métrique d'émissions de gaz à effet de serre, et les camions généreraient 5,5 tonnes d'émissions de gaz à effet de serre [3].

Tableau 2. L'intensité des émissions de GES en 2010

Intensité des émissions de GES par rapport à la flotte des navires aux dimensions de la Voie maritime en 2010			
Transport	g/TMK	lb/kTMM	Indice
Maritime	11.5	37.0	1.0
Ferroviaire	14.1	45.1	1.22
Routier	63.4	203.5	5.50
Intensité des émissions de GES par rapport à la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime en 2010			
Transport	g/TMK	lb/kTMM	Indice
Maritime	11.9	38.3	1.0
Ferroviaire	14.2	45.5	1.19
Routier	75.5	242.4	6.33

g/TMK = grammes émis par tonne métrique de marchandises par kilomètre.

lb/kTMM = livres émises par millier de tonnes courtes de marchandises par mille.

Source: Research and Traffic Group.

Au cours des dernières décennies, l'industrie du transport maritime et le trafic maritime se sont développés rapidement d'un point de vue économique, cette tendance qui se poursuit à ce jour a un impact très positif sur le développement économique, mais d'un autre côté, elle a également un impact très négatif sur l'environnement en termes de pollution de l'air. Les émissions polluantes des gaz d'échappement des moteurs Diesel marins sont les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), dioxyde de carbone (CO₂) et les particules (PM). La quantité des gaz d'échappement émis par les moteurs marins dans l'atmosphère est directement liée à la consommation totale de carburant [5].

Les émissions de dioxyde de soufre (SO_x), les particules (PM) et des gaz à effet de serre (GES) à partir de la navigation mondiale ont augmenté de 585 à 1096 millions de tonnes entre 1990 et 2007. Les émissions totales de CO₂ du transport maritime sont passées de 910 millions de tonnes à 932 millions de tonnes (+2,4%) de 2013 à 2015. En 2015, les transports maritimes globaux ont représenté environ 2,6% des émissions mondiales de CO₂, la majorité (87%) des émissions de CO₂ des transports maritimes étant imputables aux activités de transport maritime international. Le transport maritime intérieur a représenté environ 9% des émissions totales de CO₂ du transport maritime et la pêche, environ 4%.

En 2013, les émissions totales des gaz à effet de serre (GES) au Québec se chiffraient à 81,2 mégatonnes de CO₂. Cela représentait 10 tonnes par habitant et 11,2 % des émissions canadiennes [6].

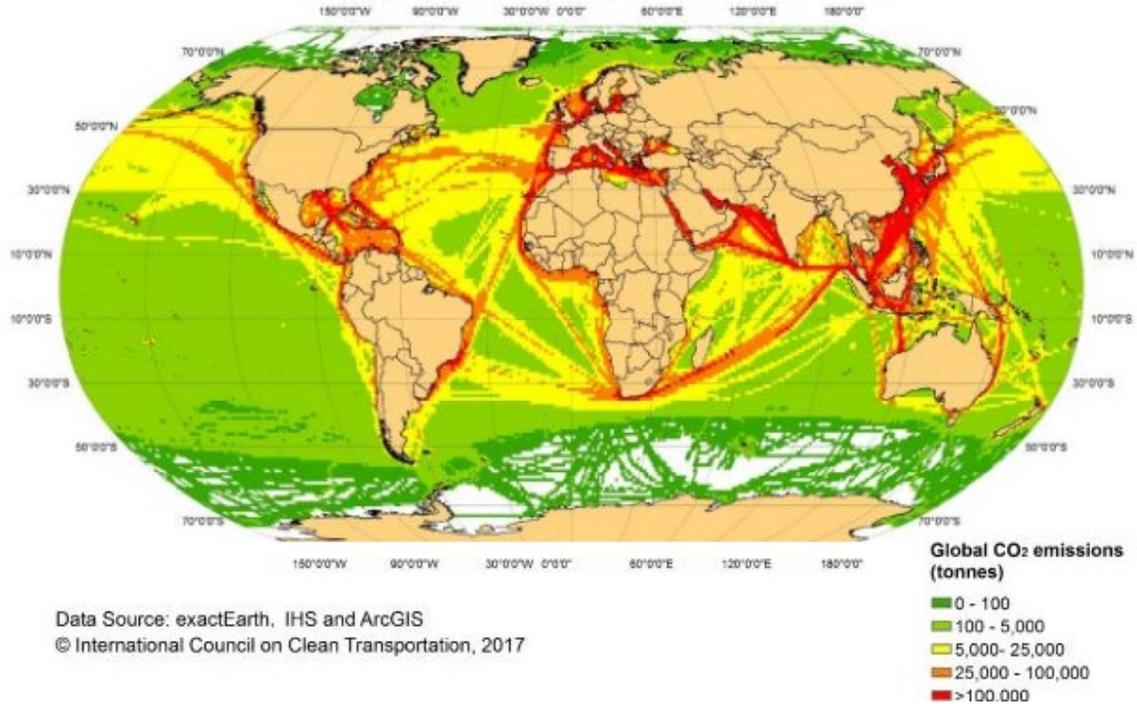


Figure 6. Les émissions de CO₂ du transport maritime en 2015 [6].

1.2.2 Les émissions côtières et dans les ports (exemple port de Montréal)

Tableau 3. Inventaire des émissions pour le port de Montréal pour 2007 [7].

Émissions annuelles de contaminants atmosphériques (tonnes) et consommation de carburant (kilolitres)						
Source	NO _x	SO _x	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Carburant
Maritimes navires	943.2	912.3	72875	6.5	1.9	24831.7
Équipement manutention du fret	201	2.8	19475.1	1.1	2.1	7071.2
Locomotive	104.6	0.9	4145.4	0.2	1.7	1518.6
Camionnage	28.2	0	3123.6	0.2	0.3	1190.1
Total	1277	916.1	99619.1	7.9	6	34611.6

Le tableau 3 montre que pour la plupart des polluants atmosphériques évalués dans le port de Montréal en 2007, les navires contribuent le plus aux émissions portuaires totales.

1.2.2.1 Les principaux contaminants atmosphériques

a) ÉQUIVALANT DE DIOXYDE DE CARBONE (CO₂ EQ.)

Chaque gaz à effet de serre (GES) a un potentiel de réchauffement global (PRP) différent et persiste pendant une durée différente dans l'atmosphère. Les estimations des émissions de CO₂-eq offrent un moyen pratique de représenter le potentiel de réchauffement global (PRP) total des constituants des gaz à effet de serre émis lors de la combustion de carburant. Les trois principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

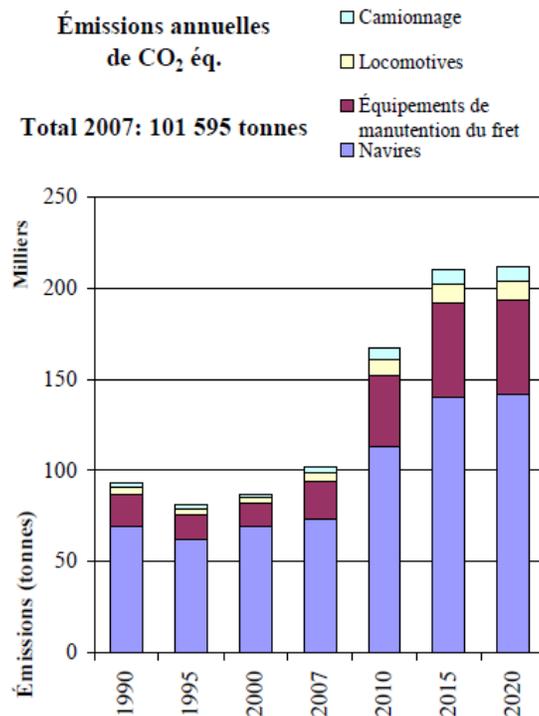


Figure 7. Émissions annuelles de CO₂ eq.[7].

Les émissions de CO₂-eq sont principalement composées de CO₂. Bien que le potentiel de réchauffement global de ce gaz soit faible, les émissions de CO₂-eq en 2007 sont plus élevées qu'en 1990 (figure 4).

Les navires contribuent le plus aux émissions totales de CO₂ des ports simplement parce que ces sources consomment plus de carburant dans les limites géographiques de l'inventaire des émissions.

b) OXYDE D'AZOTE NO_x

Les émissions de NO_x sont majoritairement composées d'oxyde nitrique NO et de dioxyde d'azote NO₂.

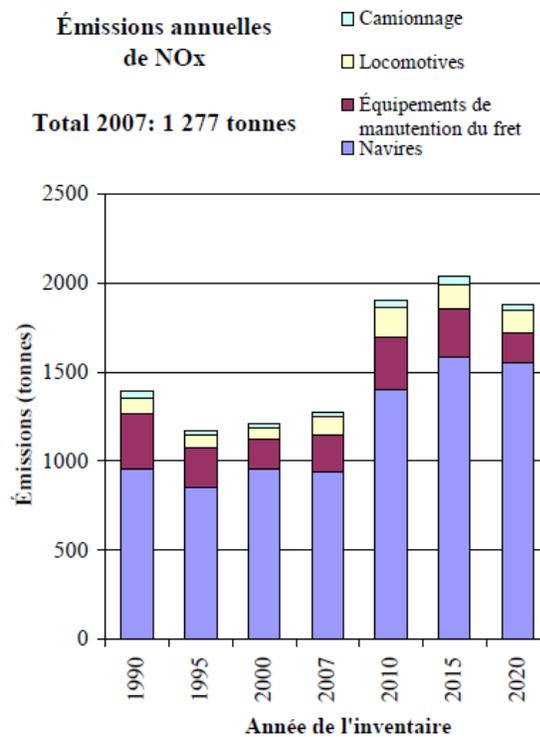


Figure 8. Émissions annuelles de NO_x[7].

Les navires sont la principale source d'émissions d'oxydes d'azote dans les ports (figure 8). En particulier, les moteurs auxiliaires utilisés comme sources d'électricité et de chauffage pendant les activités de chargement, de déchargement et les opérations générales provoquent des émissions importantes lorsque les navires sont à quai.

c) OXYDE DE SOUFRE SO_x

Les émissions de SO_x sont produites par la combustion de combustibles fossiles composés de soufre. Les navires utilisent généralement des carburants à haute teneur en soufre et sont la principale source d'émissions de SO_x des ports [7].

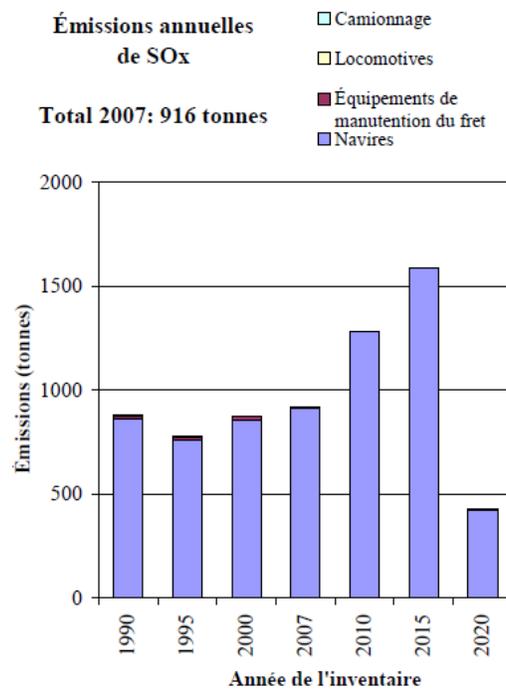


Figure 9. Émissions annuelles de SO_x .

1.2.3 Les effets des émissions de polluants atmosphériques du transport maritime au Canada

Le CO_2 a un impact direct sur le réchauffement climatique, entraînant l'acidification des océans. Dans les eaux côtières du Canada, l'acidification peut endommager les coquilles des praires et des moules, ce qui nuit à la productivité d'une industrie aquacole de 5,2 milliards de dollars et affaiblit les structures coralliennes.

L'oxyde d'azote NOx est également nuisible à l'environnement biologique marin et aux organismes aquatiques, car il contribue à l'excès de nutriments dans les eaux côtières et intérieures, ce qui entraîne une prolifération d'algues toxiques et une réduction de la teneur en oxygène de l'eau [8].

L'étendue des dommages causés par les oxydes d'azote SOx est importante, ces polluants peuvent parcourir des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, les provinces du bouclier précambrien – l'Ontario, le Québec, le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse sont les plus vulnérables. Enfin, le dégazage des navires a un impact évident sur les politiques de santé publique et d'environnement [8].



Figure 10. Conséquences des pluies acides [9].

Selon le ministère de l'Environnement du Canada, l'exposition humaine à des niveaux élevés de dioxyde de soufre peut entraîner des maladies des voies respiratoires et des maladies pulmonaires et cardiovasculaires. De nombreuses études ont également confirmé que même à de faibles niveaux, la pollution peut avoir des effets nocifs sur la santé humaine. Selon l'Organisation mondiale de la santé, 3 millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5% des 55 millions de décès annuels dans le monde. Toutefois, étant donné l'incertitude des estimations, le nombre réel des décès annuels pourrait se situer entre 1,4 et 6 millions [10].

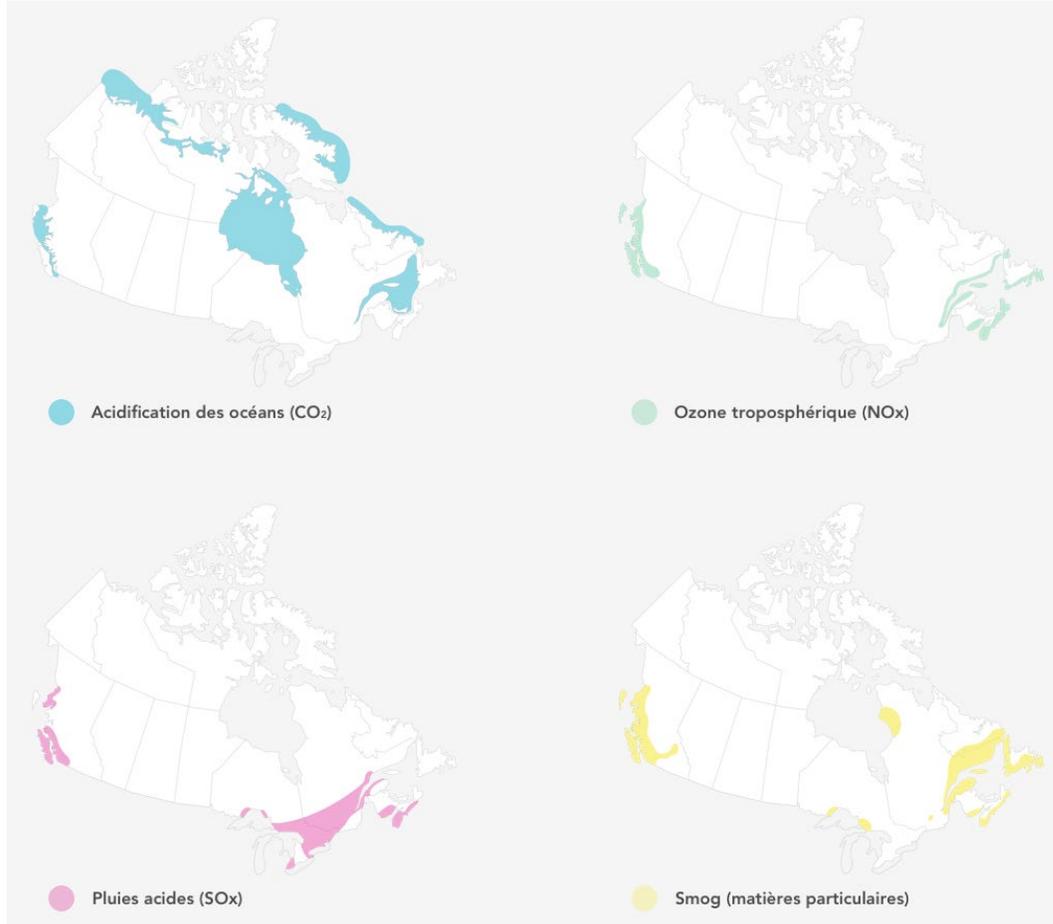


Figure 11. Les zones les plus exposées aux pollutions sur la carte [8].

1.2.4 Prévention de la pollution causée par les navires : protocole de Marpol

Ces données ont encouragé les instances internationales à se pencher sur ce problème et à formuler des réglementations pour minimiser cette pollution. L'Organisation maritime internationale (OMI), une agence des Nations unies basée à Londres et responsable de la sécurité de la vie en mer et de la protection de l'environnement marin, a décidé de contrôler ces substances rejetées dans l'atmosphère en adhérant à l'annexe VI de la convention MARPOL.

1.2.4.1 Convention MARPOL

La Convention MARPOL a été adoptée le 2 novembre 1973 par l'Organisation maritime internationale (OMI). Le Protocole de 1978 a été adopté en réaction à la multiplication des accidents de pétroliers survenus en 1976-1977. Comme la Convention MARPOL de 1973 n'était pas encore en vigueur, le Protocole MARPOL de 1978 a absorbé la Convention parente. L'outil combiné est entré en vigueur le 19 mai 2005. Les annexes de MARPOL sont mises à jour régulièrement au moyen d'amendements répondant à des questions techniques et à des problèmes émergents portant sur la pollution et les changements climatiques. La convention comprend des dispositions visant à prévenir et à minimiser la pollution provenant des navires, la pollution accidentelle et la pollution provenant des opérations quotidiennes, et comprend actuellement six annexes techniques [11].

- **L'annexe I**, Règles relatives à la prévention de la pollution par les hydrocarbures (entrées en vigueur le 2 octobre 1983).
- **L'annexe II**, Règles relatives à la prévention de la pollution par les substances liquides nocives transportées en vrac (entrées en vigueur le 2 octobre 1983).
- **L'annexe III**, Règles relatives à la prévention de la pollution par les substances nuisibles transportées par mer en colis (entrées en vigueur le 1^{er} juillet 1992).
- **L'annexe IV**, Règles relatives à la prévention de la pollution par les eaux usées des navires (entrées en vigueur le 27 septembre 2003).
- **L'annexe V**, Règles relatives à la prévention de la pollution par les ordures des navires (entrées en vigueur le 31 décembre 1988).
- **L'annexe VI**, Règles relatives à la prévention de la pollution de l'air par les navires (entrées en vigueur le 19 mai 2005) [12].

L'annexe VI de MARPOL est la principale convention traitant des exigences relatives à la prévention de la pollution de l'air par les navires. Il a été mis en œuvre aux États-Unis par le biais de la Loi sur la prévention de la pollution par les navires. Il comprend des exigences pour la fabrication, la certification et l'exploitation des navires et des moteurs, ainsi que la qualité du carburant utilisé par les navires dans les eaux américaines.

L'annexe VI a été ajoutée à la convention MARPOL en 1997 et est entrée en vigueur le 19 mai 2005. En octobre 2008 l'annexe VI a été révisée et leur entrée en vigueur a eu lieu le 1er juillet 2010. En effet, l'expansion du commerce maritime mondial est un véritable défi en termes de limitation des émissions, notamment de NO_x et de SO_x qui affectent la population des villes portuaires et des communautés côtières et affectent l'environnement à travers les pluies acides. L'annexe VI révisée de la MARPOL consiste en une réduction progressive globale des émissions de SO_x (oxydes de soufre) et de NO_x (oxydes d'azote), elle interdit également le rejet délibéré de substances appauvrissant la couche d'ozone et réglemente l'incinération à bord ainsi que l'émission des composés organiques volatils par les navires-citernes. Mais elle introduit aussi des zones de contrôle des émissions (ECA : Émission Control Area) pour réduire l'émission des polluants atmosphériques SO_x/NO_x et les particules dans ces zones maritimes désignées [13].

1.2.4.2 Contrôle des émissions

a) CONTROLE DES EMISSIONS DES OXYDES D'AZOTE NO_x

Les moteurs diesel marins installés sur un navire construit après le 1er janvier 2000 doivent répondre aux exigences de limites d'émission de NO_x du niveau 1. Pour les moteurs diesel installés sur un navire construit après le 1er janvier 2011, ils doivent satisfaire aux exigences du niveau 2. Enfin, pour un navire construit après le 1er janvier 2016, les moteurs diesel marins installés à son bord devront répondre aux normes du niveau 3 lorsqu'opérant en zone de contrôle des émissions [14].

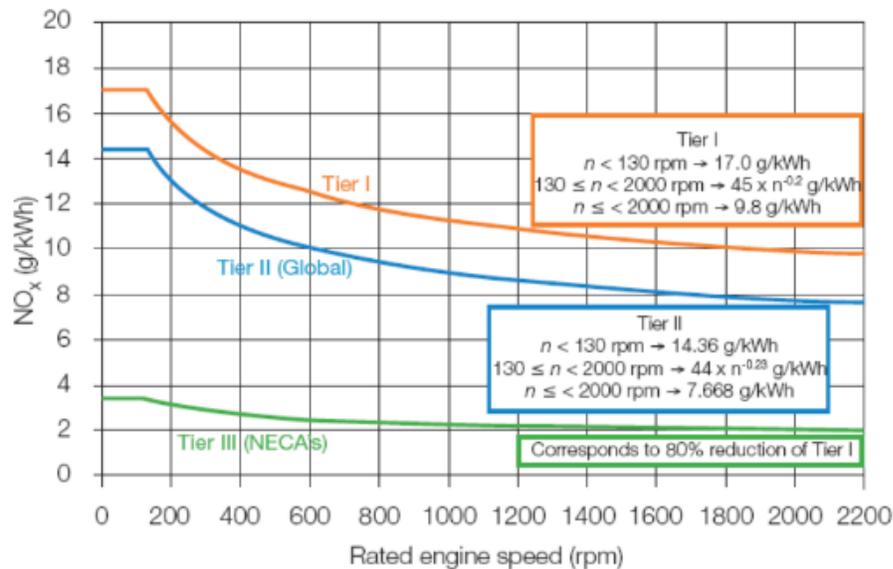


Figure 12. Les limites de NO_x [15].

- **Niveau 1** : Les navires construits entre 2000 et 2011 doivent être conformes aux émissions de NO_x à une vitesse maximale du moteur d'environ 9,8 - 17 g/kWh.
- **Niveau 2** : Ceux construits après 2011 doivent être conformes à 7,7 - 14,4 g/kWh.
- **Niveau 3** : Les navires opérant après 2016 dans les zones de contrôle des émissions de NO_x (ECA) doivent être conformes aux émissions de 2,0 - 3,4 g/kWh.

b) CONTROLE DES EMISSIONS DES OXYDES DE SOUFRE SO_x

L'annexe VI de la convention MARPOL a fixé une limite maximale globale de la teneur en soufre des combustibles, actuellement de 3.5 % en poids (à partir du 1^{er} janvier 2012), pour tout combustible utilisé à bord d'un navire. Il contient également des dispositions sur l'établissement de zones spéciales (ECA) avec des contrôles des émissions de soufre plus stricts. Dans l'ECA, la teneur en soufre du fioul utilisé sur les navires ne doit pas dépasser 1% (en poids) à l'heure actuelle [5].

Les limites actuelles de la teneur en soufre du fioul sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4. Limite de soufre dans le carburant selon l'annexe 6 de MARPOL[5].

Teneur en soufre dans les carburants	Zone	Date de mise en œuvre
Max. 1% de soufre dans le carburant	ECA	1 er juillet 2010
Max. 3,5% de soufre dans le carburant	En dehors de l'ECA	1 er janvier 2012
Max. 0,1% de soufre dans le carburant	ECA	1 er janvier 2015
Max. 0,5% de soufre dans le carburant	En dehors de l'ECA	1 er janvier 2020

Le dernier règlement de Marpol, appelée Soufre 2020, est entré en vigueur le 1er janvier 2020 et vise à limiter la teneur en oxyde de soufre (SOx) admissible du carburant utilisé par les navires marchands à l'échelle nationale à 0,5% dans le monde. Auparavant, cette limite était fixée à 3,5 %. Les navires opérant dans la zone de contrôle des émissions (ECA) ne sont pas soumis à cette règle et doivent continuer à respecter la limite plus stricte de 0,1% de soufre.

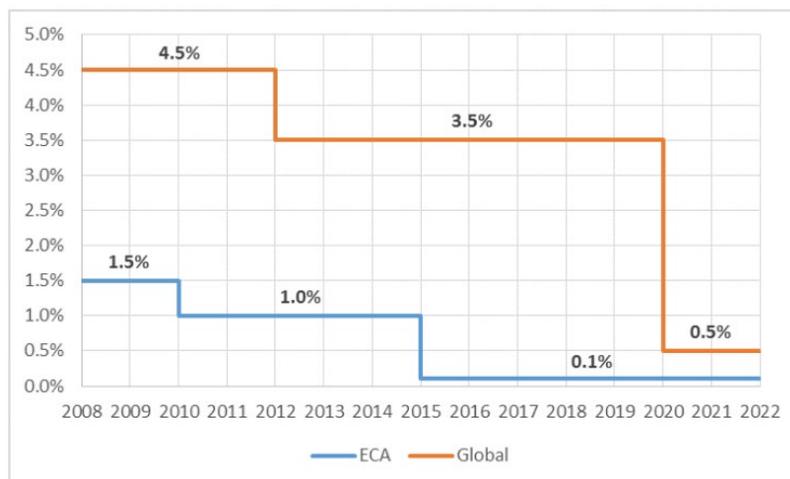


Figure 13. Évolution des limites de teneur en soufre dans les carburants marins [16].

Les ECA (Zones avec des limites d'émission ou Emission Restriction Area) couvrent les côtes les plus fréquentées des pays développés. Presque toutes les côtes nord-américaines à 200 milles de la côte, ainsi que la mer du Nord et la mer Baltique figure 10. Depuis 2015, la zone de contrôle des émissions a limité la teneur en soufre du carburant à 0,1 %.



Figure 14. Zones avec des limites d'émission de soufre inférieures (ECA) [17].

1.2.4.3 Surveillance des règles de l'OMI

Les pays membres de l'OMI, comme le Canada, sont chargés d'intégrer les règles internationales dans le droit national et de les faire appliquer sur les navires.

Transports Canada, en tant qu'organisme de réglementation, utilise plusieurs mécanismes pour surveiller tous les navires présents dans les eaux canadiennes, notamment :

- L'obligation pour les navires de communiquer avec Transports Canada 96 heures avant d'entrer dans les eaux canadiennes, afin de fournir des détails sur le navire, son chargement et son équipage.
- Un programme d'inspection rigoureux pour garantir la conformité avec la zone de contrôle des émissions de l'Amérique du Nord, y compris la mesure de la teneur en soufre dans les réservoirs du navire à l'aide d'analyseurs de carburant portables.

- Des inspections de contrôle des navires par l'État du port effectués de façon régulière et aléatoire par des inspecteurs chevronnés en matière de sûreté et de sécurité maritime, afin d'évaluer l'état du navire, ses activités et le respect des exigences en matière de contrôle de la pollution [17].

1.2.4.4 Non-respect de l'Annexe VI

Les navires non conformes peuvent être arrêtés par les inspecteurs du contrôle de l'État du port (Port State Control). Des sanctions, et éventuellement des amendes, peuvent également être imposées en fonction de la loi locale ou la loi de l'état du pavillon. Les amendes possibles sanctionnant un non-respect de l'Annexe VI ne tomberont pas dans le domaine de la couverture, car elles concernent des émissions opérationnelles par opposition à des rejets accidentels de polluant. Cependant, chaque incident signalé fera l'objet d'une enquête au cas par cas [18].

1.3 CONCLUSION

En raison de l'évolution rapide de l'industrie du transport maritime et du trafic maritime au cours des dernières décennies, les émissions de pollution atmosphérique des navires ne cessent d'augmenter. Les gaz d'échappement des moteurs diesel sont la principale source d'émissions polluantes nocives telles que les (NO_x), les (SO_x), le (CO) et les (PM) qui contribuent de manière significative à la pollution de l'environnement, aux problèmes de santé humaine et à la détérioration des écosystèmes. L'Organisation maritime internationale (OMI) responsable de la sécurité de la vie humaine en mer et de la protection du milieu marin a adopté l'annexe VI de MARPOL 73/78, intitulée « Règlement pour la prévention de la pollution atmosphérique par les navires » pour traiter les émissions des navires et émettre des normes strictes à l'avenir pour réduire la pollution de l'air. Afin de respecter ces restrictions sur les émissions de polluants nocifs des moteurs diesel marins, différentes technologies, méthodes et solutions techniques efficaces peuvent être mises en œuvre, qui seront présentées et détaillées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

LES TECHNOLOGIES OPTIMISANT L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE DANS LES NAVIRES

2.1 INTRODUCTION

Le transport maritime représente 90 % des échanges mondiaux des marchandises. Il est responsable de 3 % des émissions globales de CO₂. Cette pollution vient s'ajouter à d'autres émissions de gaz NO_x et SO_x qui constituent un réel danger pour l'environnement, notamment pour les riverains [19].

Dans ce contexte, L'OMI a adopté des mesures obligatoires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant du transport maritime international. Dans le but d'éliminer progressivement cette pollution, l'OMI a fixé deux objectifs intermédiaires : Le premier est la réduction des émissions de CO₂ d'au moins 40 % d'ici 2030, et de 70 % d'ici 2050, par rapport à 2008. Le second est la réduction du volume total des émissions de GES annuelles d'au moins 50 % en 2050 par rapport à 2008 [20].

Ces réglementations strictes, combinées aux conséquences écologiques des émissions massives de gaz à effet de serre, ont incité les experts à explorer les technologies d'économie d'énergie et de réduction des émissions dans les navires, notamment une nouvelle conception de la coque, de nouveaux systèmes de propulsion, une gestion avancée de l'énergie et une optimisation opérationnelle.

2.2 TECHNOLOGIES DE CONTROLE DES EMISSIONS

Un certain nombre de mesures prises par les fabricants permettent de réduire aujourd'hui grandement les émissions en utilisant l'une des trois méthodes mentionnées dans la figure 1, telles que les technologies de prétraitement, de traitement interne ou de post-traitement. Cependant, la plupart de ces technologies n'ont pas un impact significatif sur la réduction de la consommation de carburant. Mais sont très efficaces pour réduire les SO_x, les NO_x et les PM de plus de 80% [21].

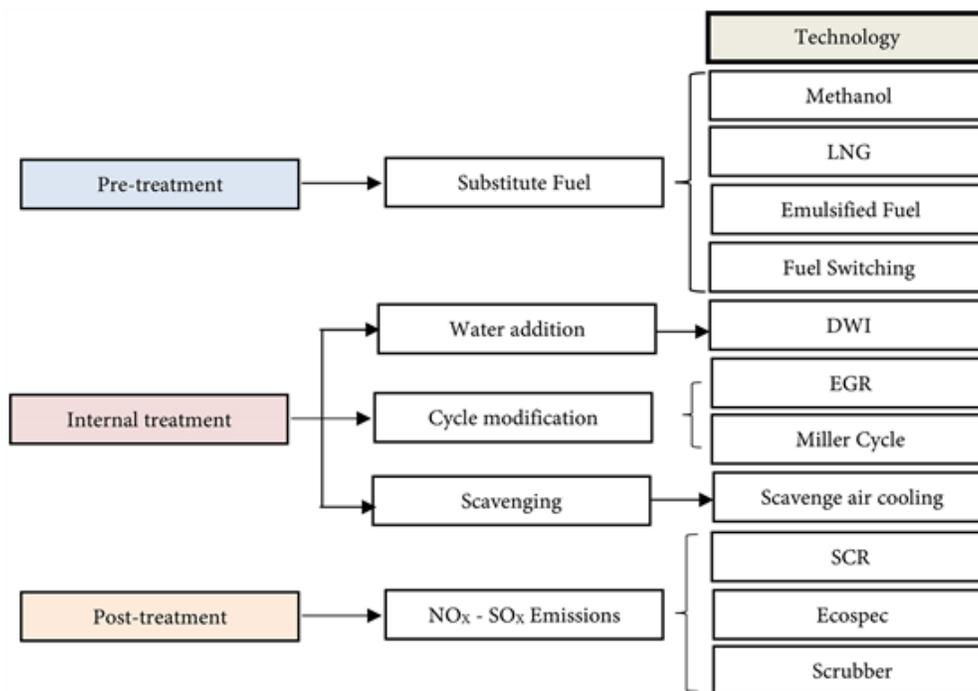


Figure 15. Méthodes de réduction des émissions de SO_x et de NO_x des moteurs diesel marins [22].

2.2.1 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de prétraitement

Les méthodes de prétraitement reposent sur l'utilisation de carburants alternatifs tels que le méthanol et le gaz naturel liquéfié (GNL), qui se caractérisent par une faible teneur en soufre, ce qui contribue à réduire les émissions de SO_x, NO_x, CO₂ et PM.

2.2.1.1 Le méthanol

Le méthanol permet de réduire les émissions de SO_x , NO_x et PM d'une quantité d'environ 99 %, 60 % et 95 % par rapport au fioul lourd (HFO) à usage marin. Cependant, le méthanol augmente le risque de corrosion, qui doit être suffisamment mis à niveau pour les réservoirs de carburant, et il présente des difficultés d'adaptation sur les moteurs diesel, rendant l'auto-allumage difficile en raison du faible indice de cétane du méthanol [22].

2.2.1.2 Le gaz naturel liquéfié (GNL)

Dans les applications marines, le GNL présente des avantages significatifs pour réduire les émissions d'échappement des navires. Comparativement aux moteurs modernes qui utilisent même des carburants propres, Le GNL permet de réduire les SO_x , NO_x , CO_2 et PM par rapport à l'utilisation d'un fioul lourd (HFO) de 98 %, 86 %, 11 % et 96 % respectivement[22]. En cas de fuite, le GNL s'évapore dans l'air ou à la surface de l'eau. Le risque de pollution marine est donc substantiellement réduit en cas de rejet[6]. De plus, une étude précédente évaluée par Wärtsilä afin d'évaluer les avantages de passer d'un moteur alimenté au HFO équipé d'un laveur de mer à un moteur alimenté au GNL a montré des économies supplémentaires sur le coût annuel des machines (entretien, lubrification à l'huile, épurateur et SCR avec capital annuel) d'un montant de 500 \$/kW.

L'utilisation du gaz naturel comme carburant marin garantit la conformité avec toutes les exigences actuelles et futures connues en matière d'émissions.

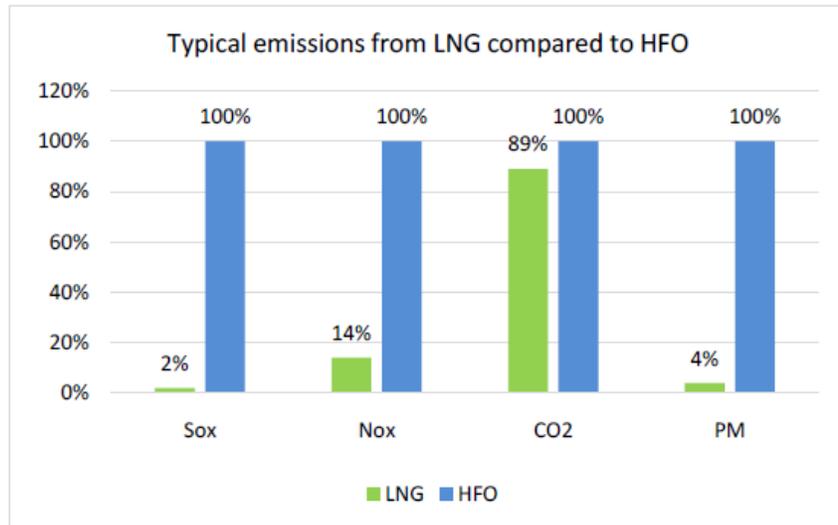


Figure 16. Émissions relatives de gaz pour le GNL et le HFO [21].



Figure 17. NM F.-A.-Gauthier (Premier traversier à être propulsé au GNL en Amérique du Nord) [23].

Malgré ces avantages, le développement de cette solution avec GNL est actuellement freiné par les difficultés liées à :

- La capacité énergétique du gaz (à la moitié de celle du fioul)
- Le stockage à bord des navires nécessite une attention particulière, la taille des réservoirs de stockage de GNL est plus importante (3 à 4 fois) que celle des réservoirs de stockage de diesel marin, ce qui augmente le coût de rénovation et d'installation.

2.2.1.3 Le carburant émulsifié

Le carburant émulsifié proposé par le Professeur B. Hopkin-son, consiste à diminuer la température dans la chambre de combustion en ajoutant de l'eau au carburant. En moyenne 1 % d'injection d'eau permet de réduire 1 % les émissions de NO_x (l'eau se vaporisant dans la chambre permettant d'abaisser la température qui y règne), offrant l'avantage pour d'une meilleure atomisation et d'une meilleure distribution du carburant résultant en une combustion complète. Le carburant émulsifié a l'avantage de réduire les émissions de NO_x et de PM de 30 % et 80 % respectivement. Cependant, il provoque également la corrosion des composants du moteur et il augmente la consommation de carburant de 2 % à 3 % pour atteindre un même rendement [21].

2.2.1.4 La technologie à double carburant

La technologie à double carburant est un moteur bicarburant qui peut fonctionner au gaz naturel, au diesel marin (MDO) ou au fioul lourd (HFO). La technologie bicarburant apporte des avantages exceptionnels aux propriétaires et aux exploitants de navires. En mode gaz, le moteur est déjà conforme à la réglementation Tier III de l'OMI sans aucun système secondaire de purification des gaz d'échappement. La technologie bicarburant permet de réduire les émissions de SO_x et de CO₂ ainsi que de fonctionner sans fumée en mode gaz.

En mode mazout liquide, le moteur est entièrement conforme aux réglementations de l'OMI sur les émissions de gaz d'échappement de niveau II définis à l'annexe VI de la convention MARPOL 73/78 [24]. Néanmoins, il existe plusieurs inconvénients. Premièrement, la puissance de sortie d'un moteur à essence à allumage commandé est inférieure à celle d'un moteur diesel de même taille. Cela se traduit par un investissement en capital plus élevé lors de l'installation initiale. Le coût de maintenance du système d'allumage par étincelle est également élevé. Bien que de nombreux fabricants continuent de travailler au développement de bougies d'allumage à plus longue durée de vie, leur longévité reste préoccupante. En outre, les moteurs à allumage par étincelle fonctionnent à une température plus élevée, ce qui entraîne une augmentation significative des taux d'usure des sièges de soupape [22].

2.2.1.5 L'ammoniac liquide

La décarbonisation du transport naval est un objectif primordial de l'industrie maritime. Chaque année, des centaines de millions de tonnes de dioxyde de carbone sont émises par le transport maritime, causant de graves dommages au climat. Alors que des scientifiques du monde entier testent de nouvelles méthodes de propulsion capables de remplacer l'énergie fossile dans les navires [25].

L'ammoniac est une option attrayante en raison de ses émissions relativement faibles de gaz à effet de serre (GES), de sa densité énergétique élevée, et de ses infrastructures de fabrication et de stockage [26].

Étant donné que l'ammoniac n'émet pas de dioxyde de carbone (CO₂) lorsqu'il est brûlé, il est considéré comme le carburant de nouvelle génération qui devrait réduire l'impact du transport maritime sur le réchauffement climatique.

L'ammoniac est une molécule de formule chimique NH₃ qui se présente sous la forme d'un gaz à température ambiante et à pression normale. Il peut également être stocké sous une forme liquide à basse température (sous -33°C) et/ou lorsqu'il est comprimé, il présente alors des avantages significatifs par rapport à l'hydrogène qui doit être stocké à -253 degrés Celsius sous forme liquide, ou à des pressions d'environ 700 bars sous forme de gaz. Cela rend le stockage et le transport de ce vecteur d'énergie considérablement plus faciles et plus simples [27].

La fabrication d'ammoniac est le troisième émetteur mondial de dioxyde de carbone dans les procédés industriels, créant un demi-milliard de tonnes de CO₂ chaque année, soit 1,8 % des émissions mondiales de CO₂. Si l'ammoniac doit jouer un rôle dans la réduction des émissions maritimes, le carburant doit être fabriqué de manière plus propre. Par exemple, l'hydrogène peut être fabriqué par électrolyse, en divisant l'eau en hydrogène et oxygène en utilisant de l'électricité provenant d'une source renouvelable telle que l'énergie éolienne ou solaire. L'énergie renouvelable peut également être utilisée pour séparer l'azote de l'air [27].

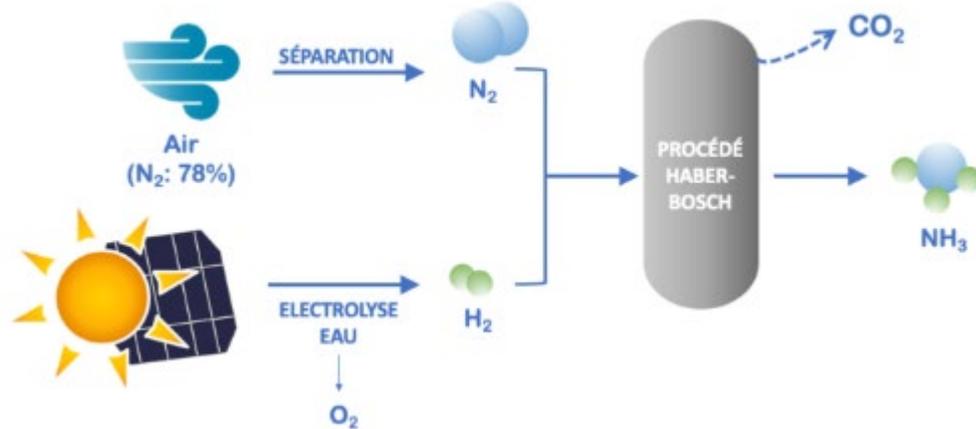


Figure 18. Amélioration du procédé de production de l'ammoniac par utilisation de sources d'énergies renouvelables [28].

L'ammoniac n'est pas sans défaut, la principale préoccupation est la toxicité de l'ammoniac. Sous forme concentrée, le gaz piquant et incolore peut être mortel. Les fabricants et distributeurs d'ammoniac doivent suivre des directives de manipulation et de sécurité strictes afin de minimiser les risques de catastrophe. Pour utiliser de l'ammoniac, les navires auront besoin d'équipements de sécurité supplémentaires, tels que des systèmes de ventilation d'urgence et d'absorption de gaz [27].

Sa combustion peut entraîner la libération de NO_x. Ceux-ci sont connus pour causer des pluies acides, des dommages à la couche d'ozone et potentiellement nuire à la santé humaine, l'installation d'un dispositif de post-traitement est donc nécessaire pour réduire les émissions de NO_x, telles que le système de réduction catalytique sélective (RCS)[29].

L'ammoniac s'enflamme difficilement, donc pour assurer une bonne combustion, il est nécessaire d'ajouter un carburant pilote plus facile à brûler [29].

Tableau 5. Avantages et limites entre les carburants alternatifs pour les applications marines [22] [27] [29]

Technologies	Avantages	Limites
	<ul style="list-style-type: none"> *Ressource renouvelable *Biodégradable *60 % de réduction de NO_x 	<ul style="list-style-type: none"> *Toxique et corrosif *coûteux * Miscible avec l'eau * Auto-allumage difficile
	<ul style="list-style-type: none"> *Coûts d'exploitation réduits *Réduction moyenne de SO_x, NO_x et PM 	<ul style="list-style-type: none"> *Hautement inflammable *Nécessite d'énormes investissements pour le stockage et l'installation *Émissions élevées de CO₂
Prétraitement	<ul style="list-style-type: none"> *Réduction significative des NO_x de 80 % 	<ul style="list-style-type: none"> *Corrosif * Augmenter la consommation de carburant de 3 % pour obtenir le même rendement
	<ul style="list-style-type: none"> *Permet des émissions beaucoup plus faibles de NO_x et de PM 	<ul style="list-style-type: none"> *Coût d'investissement élevé *Nécessite un entretien élevé pour le système d'allumage par étincelle
	<ul style="list-style-type: none"> *Aucune émission de carbone * faibles coûts de production, de stockage et de transport par rapport à d'autres carburants neutres en carbone 	<ul style="list-style-type: none"> * toxique * des émissions importantes de NO_x * corrosif pour certains alliages contenant du cuivre et du nickel *de vastes infrastructures de soutage doivent être construites

2.2.2 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de traitement interne :

D'une manière générale, le traitement interne consiste en une modification directe du moteur diesel, elle est effectuée par les fabricants de DE. Parmi ces modifications :

- Modifications de la conception des injecteurs, comme l'utilisation de l'injection directe d'eau (DWI).
- L'utilisation du cycle de Miller
- Réduction de la température de l'air de balayage,
- Recirculation des gaz d'échappement (EGR)

2.2.2.1 L'injection directe d'eau (DWI)

L'eau peut également être introduite dans la chambre de combustion depuis l'injecteur lui-même qui est composé de deux parties l'une pour pulvériser de l'eau et l'autre pour injecter du fioul.



Figure 19. Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [15].

L'injection d'eau a lieu avant l'injection de combustible à une pression comprise entre 210 et 400 bars suivant le type de moteur, ce qui permet une réduction de la température de la chambre et des émissions de NO_x jusqu'à 60% [15].

2.2.2.2 L'utilisation du cycle de Miller

En fonctionnement classique, les courses de compression et de détente sont égales dans un moteur quatre temps. Avec le cycle de Miller, la course de compression est artificiellement réduite, ce qui aura pour effet d'augmenter relativement la course de détente. Afin d'éviter une température et une pression trop élevées en fin de compression [15].

Le cycle de Miller est considéré comme un cycle de froid, permet d'augmenter le rendement du moteur et de réduire les émissions de 40 % jusqu'à 60 %.

2.2.2.3 Réduction de la température de l'air de balayage

La réduction de la température de l'air de balayage réduit les températures de combustion et donc les émissions de NO_x . Pour chaque réduction de 3°C , l'oxyde d'azote NO_x diminue d'environ 1% [30].

2.2.2.4 Recirculation des gaz d'échappement (EGR)

Ce système (Exhaust gas recirculation EGR) est largement répandu dans l'automobile. Il s'agit en fait de réduire la concentration en oxygène dans la zone où se déroule la combustion en faisant recirculer des gaz d'échappement propres et refroidis dans le collecteur d'admission du moteur diesel. L'injection de gaz d'échappement, contenant de l'eau et du dioxyde de carbone dont la capacité thermique molaire (ou chaleur massique C , c'est-à-dire la quantité de chaleur Q nécessaire pour amener $m=1$ kg d'un corps à une température $T+dT$ voisine de T) est élevée, permet d'abaisser le pic de température et donc une formation moindre de NO_x . L'EGR permet de réduire les émissions de NO_x de 50 à 60 % sans affecter la puissance du moteur [15]. L'installation d'un dispositif d'épuration des gaz d'échappement (SO_x) en aval d'un moteur équipé d'un dispositif d'EGR est un moyen technique entièrement viable qui permet à un navire de fonctionner au mazout lourd dans les zones de contrôle des émissions tout en respectant à la fois les normes d'émission de NO_x et les normes d'émission de SO_x .

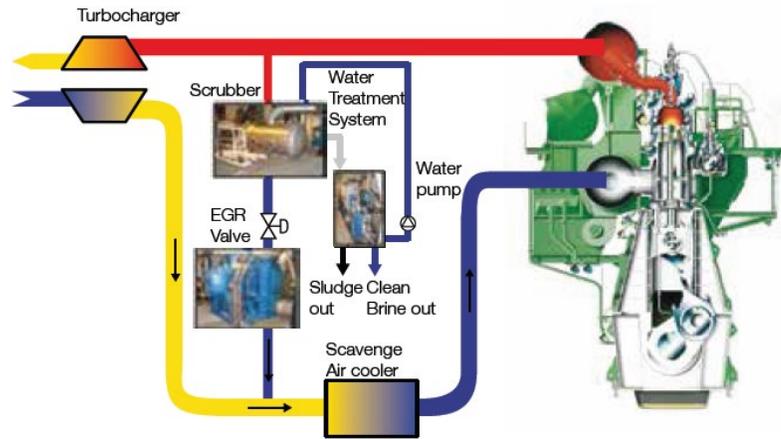


Figure 20. Système EGR [15].

Tableau 6. Avantages et limites des solutions de traitement interne

Technologies	Avantages	Limites
DWI	*Réduction de NO _x d'environ 60 % *Peut être appliquée pour le moteur diesel marin à vitesse moyenne	*Augmente la consommation de carburant de 2 % à 3 %
Cycle de Miller	*Augmenter l'efficacité du moteur *Réduction de NO _x de 40 % à 60 %	*Nécessite un entretien supplémentaire *Coût élevé
Traitement interne Réduction de la température de l'air de balayage	*60 % de réduction des émissions de NO _x *Réduire le nombre et la taille des orifices d'échappement	*Un entretien supplémentaire est requis
EGR	*30 % de réduction des émissions de NO _x *Faible coût d'exploitation	*Ne peut pas être utilisé à des charges élevées *Augmente les émissions de PM

Source: A Review and Economic Analysis of Different Emission Reduction Techniques for Marine Diesel Engines; 2019

2.2.3 Solutions de réduction des émissions des moteurs diesel marins utilisant des technologies de post-traitement :

Aujourd'hui, les technologies de post-traitement sont considérées comme les solutions les plus adaptées pour l'industrie maritime pour réduire les émissions de NO_x et de SO_x du moteur à gaz d'échappement, y compris :

- Dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers)
- La technologie de réduction catalytique sélective (SCR)

2.2.3.1 Les Dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers)

Les épurateurs sont des dispositifs de nettoyage des gaz d'échappement marins, notamment en éliminant les oxydes de soufre (SO_x) et d'une quantité non négligeable de particules. En termes d'efficacité, les épurateurs d'eau de mer tels que les épurateurs à boucle ouverte, à boucle fermée et Ecospec peuvent réduire les SO_x et les NO_x jusqu'à 99 % et 60 %, permettant aux armateurs de continuer à utiliser le HFO qui est moins cher à l'achat que le fioul léger (LFO) à 0,1 % de soufre.

a) *LES EPURATEURS A BOUCLE OUVERTE*

Le système d'épuration le plus simple disponible est l'épurateur à boucle ouverte, qui utilise l'eau de mer comme milieu d'épuration et de neutralisation. Le flux d'échappement du moteur ou de la chaudière passe dans le laveur marin et n'est traité qu'avec de l'eau alcaline, le volume de cette eau de mer dépend de la taille du moteur et de sa puissance de sortie [31].

Ce système est très efficace lorsque l'eau de mer utilisée pour le lavage a une alcalinité suffisante et que la capacité de pompage doit être élevée en raison de la grande quantité d'eau utilisée.

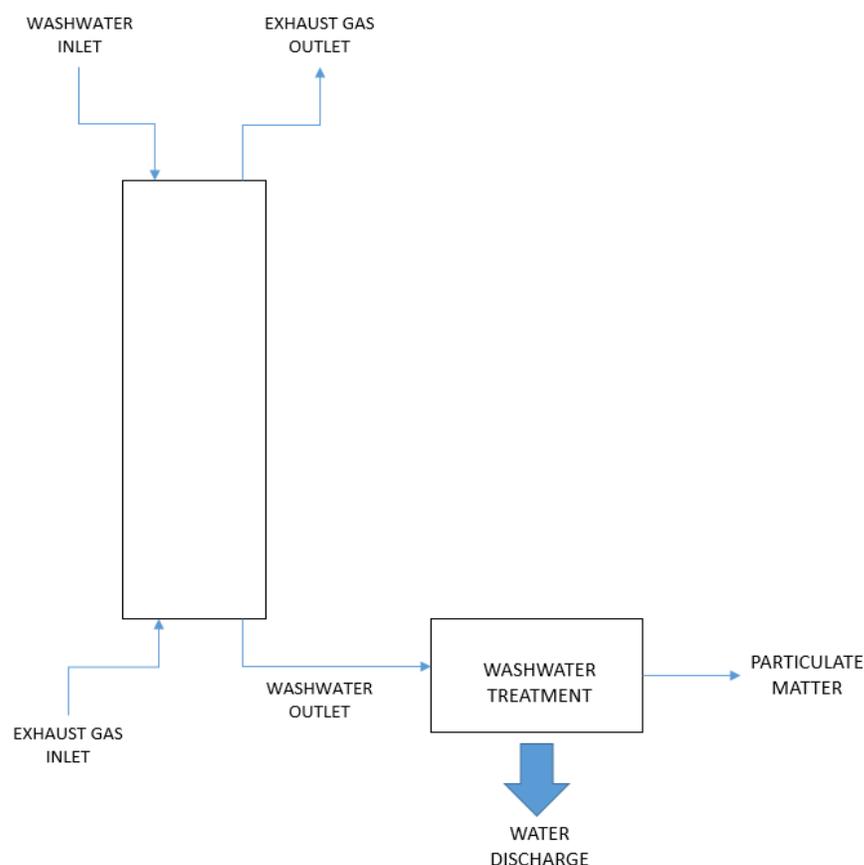


Figure 21. Schéma d'un système d'épuration humide en boucle ouverte [31].

Le gaz d'échappement dans un épurateur à boucle ouverte traverse le vaporisateur de l'eau alcaline (généralement eau de mer), ensuite, les eaux de lavage sont rejetées dans le milieu marin sans traitement. Ils contiennent un mélange de métaux (vanadium, zinc, cadmium, plomb et nickel) et de polluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques appelés HAP, résidus de fioul). Les métaux ne sont pas biodégradables, ils peuvent se bioaccumuler à des degrés divers. L'eau rejetée par le laveur contient également des substances et des éléments chimiques produits par la combustion du fioul lourd tel que les SO_x, NO_x, particules (PM₂, PM₅ et PM₁₀ et nanoparticules) et carbone suie (black carbone)[32]. Pour ces raisons, un épurateur marin à boucle ouverte n'est pas considéré comme une technologie appropriée pour des zones telles que la Baltique [33].

b) LES EPURATEURS A BOUCLE FERMEE

Les systèmes d'épuration en boucle fermée fonctionnent selon des principes similaires à ceux du système en boucle ouverte, ils utilisent de l'eau douce traitée avec un produit chimique (généralement de l'hydroxyde de sodium) au lieu de l'eau de mer.

Les épurateurs d'eau douce sont utilisés lorsqu'un nettoyage à haute efficacité est requis ou lorsque l'alcalinité variable associée à l'eau de mer empêche l'utilisation d'épurateurs marins en boucle ouverte.

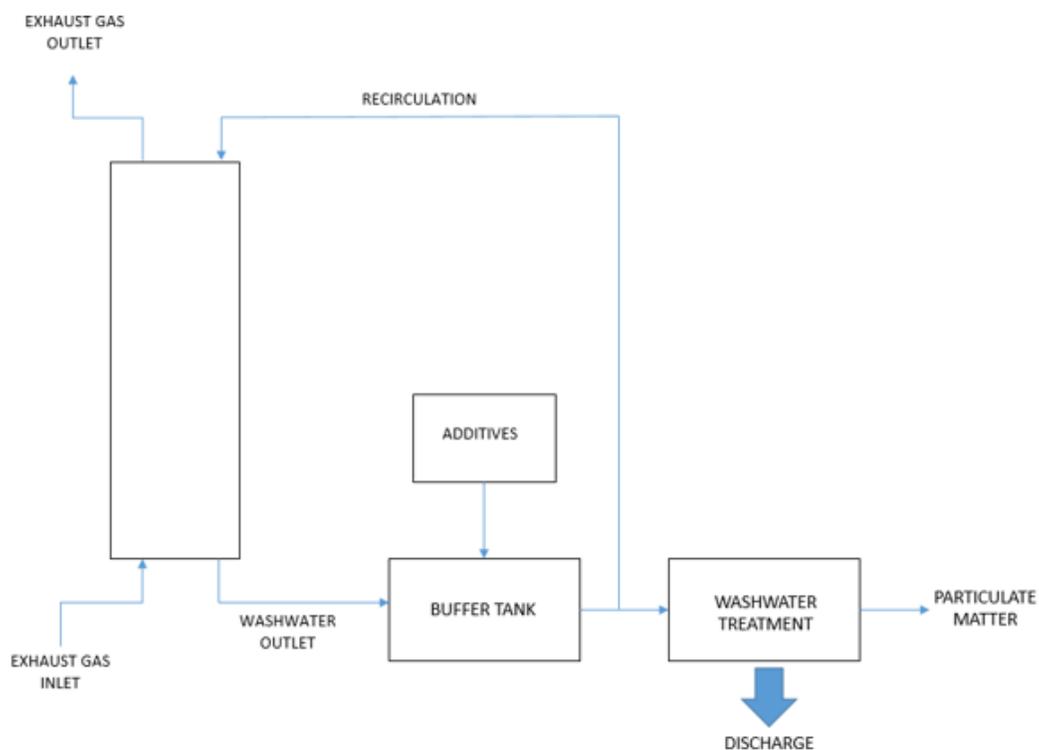


Figure 22. Schéma d'un système d'épuration humide en boucle fermée[31].

Ces systèmes en boucle fermée ont des débits de rejet beaucoup plus faibles que les systèmes d'épurateur en mer à boucle ouverte d'une quantité d'environ 0,1 à 0,3m³/MWh et produisent un volume d'effluents plus faible [22]. Malgré leurs avantages, les épurateurs à boucle fermée nécessitent plus d'espace pour contenir les eaux usées et les solutions chimiques dangereuses.

c) LA TECHNOLOGIE CSNO_x DE L'ECOSPEC

La technologie CSNO_x d'ECOSPEC est la seule solution commercialement viable pouvant assurer une réduction efficace des polluants nuisibles contenus dans les émissions des grands navires océaniques. Elle permet des réductions significatives de NO_x, SO_x et CO₂ et améliore la qualité des eaux rejetées par un seul procédé et un seul système.

La technologie CSNO_x est composée de deux étapes. La première étape est un épurateur humide en boucle ouverte lié à des techniques de traitement de l'eau de lavage, tandis que la deuxième étape utilise de l'eau de mer conditionnée par des ondes ultra-basse fréquence (ULF) pour produire de l'eau de mer alcaline qui absorbe prétendument les SO_x, NO_x et CO₂ [22].

Malgré tout, la technologie CSNO_x nécessite une maintenance fréquente, coûte jusqu'à 4 % du coût de l'équipement par an.

2.2.3.2 La technologie de réduction catalytique sélective (RCS)

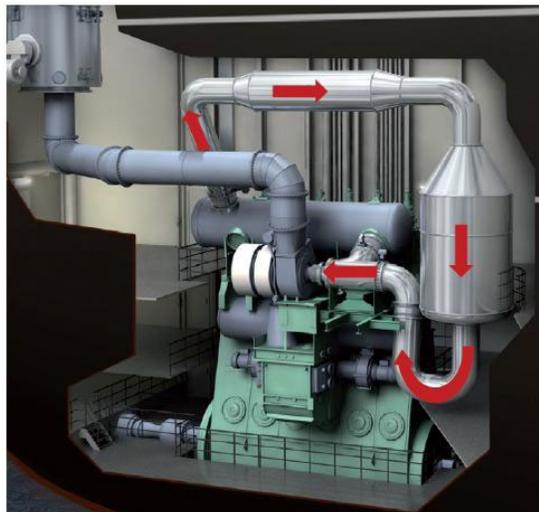


Figure 23. Système « Selective Catalytic Reduction » [15].

La réduction catalytique sélective (RCS) (en anglais « selective catalytic reduction (SCR) ») est une technique qui offre la plus grande réduction d'oxyde d'azote jusqu'à 90 % sur les moteurs diesel. Le principe de fonctionnement est que les gaz d'échappement résiduels sont combinés avec de l'ammoniac (NH_3) avant de passer sur une couche catalytique spéciale à haute température entre $300^{\circ}C$ - $400^{\circ}C$, réduisant les NO_x en gaz non nocifs comme l'eau et l'azote suivant la réaction suivante :

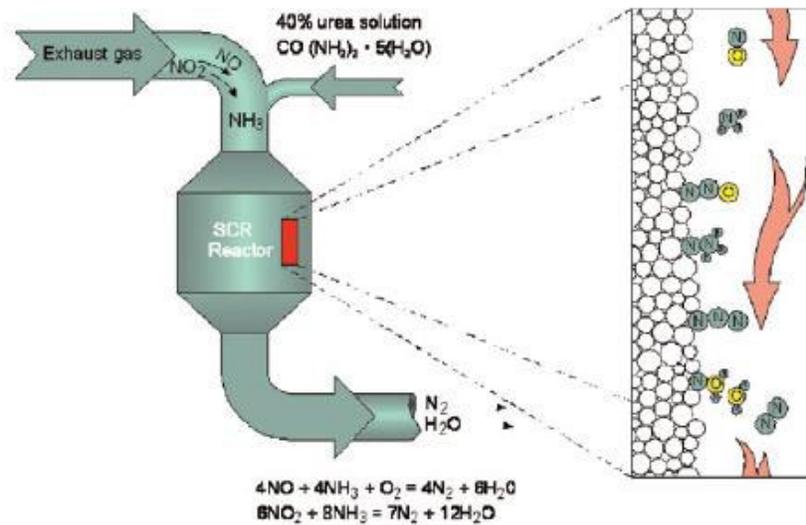


Figure 24. Réaction chimique dans le catalyseur SCR[15].

Le SCR présente un avantage dans son adaptation et ne nécessite pas de modification de l'architecture du moteur, mais peut être soumis à des restrictions d'espace. Selon le fabricant Wärtsilä, la SCR est la meilleure technologie pour atteindre la conformité de niveau III de l'annexe VI révisée de la convention MARPOL.

Tableau 7. Avantages et limites des solutions de post-traitement

	Technologies	Avantages	Limites
Post- traitement	Épurateur à boucle ouverte	<ul style="list-style-type: none"> *Efficacité élevée d'élimination du dioxyde de soufre SO_x (jusqu'à 98 %) *Offre la possibilité d'utiliser le HFO qui est moins cher que le fioul léger (LFO) *Réduire le PM de 60 % 	<ul style="list-style-type: none"> *Soumis à la corrosion (eau de mer) *Nécessite un entretien régulier *Nécessite une alimentation électrique supplémentaire *Ne convient pas aux navires opérants en eau douce *Augmente la consommation de carburant des navires
	Épurateur à boucle fermée	<ul style="list-style-type: none"> *Convient aux navires opérants en eau douce *Débits de rejet beaucoup plus faibles que les systèmes d'épurateur à boucle ouverte 	<ul style="list-style-type: none"> *Nécessite un espace de stockage pour contenir les eaux usées et les solutions chimiques dangereuses *Forte consommation d'eau douce
	Ecospec CSNO _x	<ul style="list-style-type: none"> *Réductions significatives de NO_x, SO_x et CO₂ de 65 %, 99 % et 77 % *Possibilité de continuer à utiliser du fioul lourd (HFO) 	<ul style="list-style-type: none"> *Coût d'investissement élevé * Nécessite une puissance de générateur supplémentaire
	RCS	<ul style="list-style-type: none"> *Installation relativement simple *Une réduction de 95 % de NO_x 	<ul style="list-style-type: none"> *Solution couteuse * Le catalyseur peut souffrir de l'érosion causée par les gaz de combustion *Nécessite suffisamment d'espace

Source: A Review and Economic Analysis of Different Emission Reduction Techniques for Marine Diesel Engines; 2019

2.3 L'INNOVATION AU SERVICE DU TRANSPORT MARITIME ET LES RECENTES TECHNOLOGIES

Bien que le transport maritime soit le moyen de transport le plus écoénergétique pour le transport de marchandises à l'échelle mondiale, ce dernier contribue tout de même de façon importante aux émissions de gaz à effet de serre (GES). Par conséquent, atteindre l'objectif ambitieux adopté en vue de réduire les émissions de GES provenant des navires posera de nombreux défis [34].

Afin de conserver une longueur d'avance sur les objectifs climatiques, l'industrie du transport maritime met en place des stratégies d'économie d'énergie dont les technologies innovantes en matière de réduction des émissions polluantes présentées dans la première partie de ce chapitre telle que les technologies de prétraitement, traitement interne et les technologies du post-traitement.

Plusieurs alternatives sont proposées et plusieurs expériences sont actuellement menées pour évaluer les possibilités d'utilisation des sources d'énergies alternatives pour réduire ou remplacer les combustibles fossiles à bord d'un navire.

Parmi ces technologies : Les éoliennes, les modules photovoltaïques, les systèmes hybrides et les solutions électriques.

2.3.1 La propulsion éolienne

Dans le but de diminuer les coûts en carburant et les émissions de gaz à effet de serre, beaucoup d'armateurs ont décidé d'équiper leurs cargos et pétroliers géants de différents types de propulsion éolienne. Selon l'International Windship Association, la technologie de la propulsion éolienne utilisée sur les navires pourrait réduire de 50 %, en moyenne, leur consommation de carburant et leurs émissions de GES [35]. Certains modèles pourraient même fonctionner à 100 % avec l'énergie éolienne.

Les systèmes d'énergie éolienne et assistés par le vent emploient diverses méthodes de propulsion, qui sont toutes à différents niveaux de développement ou sous test à des fins de certification.

2.3.1.1 Voiles rigides et souples

Les voiles de nouvelle génération peuvent être divisées en deux grandes catégories, soit les voiles rigides ou les voiles souples.

La plupart de ces voiles sont conçues pour assister d'autres modes de propulsion, tels que les moteurs, et peuvent réaliser environ 30 % d'économies de carburant [34]. En revanche, d'autres technologies sont encore en cours de développement, visant à réduire les émissions jusqu'à 90%, comme le projet d'Oceanbird, le plus grand voilier du monde.



Figure 25. Cargo transocéanique Wind challenger [36].

La figure 8 montre le projet japonais de cargo transocéanique équipé de la technologie Wind challenger qui convertit l'énergie éolienne directement en force de propulsion de navire grâce à ces voiles rigides [36], il s'agit des voiles traditionnelles, mais qui n'est pas en matériel mou, ce qui permet d'y ajouter des panneaux solaires. Quatre grands navires ont adopté cette technologie, ainsi qu'une dizaine de petits traversiers.



Figure 26. Oceanbird/Wallenius Marine [36].

La société suédoise Wallenius Marine AB, qui conçoit et construit des navires, a annoncé le lancement du projet d'Oceanbird, un roulier (navire transportant des voitures) propulsé par le vent [37].

L'Oceanbird capable de transporter 7000 véhicules, ce navire de 200 mètres de long sera doté de 5 voiles rigides télescopiques de 80 mètres de haut. Elles pourront pivoter sur 360 degrés sans se toucher, et être rétractées de 20 mètres pour franchir des ponts ou résister à des conditions météo difficiles [37].

Les grands rouliers conventionnels utilisent en moyenne 40 tonnes de carburant par jour, générant 120 tonnes de CO₂. Avec ses 5 voiles géantes, Oceanbird devrait émettre 90% de CO₂ en moins que les autres transporteurs de voitures. Il utilisera seulement ses moteurs lors des manœuvres, ainsi que pour les situations d'urgence [16].

2.3.1.2 Rotor Sail de Norsepower

Dont le concept de base est connu sous le nom de rotor Flettner, cette technologie a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius à l'origine et a ensuite été démontrée par Anton Flettner lors d'une traversée de l'océan Atlantique en 1926, mais Norsepower a apporté diverses améliorations pour lesquelles plusieurs brevets ont été délivrés [38]. Cette solution est un cylindre rotatif qui utilise la force de Magnus pour convertir l'énergie éolienne en force propulsive. Dans de bonnes conditions de vent, la voile de rotor réduit la puissance du moteur principal, économisant ainsi du carburant et réduisant les émissions et fournissent en même temps la puissance nécessaire pour maintenir la vitesse et la durée du voyage.



Figure 27. Rotor Sail de Norsepower [37].

2.3.1.3 Voile gonflable

Michelin, leader mondial dans le domaine du pneumatique, a développé le projet Wing Sail Mobility (WISAMO), une voile gonflable qui se rétracte rapidement lorsqu'il n'y a pas de vent. Elle se compose d'un compresseur d'air utilisé pour gonfler les voiles et d'un mât télescopique.

La voile d'aile WISAMO peut aider à abaisser la consommation des cargos et grands bateaux de 10 à 20 % et permet de réduire les émissions des gaz polluantes. De plus, Michelin assure que sa voile sait résister aux intempéries et aux orages et qu'une fois installée, alors une maintenance quasiment nulle [39].



Figure 28. Le concept de Michelin repose sur des voiles gonflables [39].

2.3.1.4 Les Turbovoiles

La société hollandaise eConowind a développé une turbo voile appelée Ventifoils c'est un élément en forme d'aile utilisant des innovations modernes en aérodynamique créant une force de propulsion élevée par rapport à sa taille. Une aspiration intelligente est intégrée dans l'aile, ce qui permet de doubler le rendement du Ventifoil.

Les Ventifoils peuvent pivoter automatiquement pour trouver les angles optimaux pour le vent apparent. La force générée sera transférée directement dans le pont et contribuera ainsi à la propulsion du navire [40].

Cette technologie a été installée sur le navire de marchandises générales de 3 600 TPL, le MV Ankle, dans le cadre d'un projet de propulsion éolienne financé par le programme Interreg North Sea Region de l'Union européenne et d'après les estimations, les économies en carburant permettront de rentabiliser le système dans environ trois ans, réduisant ainsi les émissions de GES [34].



Figure 29. Navire MV Ankle.



Figure 30. L'unité eConowind Ventifoils[34].

2.3.2 Les systèmes hybrides

La plupart des chercheurs considèrent qu'il est nécessaire de combiner différentes nouvelles sources d'énergie pour améliorer la puissance de sortie totale dans les navires[41]. Par conséquent, l'entreprise japonaise Eco Marine Power a développé un système combiné entre l'énergie éolienne et solaire appelé Aquarius MRE (Marine Renewable Energy) incluant des voiles rigides, des panneaux solaires photovoltaïques, des modules de stockage d'énergie et d'un système de commande informatisé, qui aide à la propulsion pour un transport maritime durable et qui permettra aux navires d'être alimenté de manière plus verte et plus écologique [42].

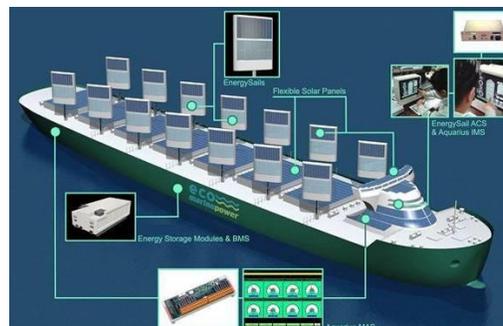


Figure 31. Aquarius Eco Ship par Eco Marine Power - Navire à voile assistée [42].

Les voiles rigides du système Aquarius MRE sont basées sur la technologie EnergySail qui permet aux navires d'exploiter la puissance du vent et du soleil afin de réduire les coûts de carburant, ainsi que les émissions de gaz nocifs et de carbone, l'EnergySail est une plateforme d'énergie renouvelable qui peut être équipée d'une gamme de technologies telles que des modules photovoltaïques (PV) et les dispositifs éoliens [43].



Figure 32. Technologie EnergySail [43].

La solution EnergySail est vraiment unique et spécialement conçue pour le transport maritime qui peut être installée sur une grande variété de navires tels que les pétroliers, les cargos généraux, les navires de croisière, les navires rouliers.

Cette combinaison de technologies pourrait entraîner des économies de carburant de 40 % ou plus lorsqu'elle est appliquée aux conceptions de navires existantes et également réduire considérablement les émissions de gaz nocifs tels que les oxydes de soufre (SOx), les oxydes d'azote (NOx) et les particules (PM) [44].

2.3.3 Optimisation par des solutions électriques

2.3.3.1 L'écèlement des charges et le stockage d'énergie

Peak Shaving ou l'écèlement des charges proposé par Barillec Marine est l'une des applications de stockage d'énergie qui a un grand potentiel pour devenir importante dans le domaine maritime de l'avenir. Cette technologie, utilisée par les fournisseurs et distributeurs d'énergie dans les réseaux terrestres, permet d'intercepter les pics de charge et de libérer la puissance nécessaire en cas de besoin [45].

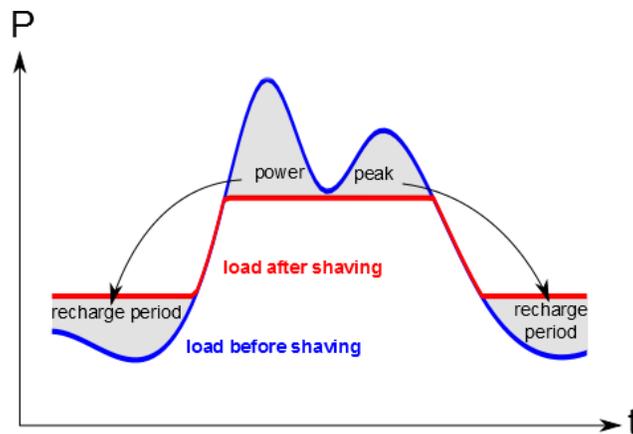


Figure 33. Principe du PEAK SHAVING [46].

Peak shaving est la solution appropriée pour gérer les pics de charge très variables dans les générateurs diesel, sans émissions polluantes (CO_2 , NO_x , SO_x ...). De plus, elle permet de réduire la puissance installée, les factures de carburant et les coûts d'exploitation et de maintenance. Elle présente également d'autres avantages en termes de confort de navigation, de réduction du bruit et des nuisances liées à l'odeur de gazole.

Dans le cas d'une rénovation de navire, l'intégration de l'écèlement des charges dans l'installation existante permet d'optimiser l'efficacité d'un système de propulsion hybride (fossile/électrique).

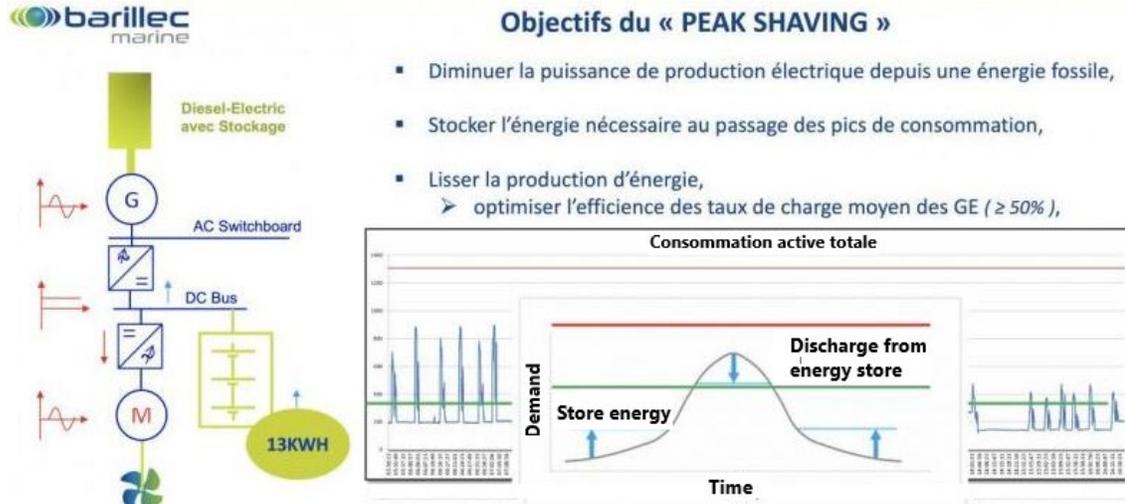


Figure 34. L'objectif du PEAK SHAVING [45].

L'entreprise WÄRTSILÄ a intégré un système de stockage d'énergie basé sur des batteries avec les groupes électrogènes conventionnels à moteur diesel ou à double carburant. Cette solution offre une amélioration significative de l'efficacité en faisant fonctionner le moteur sur une charge optimale et en absorbant de nombreuses fluctuations de charge grâce aux batteries. En augmentant la redondance de puissance, le système permet au moteur de fonctionner plus près de son point de conception optimal où il a le plus haut rendement et le moins d'émissions. Cela se traduira par une réduction des besoins de maintenance et une augmentation des performances des systèmes. Une réponse rapide du système de batterie fait également partie des avantages offerts [47].



Figure 35. L'installation des batteries à bord [48].

Les systèmes hybrides/batterie Wärtsilä conviennent aux applications dans une variété de segments, y compris les navires-offshore, les remorqueurs, les traversiers et les navires côtiers [47].

2.3.3.2 Les génératrices à stator rotatif

Parmi les technologies qui sont en cours de développement pour réduire la consommation du carburant et les émissions des gaz polluants sur les navires est l'intégration de la technologie à stator rotatif développée par l'entreprise Concept Fiset Inc sur les générateurs diesel pour les bateaux de cargaison.

Le concept à double rotor est un système de contrôle qui propose une approche très originale basée sur une nouvelle conception d'alternateur différent de ce qui devrait être la constitution de l'alternateur standard. Le concept utilise un nouveau stator non statique où le stator tourne autour de l'axe du rotor. Un moteur électrique (compensateur) installé directement sur l'alternateur entraîné par un contrôleur automatique dédié attribue la vitesse, la position souhaitée ou l'accélération de la structure du stator [49].

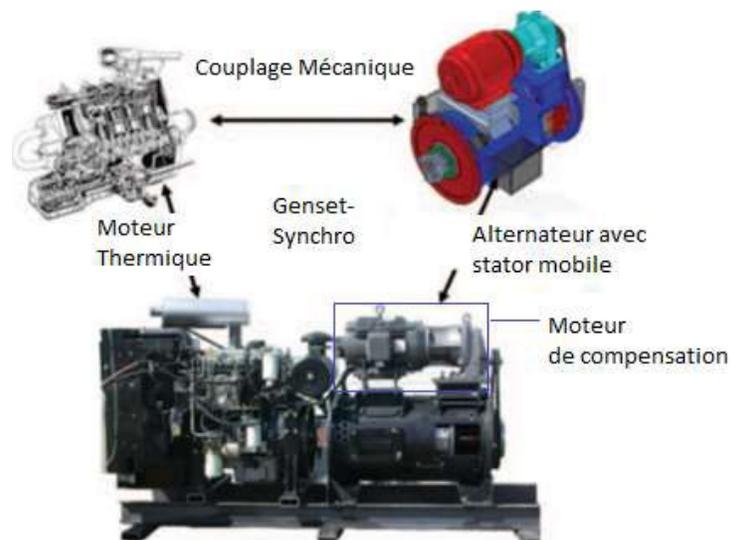


Figure 36. Illustration du nouvel alternateur de Genset-Synchro (Stator et Rotor rotatifs) couplé à un moteur diesel [48].

Cette nouvelle technologie, une fois couplée à un moteur diesel, permet de faire fonctionner la génératrice à vitesse variable sans avoir recours à des convertisseurs électroniques conventionnels. Par exemple, en baissant le régime du moteur diesel à 1500 tours/min au lieu de 1800 tours/min, l'alternateur pourra compenser la vitesse en faisant tourner son stator à 300 tours/min à partir de ce moteur de compensation qui entraîne à travers une courroie et une poulie le stator dans le sens contraire de son rotor, afin de garder la tension et la fréquence (60 Hz) constantes[49].



Figure 37. Moteur électrique (compensateur) [48].

De nombreux travaux ont été menés et de nombreuses expérimentations ont été réalisées, montrant une réduction significative de la consommation de carburant et des émissions des gaz à effet de serre tels que, dans les travaux mentionnés en [50] et publiés dans le journal IDGTE en décembre 2017, l'économie en carburant est de 12 % lorsque la génératrice de 75 kW fonctionnait à faible charge (inférieure ou égale à 40 %) et est de 8 % lorsque la charge appliquée est de 90 %. D'autre part, certains résultats expérimentaux étés réalisés au sein de l'entreprise Genset-Synchro sur la génératrice diesel 3412C d'une puissance de 500 kW fabriqués par Caterpillar montrent que des économies de carburant significatif de 15 % peuvent être obtenues à des charges faibles (inférieure à 50 %) et des économies de carburant de 5 % pour les hautes charges (85 %) [51].

2.3.4 Architecture navale pour la réduction de la consommation du carburant

2.3.4.1 Nageoires de baleines

Les nageoires de baleines sont une nouvelle solution développée par la start-up Blue Fins et l'Ifremer, elle devrait faire son apparition sur le marché d'ici 2023 [52].

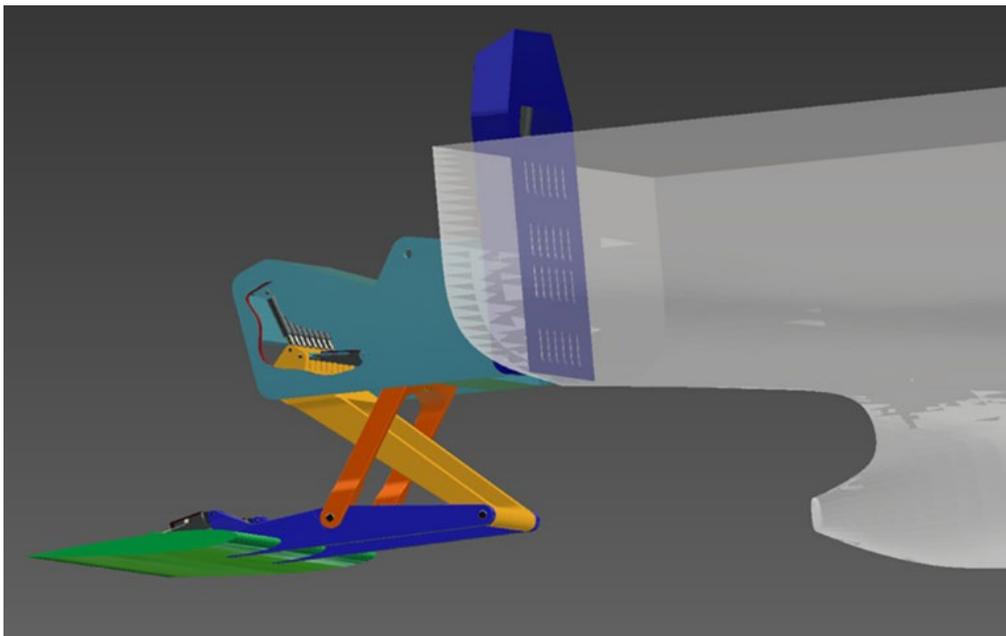


Figure 38. Système nageoire de baleine [52].

Un hydrofoil attaché à un grand bras articulé est animé par les vagues, placé à l'arrière des navires. Les foils sont comme des ailes d'avion coulées qui soutiennent le navire et réduisent le frottement de la coque avec l'eau. Leur mouvement, créé par la houle, fait avancer le navire à la manière d'une queue d'une baleine.

Plus le mouvement des vagues est fort, plus l'énergie est générée pour faire avancer le navire, cette technologie présente une économie de 20% à 30% de consommation en carburant [52].

2.3.4.2 Système de lubrification à l'air

Le système de lubrification à l'air est une méthode pour réduire la résistance entre la coque du navire et l'eau de mer à l'aide de bulles d'air. La distribution des bulles d'air sur la surface de la coque réduit la résistance travaillant sur la coque du navire, créant des effets d'économie d'énergie. Avec la bonne conception de coque de navire, le système de lubrification par air devrait permettre de réduire jusqu'à 10 à 15 % les émissions de CO₂, ainsi que d'importantes économies de carburant [53].



Figure 39. La technologie à bulles [54].

Ce système fonctionne sur le principe simple de piéger une couche de bulles d'air sous la coque du navire. Un souffleur d'air ou un système dédié est utilisé pour générer des bulles d'air pour les faire passer en continu sous la surface du navire. Des sorties de bulles d'air sont créées à différents endroits le long du bas de la coque, symétriquement des deux côtés de la ligne médiane du navire. Cela réduit la résistance de friction entre l'eau et la coque et améliore l'efficacité opérationnelle du navire, réduisant la consommation de carburant et les émissions associées [53].

2.3.4.3 Hélice à économie de carburant

Hyundai Heavy Industries (HHI) a utilisé un dispositif d'économie d'énergie appelé Hi-FIN fixé au moyeu de l'hélice du navire, qui génère des tourbillons opposés qui compensent les tourbillons générés par l'hélice et améliore ainsi l'efficacité de la propulsion [55].



Figure 40. Le dispositif HI-FIN [55].

Selon un essai d'un an du dispositif d'économie d'énergie installé sur un méthanier de 162000m³, HHI a découvert que Hi-FIN peut économiser jusqu'à 2,5% de carburant par rapport au même type de navires sans cette technologie.

2.3.4.4 Modification de l'arc bulbeux du navire

Un arc bulbeux est une ampoule saillante à la proue (ou à l'avant) d'un navire juste en dessous de la ligne de flottaison . L'ampoule modifie la façon dont l'eau circule autour de la coque , réduisant la traînée et augmentant ainsi la vitesse, l'autonomie, le rendement énergétique et la stabilité [56].

La modification et la bonne conception de la proue bulbeuse du navire donnent des gains d'efficacité et permettent de réduire la consommation de carburant des navires. Des entreprises comme le groupe NYK et Maersk Line ont utilisé cette technique avec succès pour améliorer la consommation de carburant.



Figure 41. Arc bulbeux avant et après modification [54].

Le groupe NYK a apporté des modifications à l'étrave bulbeuse sur un porte-conteneurs, ce qui a entraîné une réduction vérifiée de 23 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sur 6 mois, tandis que le groupe Maersk a pu réduire les coûts de carburant d'environ 8 % avec cette technique [54].

2.3.5 Navigation à vitesse réduite (slow steaming)

La navigation à vitesse réduite est une pratique opérationnelle connue sous le nom de (slow steaming) par laquelle les moteurs ne fonctionnent pas à plein régime, réduisant ainsi la consommation de carburant et donc les émissions de CO₂ et les polluants atmosphériques tels que les NO_x et PM. Cette approche a été établie pour le transport de conteneurs par Maersk Lines et a ensuite été adoptée par d'autres types de navires, notamment les pétroliers et les vraquiers.

Aujourd'hui, la navigation lente est devenue une mesure populaire pour améliorer l'efficacité énergétique des navires marchands en réduisant la consommation de carburant et les coûts d'exploitation. Cette approche a également été reconnue par l'OMI et il a été suggéré que les chercheurs étudient leurs avantages potentiels [57].

Une réduction de 10 % de la vitesse de croisière peut entraîner une réduction de 19 % des émissions moyennes totales, ces réductions sont calculées en supposant que la puissance requise est proportionnelle à la valeur au cube de la vitesse du navire[57]. Elle présente également d'autres avantages, tels que l'atténuation de l'érosion des berges par le batillage et la réduction des risques de collision avec les mammifères marins. Les avantages de la navigation lente varient selon les types de navires, les tailles et les itinéraires de navigation [58].

2.3.6 Récapitulatif des avantages et inconvénients

Tableau 8. Avantages et limites des moyens de propulsion éoliens.

Technologies	Avantages	Limites	Référence	
Propulsion éolienne	Voiles rigides	<ul style="list-style-type: none"> *Réduction l'émission jusqu'au 30% et dans d'autres cas jusqu'au 90%. *Réduction significative du carburant *l'utilisation des Ressources renouvelables. 	<ul style="list-style-type: none"> *navigation plus lente que les navires conventionnels *Technologie coûteuse *n'est pas envisageable pour des navires de type porte-conteneur *Risque de cassure du mat *la variation de la vitesse du vent 	[34] [37] [59] [60]
	Rotor Sail de Norsepower	<ul style="list-style-type: none"> *Simplicité de réglage *économies en carburant de 5 à 20 % *fonctionnement dans diverses conditions météorologiques *rotor inclinable 	<ul style="list-style-type: none"> *nécessite d'espace pour mettre des moteurs supplémentaires *Couple de retournement important *Mécanique compliquée 	[60] [61] [59]
	Voile gonflable	<ul style="list-style-type: none"> *permet d'abaisser la consommation et de réduire les émissions de 10 à 20 % *faibles coûts de maintenance *les ailes sont rétractables 	<ul style="list-style-type: none"> *n'est pas envisageable pour des navires de type porte-conteneur *Technologie encore onéreuse *Charge de travail supplémentaire 	[60] [62]
	Turbovoile	<ul style="list-style-type: none"> *stockage facile lors des conditions de vent défavorables *économies en carburant de 7 à 11% 	<ul style="list-style-type: none"> *besoin d'espace sur le pont *n'est pas envisageable pour les porte-conteneurs 	[40] [63] [64]

Tableau 9. Avantages et limites de système hybride.

Technologies	Avantages	Limites	Référence
Le système hybride Eco Marine Power	<ul style="list-style-type: none"> *Permet d'abaisser la consommation et de réduire les émissions jusque 40% *L'utilisation des ressources renouvelables (solaire et éolienne) 	<ul style="list-style-type: none"> * Formation supplémentaire nécessaire pour l'équipage *Complexité du système * durabilité face aux conditions environnementales inattendues *Les zones sur les navires pour installer le PV sont limitées *L'utilisation de systèmes de stockage d'énergie est nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> [41] [44] [60] [65]

Tableau 10. Avantages et limites des solutions électriques.

Technologies	Avantages	Limites	Référence
Peak Shaving	<ul style="list-style-type: none"> *Économies en carburant de 15% *Réduction approximative des émissions de 25 à 30% *Stockage de l'énergie au passage des pics de consommation *Technologie mature et certifiée pour les applications en transport maritime 	<ul style="list-style-type: none"> *L'utilisation de systèmes de stockage d'énergie est nécessaire *Formation supplémentaire nécessaire pour l'équipage 	[48] [45]
Solutions électriques			
Genset-Shyncro	<ul style="list-style-type: none"> * Économies de carburant jusqu'à 15% *Possibilité de maintenir la tension et la fréquence constantes à la sortie du générateur en contrôlant uniquement la vitesse du stator 	<ul style="list-style-type: none"> * N'a jamais été testé dans le transport maritime *Un entretien supplémentaire *Sensibilité à la vibration et au balancement * Le taux de distorsion harmonique est plus élevé par rapport à un groupe électrogène standard 	<ul style="list-style-type: none"> [21] [51] [66]

Tableau 11. Avantages et limites des technologies de l'architecture navale.

Technologies	Avantages	Limites	Référence	
Technologie de l'architecture navale	Nageoires de baleines	*économie de 20 % à 30 % de consommation en carburant *rétractable si les conditions de houle ne sont pas optimales *installer à l'arrière du navire	*N'a jamais été testé dans le transport maritime (absence de certification)	[52]
	Système lubrification à l'air	*réduire jusqu'à 10 à 15 % les émissions de CO2 ainsi que d'importantes économies de carburant	*ne peut être utilisé que pour certains types de navires à fond plat *augmente le coût de construction du navire *les bulles d'air affectent la tenue de route et la stabilité du navire en mer	[53] [54]
	Modification d'hélice	*économie jusqu'à 2,5 % de carburant	*N'a pas été testé sur de grands navires	[55]
	Modification de l'arc bulbeux	*réduire jusqu'à 23 % les émissions de CO2 ainsi que la consommation du carburant *augmentant la vitesse, l'autonomie, le rendement énergétique et la stabilité du navire	*n'est pas écoénergétique lorsque le navire navigue à des vitesses réduites	[56] [67] [54]

Tableau 12. Avantages et limites de la réduction de la vitesse de croisière.

Technologies	Avantages	Limites	Référence
Slow steaming	<ul style="list-style-type: none"> *Réduction de la consommation de carburant *Réduction de la consommation annuelle d'huile dans les cylindres *Réduire les émissions de CO₂, NO_x et SO_x 	<ul style="list-style-type: none"> *durée de voyage plus longue *Heures de travail des auxiliaires plus élevées par voyage ainsi que la consommation du carburant *Maintenance supplémentaire en raison du fonctionnement du moteur à faible charge *Inspections plus fréquentes 	[58] [57]

2.4 CONCLUSION

Ce chapitre porte sur les technologies optimisant l'efficacité énergétique, opérationnelle et écologique dans les navires. Le but est alors de se familiariser avec les nouveaux concepts qui sont tous à différents stades de développement et de déploiement et qui permet d'une part la réduction de la consommation de carburant des navires et d'autre part, de respecter les réglementations établit par (OMI) pour l'atteinte des objectifs en matière de lutte contre la pollution atmosphérique et de réduction des émissions de GES.

L'annexe VI de l'OMI de MARPOL a limité les émissions de gaz d'échappement de SO_x provenant de la combustion de carburants contenant du soufre de 4,5% de la masse de SO₂ /masse de carburant en 2005, a diminué à 3,5% en 2012, et considérablement réduite à un maximum de 0,5% après 2020. De plus, une limite plus stricte de 0,1% est spécifiée dans des zones spécifiques de contrôle des émissions de SO_x (ECA), qui comprennent la mer du Nord, la mer Baltique et toutes les mers situées à moins de 200 milles marins du littoral nord-américain et, à l'avenir, le nombre de zones réglementées devrait augmenter. Par conséquent, il existe un besoin urgent de technologies efficaces de réduction des émissions de SO_x qui peuvent aider les exploitants de navires à se conformer aux réglementations strictes.

Les émissions de SO_x peuvent être réduites en passant à un carburant à faible teneur en soufre ou en appliquant un post-traitement des gaz d'échappement par absorption, telle que les systèmes d'épuration (EGCS) qui réduisent les émissions de soufre aussi efficacement qu'avec le carburant à faible teneur en soufre. Une comparaison technologique est faite dans [68] montre que les investissements dans l'installation d'épurateurs sont efficaces quel que soit le prix du carburant, ce qui encourage les armateurs à choisir majoritairement l'option EGCS.

CHAPITRE 3

LES ÉPURATEURS À GAZ POUR UNE ÉMISSION QUASI-NULLE

3.1 INTRODUCTION

Les gaz d'échappement des navires sont une source importante de pollution atmosphérique, tant pour les polluants classiques que pour les gaz à effet de serre qui ont un impact grave sur la santé humaine et les écosystèmes marins[69]. La conception de technologies respectueuses de l'environnement pour le contrôle des émissions telles que celles décrites au chapitre 2 sont des méthodes recommandées pour la future économie marine afin de répondre aux exigences de durabilité.

Au cours de la dernière décennie, l'application de la technologie d'absorbeurs pour le nettoyage des gaz d'échappement a considérablement augmenté dans le transport maritime et ils sont généralement appelés épurateurs. Les épurateurs ou les laveurs des gaz d'échappement (EGCS) sont utilisés pour éliminer les particules et les composants nocifs, tels que les SO_x et les CO₂ générés à la suite des processus de combustion. Leur principal avantage est de permettre aux navires marchands de continuer à utiliser le HFO qui est très riche en soufre et le moins cher sur le marché tout en répondant aux exigences adoptées par OMI.

Dans ce chapitre, l'attention sera donnée pour les épurateurs à gaz en raison de leurs performances en termes d'absorption et de réduction des GES. Dans une première partie, les techniques d'absorption y compris les modèles et les types d'épurateurs seront abordées. Dans une deuxième partie, une comparaison entre les différentes technologies étudiées et le cout de l'installation à bord seront présentés.

3.2 LES TECHNIQUES D'ABSORPTION ET LE TRAITEMENT DES GAZ DANGEREUX

L'absorption ou dissolution c'est le transfert de constituants de la phase gazeuse à la phase liquide. Il s'agit, soit de dissoudre un gaz (air, oxygène, ozone, chlore, CO₂...) dans l'eau pour traiter celle-ci s'appelle épuration biologique, déferrisation, oxydation, désinfection, correction de pH..., soit de dissoudre un gaz polluant (H₂S, mercaptans, SO₂, NO_x, NH₃ et produits organiques volatils, HCl...) dans une solution liquide afin d'épurer la phase gazeuse (lavage de gaz) [70].

L'absorption est basée sur l'équilibre physique qui existe lorsqu'une phase gazeuse contenant une substance donnée est mise en contact avec une phase liquide dans laquelle cette substance est soluble. Afin d'augmenter l'efficacité de l'opération, il sera possible d'agir sur les paramètres qui régissent la diffusion tels que :

- **La température** le processus d'absorption s'accompagnant souvent d'une hausse de température et contrairement aux liquides ou aux solides, la solubilité des gaz diminue lorsque la température augmente. Il est donc nécessaire de réduire ou d'éliminer cet effet pour que le liquide puisse conserver sa capacité d'absorption maximale.
- **La surface de contact gaz/liquide** l'augmentation de la surface de contact entre gaz et liquide va entraîner une dissolution plus rapide du composé en phase gazeuse vers la phase liquide.
- **Le temps de contact** Le temps de contact doit être suffisant pour que les contaminants passent de la phase gazeuse à la phase liquide.
- **La réaction chimique** lors du lavage avec une réaction chimique, plus la réaction chimique sera rapide, plus le transfert sera accéléré [71].

3.2.1 Liquide de lavage

Le principal critère de sélection est la solubilité des polluants dans le liquide. L'eau est le liquide de lavage le plus couramment utilisé. Le liquide d'absorption doit répondre à plusieurs nombres de caractéristiques. Il doit avoir une faible pression de vapeur à la température de travail pour limiter les pertes par évaporation. Il doit également avoir une viscosité la plus faible possible et être de préférence non toxique, ininflammable et peu coûteux. Enfin, il doit avoir un pouvoir mouillant élevé pour bien se disperser sur les garnissages des colonnes de lavage.

Les principaux liquides de lavage aqueux sont : eau, acides (H_2SO_4 , HCl), bases ($NaOH$, KOH), cosolvant (glycols...), réactifs oxydants (peroxyde d'hydrogène, acide hypochloreux...) et les réactifs réducteurs (bisulfite de sodium...) [71].

3.2.2 Les types de contacteurs gaz-liquide

L'application du principe d'absorption repose sur le contact entre la phase gazeuse et la phase liquide dans un contacteur gaz-liquide. Ce contact sera d'autant plus efficace que la surface d'échange sera importante [71].

Il existe plusieurs types de contacteurs gaz-liquide. Les absorbeurs les plus fréquemment utilisés sont les colonnes à garnissage fonctionnant à contre-courant, les colonnes à plateaux, les colonnes à pulvérisation et les laveurs Venturi.

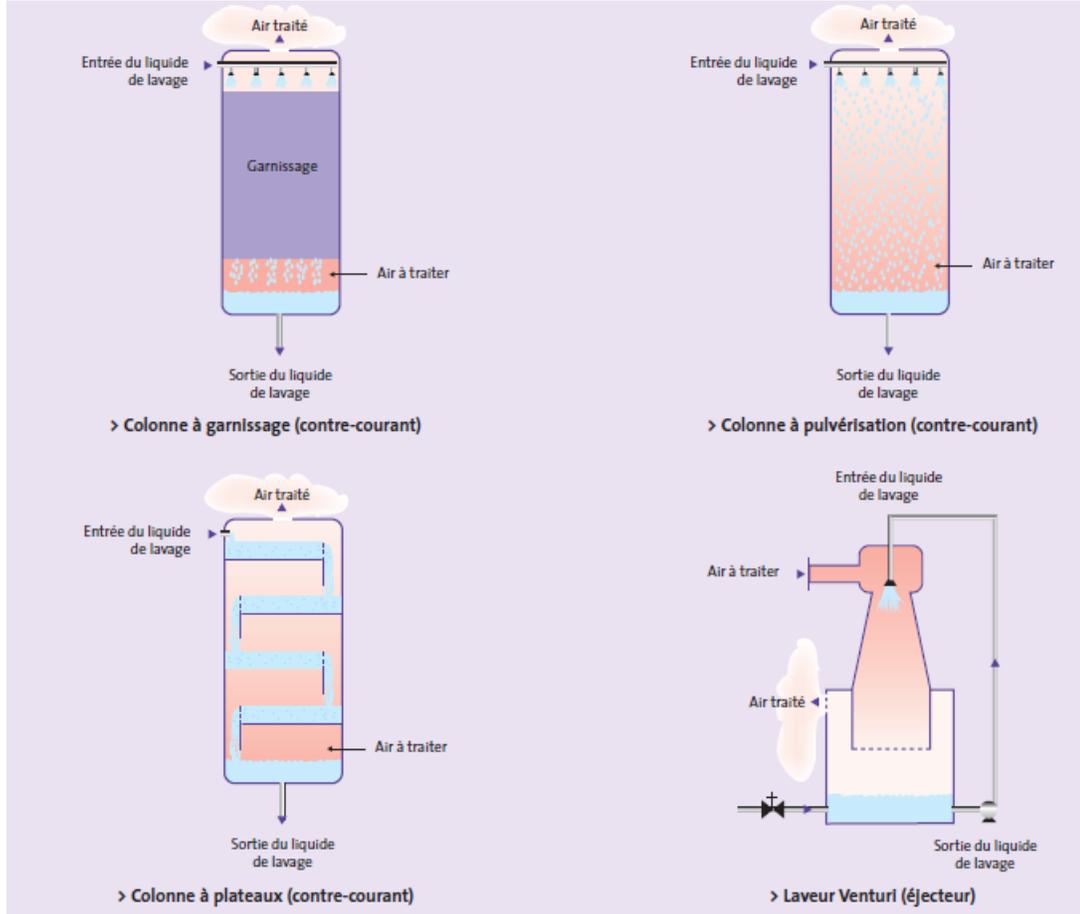


Figure 42. Les différents types de contacteurs gaz-liquide [71].

3.2.2.1 Colonne à garnissage

La colonne à garnissage est une colonne qui est remplie d'éléments permettant d'augmenter la surface de contact entre la phase gazeuse et la phase liquide. Le gaz et le liquide circulent en général à contre-courant. Le liquide s'écoule à travers le garnissage sous l'action de la gravité, formant un film de grande surface. Le débit de liquide doit être suffisant pour assurer le mouillage uniforme du garnissage, tout en évitant le colmatage de la colonne (saturation en liquide) [71].

3.2.2.2 Colonne à plateaux

Une colonne à plateaux est un équipement chimique utilisé pour réaliser des opérations unitaires où il est nécessaire de transférer de la masse entre une phase liquide et une phase gazeuse. Autrement dit, il s'agit d'un contacteur gaz-liquide particulier. La particularité de ce contacteur gaz-liquide est que le gaz entre en contact avec le liquide par différentes étapes ; chaque étage est délimité par deux plateaux (sauf l'étage en haut de colonne et l'étage en bas de colonne).

3.2.2.3 Colonnes à pulvérisation

Le liquide est pulvérisé, sous forme de gouttelettes, en haut d'une colonne vide dans laquelle le gaz à traiter circule à contre-courant. En fonction de leur taille, les gouttelettes vont soit descendre en bas de la colonne, soit être emportées par le flux gazeux. Dans ce dernier cas, elles devront être récupérées par un séparateur de gouttelettes. Le système fonctionne en mode mixte contre-courant et co-courant.

3.2.2.4 Laveur Venturi

Un épurateur Venturi se compose principalement d'un poumon centrifuge (qui sépare les fractions solides et liquides) et d'une colonne Venturi. Le Venturi est constitué d'un cylindre dont le diamètre diminue dans la partie centrale. La raison de cette variation de diamètre se trouve dans le principe de Venturi "la pression d'un écoulement fluide augmente avec la diminution de la vitesse" [72].

Par conséquent, Il se produit une variation de pression à l'intérieur de la colonne qui permet la chute des particules solides polluantes transportées dans les fumées. Au sommet de la colonne Venturi se trouvent des buses qui vaporisent de l'eau afin de transmettre une orientation aux fumées qui entrent, l'eau recueille ensuite les particules précipitées dans la colonne et arrive dans le réservoir placé sous le poumon centrifuge.

3.3 LES EPURATEURS A GAZ D'ECHAPPEMENT

Les laveurs sont classés en deux catégories : les laveurs secs, qui utilisent de la chaux sèche et d'autres minéraux à base de calcium pour contrôler le pH, et les laveurs humides qui utilisent une solution alcaline. Les épurateurs humides sont en outre classés en épurateurs à boucle fermée qui utilisent de l'eau douce avec l'ajout d'un produit chimique alcalin, à boucle ouverte qui utilise de l'eau de mer et à des systèmes hybrides qui peuvent fonctionner en boucle ouverte et en boucle fermée.

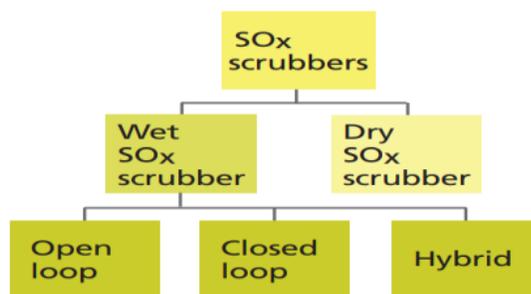


Figure 43. La hiérarchie des systèmes d'épuration marine [73].

3.3.1 Les épurateurs humides

Le lavage humide du SO_x est une technologie simple et efficace qui est utilisée dans des applications industrielles depuis de nombreuses années. Les laveurs de SO_x par voie humide comprennent en général les composants suivants :

- Une unité d'épuration est une cuve ou une série d'éléments étroitement couplés, qui mettent l'eau en contact intime avec les gaz d'échappement d'une ou de plusieurs unités de combustion. L'unité est généralement montée autour de l'entonnoir du navire.
- Une station de traitement pour le conditionnement des eaux de lavage avant rejet à la mer.
- Une installation de traitement des résidus.
- Un système de contrôle de l'épurateur et de surveillance des émissions.

Ces composants seront interconnectés par des canalisations avec diverses pompes, refroidisseurs et réservoirs, en fonction de la configuration du système d'épuration[74].

3.3.1.1 Les épurateurs humides en boucle ouverte

Dans un système d'épurateur humide en boucle ouverte, l'eau de mer est pompée à travers l'épurateur, purifiée, puis rejetée dans la mer sans recirculation, les critères de rejet fixés par les directives de l'OMI sont respectés grâce au débit élevé de l'eau qui traverse l'épurateur. Le débit d'eau de lavage dans les systèmes en boucle ouverte est d'environ $45\text{m}^3/\text{MWh}$.

Un taux d'élimination des SO_x proche de 98% avec une alcalinité complète de l'eau de mer, ce qui signifie que les émissions d'un carburant à 3,50 % de soufre seront équivalentes à celles d'un carburant à 0,10 % de soufre après épuration. La température de l'eau de mer doit également être prise en compte, car la solubilité du SO_2 diminue à des températures d'eau plus élevées.

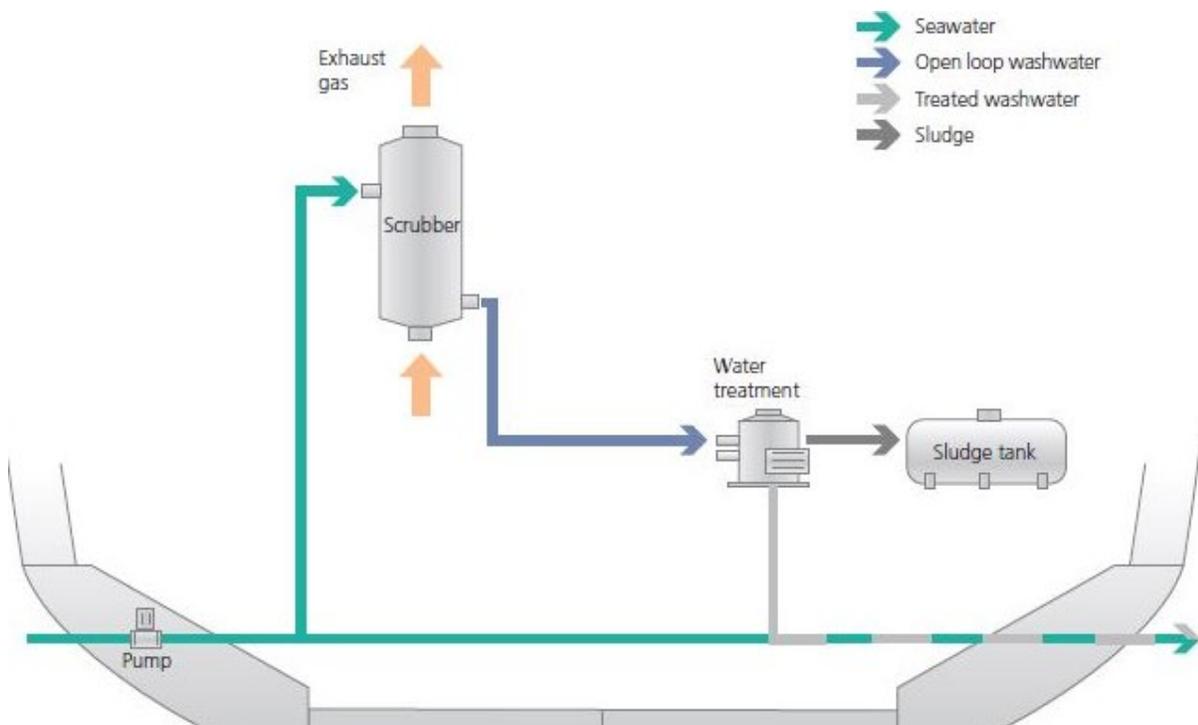


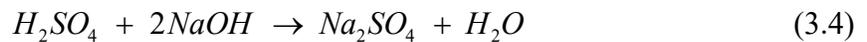
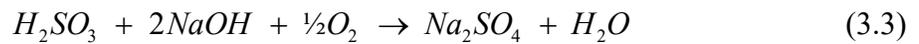
Figure 44. Système d'épuration humide en boucle ouverte [74].

Les oxydes de soufre générés lors de la combustion due au combustible sulfureux sont dissous et éliminés par l'eau de l'épurateur en boucle ouverte à la suite d'une simple réaction chimique.



3.3.1.2 Les épurateurs humides en boucle fermée

Tous les épurateurs marins en boucle fermée utilisent de l'eau douce traitée à l'hydroxyde de sodium (NaOH) comme milieu de lavage. Cela entraîne l'élimination des SO_x du flux de gaz d'échappement sous forme de sulfate de sodium à la suite des réactions chimiques suivantes :



Le contrôle du pH par dosage de l'hydroxyde de sodium permet la circulation de l'eau de lavage et donc la consommation d'énergie d'environ la moitié de celle des systèmes en boucle ouverte à environ 20 m³/MWh et entre 0,5 à 1 % de la puissance du moteur à épurer [74]. Les systèmes en boucle fermée peuvent également être exploités lorsque le navire navigue dans des eaux fermées où l'alcalinité serait trop faible pour un fonctionnement en boucle ouverte.

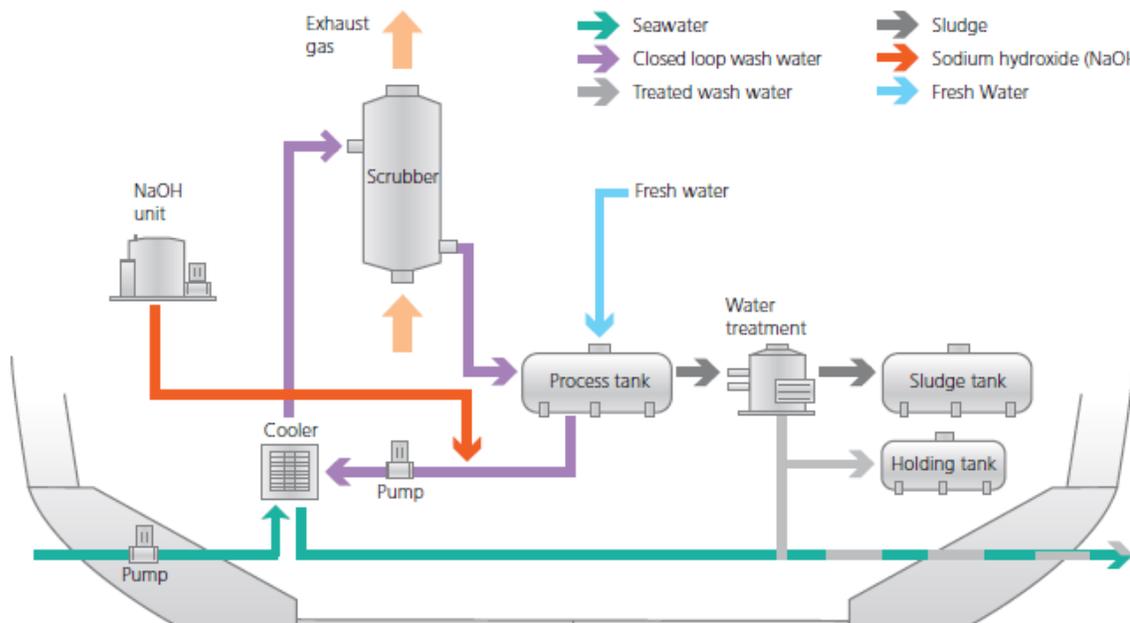


Figure 45. Système d'épuration humide en boucle fermé [74].

Les systèmes en circuit fermé déversent de petites quantités d'eau de lavage traitée pour réduire la concentration de sulfate de sodium, ces rejets sont estimés par les fabricants d'épurateurs d'environ $0,1 \text{ m}^3/\text{MWh}$.

Le taux de reconstitution de l'eau douce dans le système ne dépend pas seulement du rejet en mer, mais aussi des pertes dans l'atmosphère. Le taux d'évaporation est influencé par des températures des gaz d'échappement et de l'eau de lavage, qui à leur tour sont régies par des facteurs tels que la charge du moteur et la température de l'eau de mer qui alimente les refroidisseurs du système. Une partie de la vapeur d'eau incorporée dans l'échappement peut être captée après l'épurateur et réutilisée pour réduire la consommation d'eau douce.

Avec l'ajout d'un réservoir de rétention d'eau de lavage, les systèmes en boucle fermée peuvent fonctionner avec zéro décharge pendant une période de temps (la durée exacte dépend de la taille du réservoir). Cette flexibilité est idéalement adaptée à l'exploitation dans des zones sensibles aux rejets d'eaux de lavage, telles que les ports et les estuaires.

Les systèmes en circuit fermé consomment généralement 50 % de l'hydroxyde de sodium dans une solution aqueuse avec un taux de dosage est d'environ 15 litres/MWh, ce qui signifie que les émissions de carburant à 3,50 % de soufre seront égales aux émissions de carburant à 0,10% [74].

Le choix des matériaux pour la tuyauterie, les raccords et les réservoirs est également une considération importante, car l'hydroxyde de sodium est corrosif pour l'aluminium, le laiton, le bronze, l'étain, le zinc (y compris les revêtements galvanisés) et le verre. L'acier doux peut subir des fissures dues à la corrosion à plus de 50°C et l'acier inoxydable est résistant à des températures plus élevées.

Les épurateurs en boucle fermée nécessitent plus d'espace que les systèmes en circuit ouvert. Le système de circulation des eaux de lavage nécessite un réservoir de traitement et un réservoir de stockage pour le mode zéro rejet. L'hydroxyde de sodium nécessite aussi un réservoir de stockage avec un équipement de dosage. De plus, avant d'être rejeté en mer, un système de nettoyage des eaux de lavage est indispensable (Figure 46).

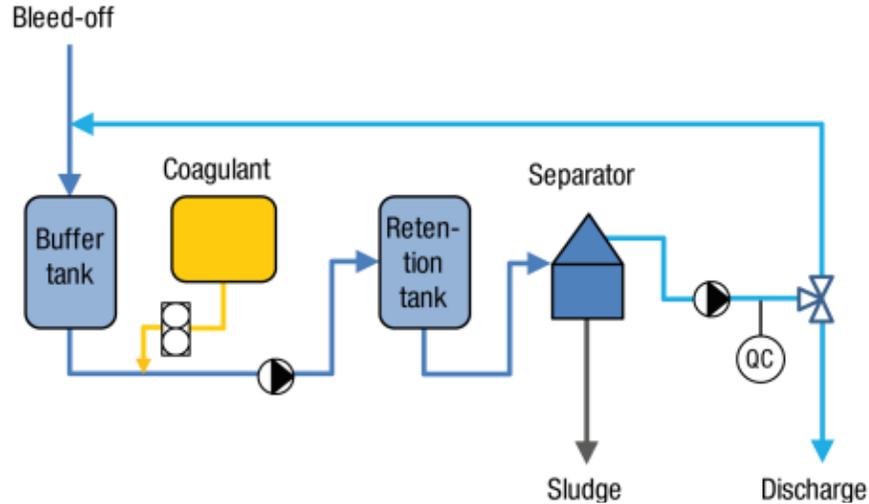


Figure 46. Système de nettoyage des eaux de lavage [75].

L'eau de purge du système est collectée dans un réservoir tampon. Après l'ajout d'un coagulant, l'eau est dirigée vers un réservoir de rétention et acheminée vers le séparateur à grande vitesse pour le processus de nettoyage final. Un système de surveillance (QC) contrôle la qualité de l'eau en ce qui concerne la valeur du pH, la turbidité et la concentration en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [75].

3.3.1.3 Les systèmes hybrides

Le système hybride combine à la fois un système en boucle ouverte et un système en boucle fermée et chacun de leurs modes de fonctionnement. Du fait de cette combinaison, le système hybride est plus complexe, mais il offre le plus haut degré de flexibilité. Le mode en boucle ouverte est généralement utilisé dans les eaux libres où l'alcalinité est suffisamment élevée pour une épuration efficace. Le système en boucle fermée est utilisé dans certaines eaux fermées, les ports et les estuaires ou lorsque l'alcalinité de l'eau de mer est faible. Cette combinaison permet d'optimiser la consommation de produits chimiques et garantit que les rejets n'affectent pas les zones sensibles où les échanges d'eau sont faibles.

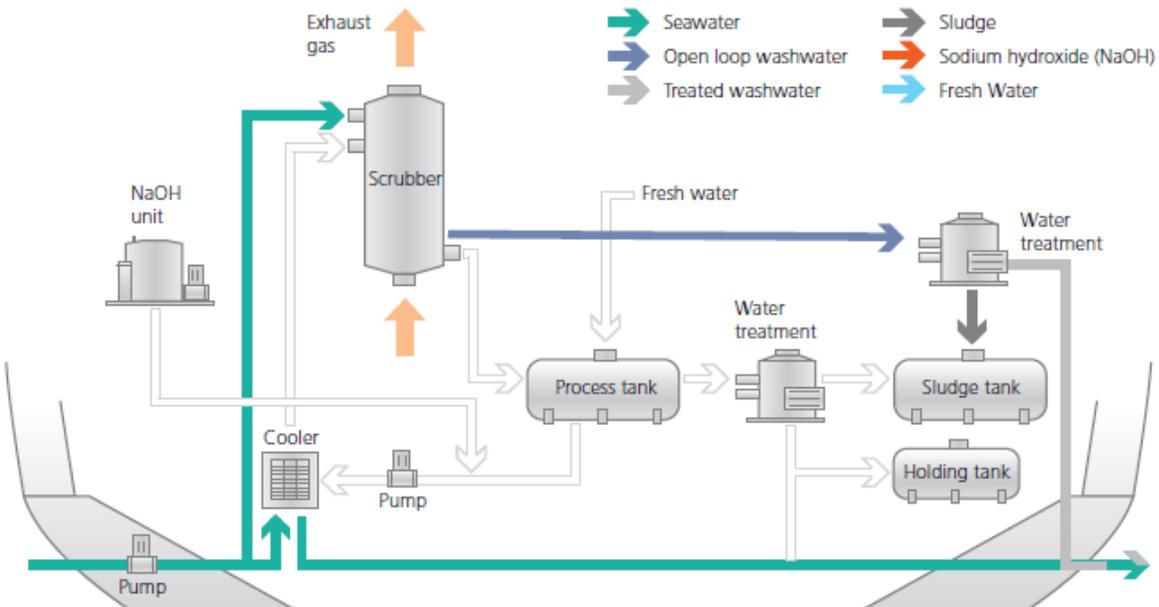


Figure 47. Système d'épuration hybride [74].

3.3.2 Les épurateurs secs

Les épurateurs secs sont largement utilisés dans l'industrie terrestre depuis les années 1970. Ils consistent à injecter un sorbant sec dans un flux de gaz chaud sortant d'un procédé pour capturer les gaz acides, les métaux lourds et les composés organiques volatils (COV) qu'il contient. Les principaux composants d'un épurateur sec sont :

- Une unité de lavage permet de mettre en contact les gaz d'échappement d'une ou plusieurs unités de combustion avec des granulés d'hydroxyde de calcium. Contrairement à la majorité d'épurateurs par voie humide, l'entrée des gaz d'échappement est perpendiculaire au flux vertical descendant du milieu de lavage.
- Un silo pour le stockage des granulés qui facilite le stockage et permet de positionner les granulés en haut et en bas de l'absorbeur.
- Un système de convoyeur pneumatique permet de transporter les granulés depuis et vers les installations de stockage à bord.
- Système de contrôle et de surveillance des émissions permet l'élimination des granulés usagés et de toute matière particulaire liée aux gaz d'échappement et pour assurer le bon écoulement des granulés à travers l'absorbeur.

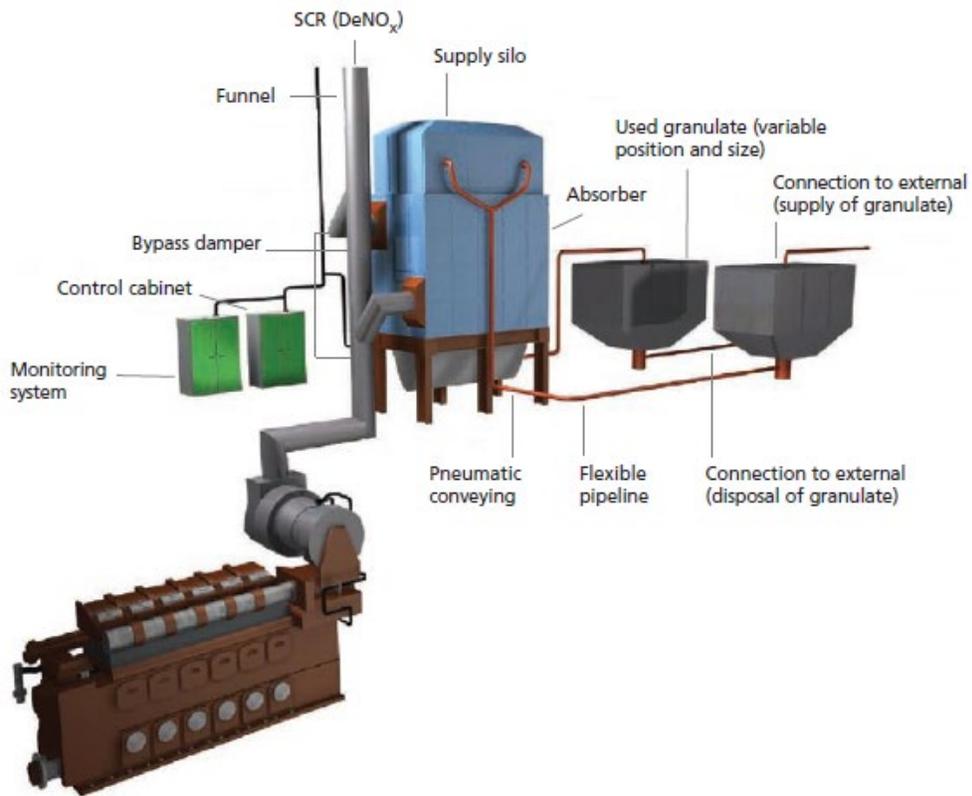


Figure 48. Système d'épuration sec [74].

Pour réduire les émissions de SO_x à celles équivalentes au carburant avec une teneur en soufre de 0,10 %, un moteur marin typique utilisant du carburant résiduel avec une teneur en soufre de 2,70 % consommerait des granules d'hydroxyde de calcium à un taux de 40 kg/MWh et sur la base d'une densité de 800 kg /m³, le volume de granulat requis serait d'environ 0,05 m³/MWh (c'est-à-dire qu'un moteur de 20 MW nécessiterait environ 19 tonnes de granulat par jour avec un volume de 24 m³) [74].

Contrairement aux épurateurs humides, les épurateurs secs n'ont pas besoin de systèmes de traitement des eaux de lavage et de leurs tuyauteries. Cela simplifie l'installation et le fonctionnement, et rend les laveurs secs parfaitement adaptés aux zones où il y a une sensibilité accrue concernant les rejets en mer. Cependant, comme pour le fonctionnement en boucle fermée d'un système humide, il existe un besoin de stockage et de manipulation des consommables. Les granulés usagés doivent également être stockés avant élimination à terre.

3.3.3 Comparaison entre les différentes technologies des épurateurs

Tableau 13. Comparaison entre les différentes catégories des scrubbers [74].

	Boucle ouverte	Boucle fermée	Système hybride	Épurateur sec
Fonctionnement en eau douce	Non	Oui	Uniquement en mode boucle fermée	Oui
Exploitation sans rejet en mer	Non	Pour une durée limitée en fonction de la taille du réservoir d'eau usée	Pour une durée limitée en fonction de la taille du réservoir d'eau usée	Oui
Poids, valeurs typiques pour un épurateur de 20MW	30-55 tonnes	30-55 tonnes	30-55 tonnes	200 tonnes
Consommation d'énergie	1-2%	0,5-1%	0,5-2%	0,15-0,20%
Produit chimique	Pas de produit chimique	Solution d'hydroxyde de sodium	Solution d'hydroxyde de sodium Uniquement en mode boucle fermée	Granulés d'hydroxyde de calcium
Compatibilité avec le système SCR	Non	Non	Non	Oui
Compatibilité avec le système EGR	Oui	Oui	Oui	Oui

3.3.4 Installation d'un système hybride sur un navire

La figure 45 illustre la disposition d'un système d'épuration hybride qui peut fonctionner en boucle ouverte et en boucle fermée dans la salle des machines.

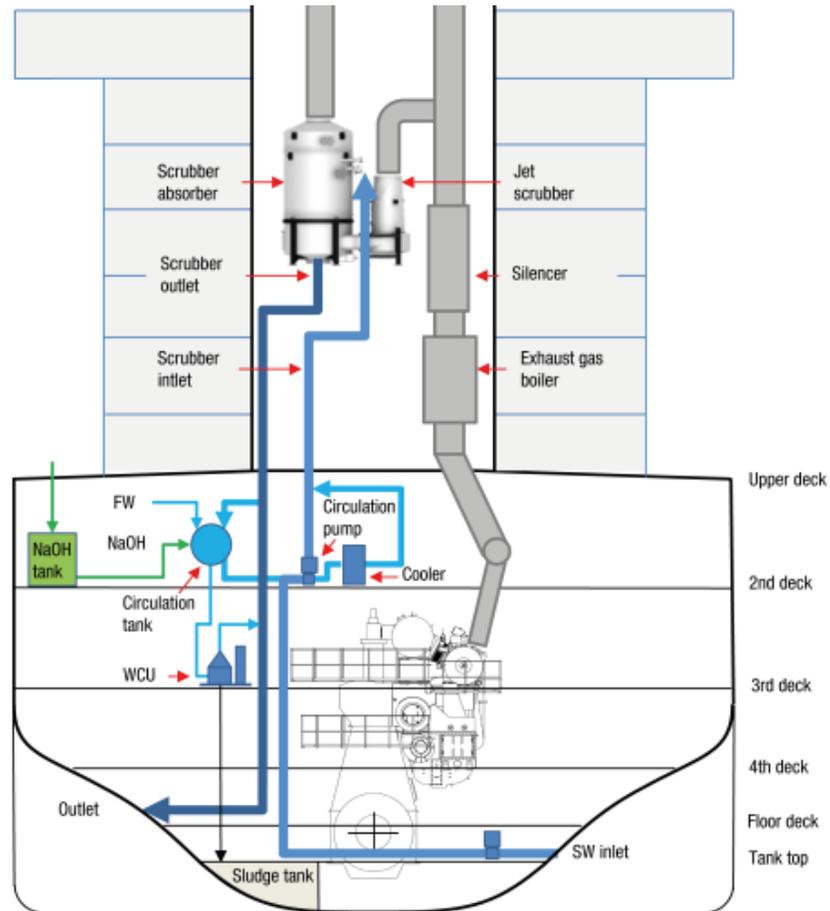


Figure 49. Schéma d'un système de lavage hybride [75].

Les unités d'épuration des gaz d'échappement sont normalement placées en haut du navire, autour de la zone de la cheminée, où l'espace disponible et l'accès sont plus faciles.

Le système hybride combine les faibles coûts de fonctionnement de la boucle ouverte avec la flexibilité offerte par le système en boucle fermée. Le système hybride offre un avantage supplémentaire, car le mode en boucle ouverte peut être utilisé même en cas de faible alcalinité de l'eau de mer avec l'ajout de NaOH sans avoir besoin de passer en mode boucle fermée.

3.3.4.1 Coûts de l'installation

Le calcul des coûts de l'installation d'un tel système nécessite de comprendre divers paramètres, tels que les coûts de fabrication des différentes composantes, les frais de matériel et les coûts fixes. Les travaux dans l'article [22], ont évalué le coût des technologies de réduction des émissions utilisant le laveur d'eau de mer sur des moteurs de propulsion à vitesse moyenne et basse, en tenant compte des charges de l'épurateur. Ceci comprend : 1) le réservoir de boues en acier laminé à froid de 1 mm d'épaisseur avec un taux d'accumulation de boues de 0,25 g/kWh et une densité de boues de 1300 kg/m³, 2) la pompe d'alimentation, 3) une pompe d'évacuation, 4) une pompe de recirculation, 5) un moniteur de SO₂, 6) un séparateur d'huile et d'eau, 7) le système d'épurateur et, 8) le système de contrôle.

Tableau 14. Coût en (USD) des technologies de réduction utilisant un laveur d'eau de mer [22].

Speed	Medium	Medium	Medium	Low	Low	Low
Engine Power (kW)	4500	9500	18,000	8500	15,000	48,000
Component Cost						
Supply Pump	\$9500	\$14,000	\$19,000	\$14,000	\$23,500	\$37,500
Sludge Tank	\$350	\$481	\$641	\$637	\$818	\$1256
Piping	\$4700	\$5600	\$6600	\$5600	\$7500	\$9500
Waste Pump	\$9500	\$11,300	\$13,000	\$11,300	\$13,000	\$15,000
Recirculating Pump	\$9500	\$11,300	\$13,000	\$11,300	\$13,000	\$15,000
Scrubber	\$215,000	\$355,000	\$550,000	\$340,000	\$500,000	\$1,125,000
Separator	\$7000	\$8000	\$9000	\$8000	\$9000	\$10,000
SO2 monitor	\$9500	\$9500	\$9500	\$9500	\$9500	\$9500
Control System	\$28,000	\$28,000	\$28,000	\$28,000	\$28,000	\$28,000
Total Component Cost	\$293,050	\$443,181	\$648,741	\$428,337	\$604,318	\$1,250,756
Assembly Labor (hr)	600	800	1000	1000	1500	2000
Cost (\$23.85/hr)	\$14,308	\$19,077	\$23,846	\$23,846	35,769	\$47,692
Overhead@40%	\$5723	\$7631	\$9538	\$9538	\$14,308	\$19,077
Total Assembly Cost	\$20,031	\$26,708	\$33,385	\$33,385	\$50,077	\$66,769
Total Variable Cost	\$313,081	\$469,888	\$682,126	\$461,722	\$654,395	\$1,317,525
Markup@29%	\$90,794	\$136,268	\$197,817	\$133,899	\$189,774	\$382,082
Total Hardware	\$403,875	\$606,156	\$879,943	\$595,621	\$844,169	\$1,699,608
Fixed Cost/Engine	\$17,889	\$17,889	\$17,889	\$17,889	\$17,889	\$17,889
Total Costs	\$421,763	\$624,045	\$897,831	\$613,510	\$862,058	\$1,717,497
Cost per kW	\$93.7	\$65.7	\$49.9	\$72.2	\$57.5	\$35.8

3.3.4.2 Choix de la solution optimal

En 2019, dans une commande de dix porte-conteneurs de 15 000 EVP (l'équivalent vingt pieds), la compagnie maritime française CMA CGM a choisi d'équiper cinq navires de systèmes de propulsion GNL bicarburant et les cinq navires restants de laveurs de gaz d'échappement marins. Fearnley Securities (un fournisseur leader, indépendant et mondial de services de courtage, de recherche, financiers et de conseil aux investisseurs et aux compagnies maritimes du monde entier) a évalué les prix de construction à 130 millions de dollars pour les navires au GNL tandis que 110 millions de dollars pour le système d'épuration, ce qui indique un avantage de 20 millions de dollars en dépenses d'investissement pour l'installation de systèmes de nettoyage des gaz d'échappement (EGCS ou épurateurs) par rapport à la propulsion au GNL, de plus la même compagnie Fearnley a confirmé que les épurateurs d'échappement sont l'alternative la moins chère et la plus efficace.

Une autre étude dans le rapport [75] a montré que l'utilisation d'un carburant à haute teneur en soufre avec un système d'épuration des gaz d'échappement est moins chère que l'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre sans épurateur.

Tableau 15. Coût annuel en USD avec un combustible à haute teneur en soufre et un épurateur de SO_x [75].

SO _x scrubber	Consommation	Prix	Coût total Million \$/an
Fioul 3.0% S	18,360 tonnes/an	580 \$/tonne	10.65
Énergie électrique, totale	642 MWh/an	220 \$/MW	0.14
NaOH	186 m ³ /an	306 \$/m ³	0.06
Boue	238 m ³ /an	0 \$/m ³	0.0
Eau douce	670 m ³ /an	0 \$/m ³	0.0
Total	144	289	10.85

Tableau 16. Coût annuel en USD en utilisant un carburant à faible teneur en soufre sans épuration [75].

	Consommation tonne/an	Prix \$/tonne	Cout total Million \$/an
ECA Fuel, 0.1% S	6,101	865	5.28
Non-ECA Mazout 0.5% S	12,203	714	8.71
Total	186 m ³ /an	306 \$/m ³	13.99

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE CAS TECHNOLOGIE ALFA LAVAL

Le but de ce chapitre est d'évaluer l'impact d'un laveur a gaz pour la réduction des SOx et la capture du CO2 suivi d'une présentation de la technologie SCR pour l'élimination des NOx. De plus, une application combinée entre ces deux solutions sera abordée, pour atteindre l'objectif de quasi zéro émission. Les simulations théoriques ont été effectuées lors d'un trajet entre la Tunisie et la Turquie (du port de Rades Tunisie vers le port d'Istanbul en Turquie) sur un navire propulsé par un moteur diesel Wärtsilä 8L26 qui fonctionne avec un fioul de catégorie ISO-F-DMB basé sur la norme ISO 8217 :2017 (E).

4.1 PARAMETRES ET DONNEES

4.1.1 Le trajet

Une voie maritime est un itinéraire régulièrement suivi par les navires effectuant des transports maritimes à longue distance. Les routes maritimes ne sont pas matérialisées comme les routes sur terre, mais sont généralement tracées à différentes échelles. Leur tracé émerge et évolue pour répondre à diverses contraintes : météorologie, géographie côtière, relief marin, infrastructures portuaires, sécurité, facteurs politiques, ou encore régime des points de passage. Avec le développement de la technologie maritime et de la cartographie, la route devient de plus en plus droite à mesure qu'on s'éloigne de la côte [76].

Le calcul de trajet entre le port de Rades et le port d'Istanbul sur la mer Méditerranée est effectuée à travers un calculateur de distance en mer sur le site web Shiptraffic.net en utilisant les données suivantes :

- Port de départ : port de Rades Tunisie
- Destination : port d'Istanbul Turquie
- Vitesse du navire : 12 knots (Nœud)
- Poids de marchandise : 6000 tonnes



Figure 50. Route maritime entre la Tunisie et la Turquie sur la carte

La distance parcourue par le navire a une vitesse de 12 knots entre ces deux ports est de 1320 milles nautiques environ 2445 km ce qui nécessite une durée de navigation de 4 jours et 6 heures.

find start port:	Port of Rades	TIME AT SEA
find destination port:	Port of Istanbul	DISTANCE: 1320 nm SPEED: 12 knots DAYS AT SEA: 4.6

Figure 51. Calculateur utilisé

4.1.2 Épurateur hybride Alfa Laval

La disposition d'un laveur de SO_x Alfa Laval est illustrée à la Figure 52 l'épurateur est composé de deux parties, un laveur à jet et un absorbeur. Le laveur à jet est un pré-laveur qui démarre le processus d'épuration par un jet pulvérisé dans les gaz d'échappement entrants. Placé en amont de l'absorbeur, il augmente l'efficacité de l'épuration, en particulier pour les particules. À partir de l'épurateur à jet, le flux gazeux est dirigé vers l'absorbeur, où le SO_x est éliminé au niveau requis.

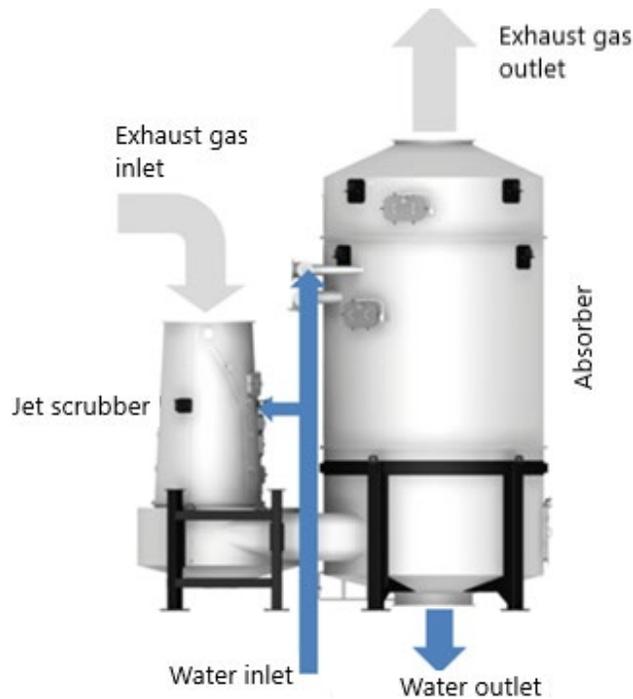


Figure 52. Scrubber alfa Laval[75].

4.1.2.1 Efficacité de l'élimination des SO_x

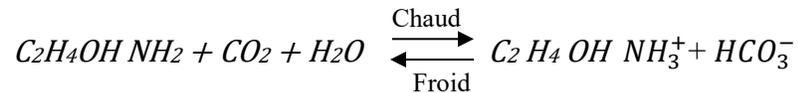
Le système d'épuration des SO_x est une méthode équivalente au respect des exigences en matière de combustible à faible teneur en soufre. Par conséquent, l'efficacité du système doit être suffisante pour atteindre un niveau d'émission de SO_x. L'efficacité dépend de la teneur en soufre du combustible par rapport à la limite de soufre. Les efficacités requises sont indiquées dans le tableau 12 pour différentes valeurs de teneur en soufre du combustible.

Tableau 17. Les efficacités des épurateurs selon les différentes valeurs de teneur en soufre du combustible[75].

Pourcentage de soufre S%	Efficacité du scrubber en ECA, % Limite de soufre:0,1%	Efficacité du scrubber en non- ECA, % Limite de soufre:0,5%
3.5	97.1	85.7
3.0	96.7	83.3
3.0	96.0	80.0
3.0	95.0	75.0
1.5	93.3	66.7
1.0	90.0	50.0

4.1.2.2 Efficacité de l'élimination des CO₂

Les auteurs dans l'article [73] ont évalué la teneur en CO₂ à la sortie de l'épurateur pour différentes charges appliquées sur un générateur diesel de 250kW avec l'intervention de la solution de monoéthanolamine (MEA) d'une quantité 0.1l/min. La capture du CO₂ avec la solution MEA se produit après la réaction chimique réversible suivante [73]:



Les résultats de cette d'études sont présentés dans le tableau 18 et la figure 53, montrant que les laveurs ont une efficacité moyenne de réduction du CO₂ de 49% en utilisant la solution MEA.

Tableau 18. Évaluation et comparaison de la réduction du CO₂ à l'aide de la solution MEA[73].

Applied load (%)	Q_{Gas} (L/min.)	Without the intervention of MEA solution					With the intervention of MEA solution				
		CO ₂ (%)				Average (%)	CO ₂ (%)				Average (%)
		2 min.	4 min.	6 min.	8 min.		2 min.	4 min.	6 min.	8 min.	
30	10	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
50		0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
85		1,09	1,08	1,08	1,08	1,082	0,59	0,58	0,58	0,58	0,582

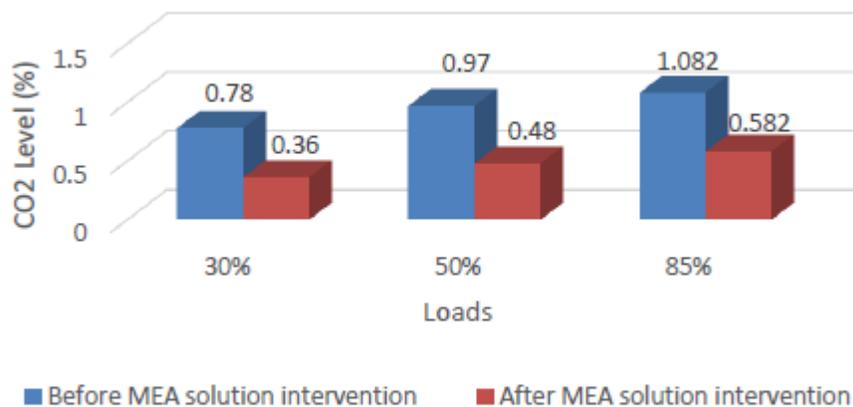


Figure 53. Influence de la solution de monoéthanolamine sur les niveaux de CO₂[73].

4.1.3 Caractéristique du fioul

La spécification du carburant est basée sur la norme ISO 8217 :2017(E) et couvre les qualités de carburant suivantes ISO-F-DMX, DMA, DFA, DMZ, DFZ, DMB et DFB. Ces qualités de carburant sont désignées sous le nom de MDF (Marine Diesel Fuel).

Tableau 19. Caractéristique des différents types du fioul.

Caractéristique	Unité	Catégorie ISO-F				Référence
		DMX	DMA/DFA	DMZ/DFZ	DMB/DFB	
Densité	kg/m ³		890	890	900	ISO 3675 ISO 12185
Soufre	%	1	1	1	1,5	ISO 8754 ISO14596, ASTM D4294

Le carburant marin utilisé dans ce présent travail est l'ISO-F-DMB avec un pourcentage de soufre 1.5% et une densité de 900 kg/m³. Le DMB est un carburant à usage général qui contient des traces de carburant résiduel et peut être riche en soufre.

4.1.4 Moteur diesel Wärtsilä 8L26

Wärtsilä est une entreprise finlandaise spécialisée dans la fabrication industrielle de générateurs électriques et de moteurs diesel marins. 8L26 est un moteur diesel fabriqué par cette entreprise et conçu pour la propulsion des navires, les spécifications du moteur sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 20. Les caractéristiques du moteur 8L26[77].

Description	Unité	Valeur
Vitesse du moteur	rpm	1000
Puissance du moteur	kW	2720
Consommation de carburant à 50%	g/kWh	207
Consommation de carburant à 70%	g/kWh	195,3
Consommation de carburant à 100%	g/kWh	194,4

4.2 CALCULS DE LA CONSOMMATION DU FIOUL

La consommation du fioul par le moteur diesel Wartsila 8L26 pour différentes charges appliquées est calculée par :

$$F_e = (F_{sh} \times \frac{42.7}{Q_n}) \times \frac{P_s}{100} \quad (4.1)$$

Ici, F_e est la Consommation de carburant pour le site du moteur exprimé en (kg/h), F_{sh} est la Consommation de carburant pour le moteur aux conditions ISO pour différentes charges en (g/kWh), Q_n est le pouvoir calorifique du combustible (la valeur calorifique du carburant DMB est généralement de 42.2 MJ/kg) et P_s est la puissance de sortie du moteur en (kW).

Tableau 21. Évaluation de la consommation de carburant.

Catégorie de carburant: ISO-F-DMB								
Charge (%)	Fsh (g/kWh)	Qn (MJ/kg)	Ps (kW)	Fe (kg/h)	Fe (g/h)	Densité (kg/m ³)	Fe (L/h)	Fe (kg/km)
100%	194,4	42,2	2720	535,03	535033,02	900	594	22,3
75%	195,3	42,2	2040	403,13	403132,52	900	448	16,8
50%	207	42,2	1360	284,85	284855,55	900	317	11,9

Le tableau 15 présente les valeurs de la consommation du carburant en kg/h, L/h et kg/km pour trois différentes charges appliquées sur le moteur 50%, 75% et 100%.

4.3 CALCULS DES EMISSIONS DE SO₂

Cette section présente une méthodologie appropriée pour estimer les émissions de SO₂ avant et après épuration des gaz d'échappement.

La quantité de soufre émise lors de ce processus et sans épuration est calculée par :

$$E_{SO_2} = F_e \times \left(\frac{C}{100}\right) \times \frac{MW}{EW} \times ophrs \quad (4.2)$$

E_{SO_2} est l'émission de SO_2 en (kg/ Le temps de trajet selon la charge appliquée 100%, 75% ou 50% supposant que le navire fonctionne en pleine puissance pour chaque charge), F_e est la quantité du fioul consommé en (kg/hr), C est la concentration de soufre dans le carburant (1.5% dans notre cas), $Ophrs$ sont les nombres d'heures de fonctionnement du moteur lors du trajet, MW et EW sont respectivement le poids moléculaire et la masse élémentaire du SO_2 dans le carburant avec $MW=64$ g/mol et $EW=32$ g/mol.

L'équation 4.3 est utilisée pour calculer la quantité de soufre émise après l'intégration de l'épurateur a gaz d'échappement alfa Laval.

$$E_{ep} = E_{SO_2} \times \left(\frac{100 - e}{100} \right) \quad (4.3)$$

Les émissions épurées sont représentées par E_{ep} , E_{SO_2} sont les émissions non contrôlées calculées dans la partie précédente et e est de 66,7 %, ce qui correspond à l'efficacité d'élimination du SO_2 de l'épurateur selon la catégorie du carburant, indiquée dans la section 4.1.2.1. Efficacité de l'élimination des SO_x , le tableau 17.

Les quantités de SO_2 émissent avant et après épuration durant tout le trajet entre la Tunisie et la Turquie avec des charges différentes sont données par les tableaux suivants.

Tableau 22. Les émissions de SO_2 avant l'intervention du scrubber.

Charge (%)	Ps (kW)	Fe (kg/h)	C (%)	MW (g/mol)	EW (g/mol)	Ophrs (h/trajet)	Eso2 (kg/ Le temps de trajet)
100%	2720	535	1,5	64	32	102	1637,1
75%	2040	403	1,5	64	32	102	1233,18
50%	1360	285	1,5	64	32	102	872,1

Tableau 23. Les émissions de SO₂ en intégrant le scrubber.

Charge (%)	Efficacité du scrubber %	Eso2 (kg)	Eso2 après épuration (kg/ Le temps de trajet)
100%	66,7	1637,1	545,12
75%	66,7	1233,2	410,66
50%	66,7	872	290,38

4.4 CALCULS DES EMISSIONS DE CO₂

Les méthodes nationales et internationales de calcul des émissions de CO₂ se basent toutes sur le même principe : convertir la consommation d'une quantité d'énergie en dioxyde de carbone ou en équivalent dioxyde de carbone par l'utilisation d'un facteur d'émission qui est spécifique à l'élément qui est consommé [78].

Les facteurs d'émission correspondant aux carburants utilisés dans le transport maritime de marchandises sont :

Tableau 24. Facteurs d'émission des carburants - transport maritime de marchandises [78].

Nature de la source d'énergie	Type détaillé de la source d'énergie	Unité de mesure de la quantité de source d'énergie	Facteur d'émission (en kg de CO ₂ par unité de mesure de la quantité de source d'énergie)		
			Phase amont	Phase de fonctionnement	Total
Fioul	Heavy fuel oil ISO 8217 Classes RME à RMK	Kilogramme	0,46	3,12	3,58
Gazole	Marine diesel oil ISO 8217 Classes DMX à DMB	Kilogramme	0,61	3,15	3,76
Gaz naturel	Gaz naturel liquéfié maritime (GNL)	Kilogramme	0,52	2,77	3,29
Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	Butane maritime	Kilogramme	0,35	2,92	3,27
	Propane maritime	Kilogramme	0,35	2,94	3,29

Selon le tableau ci-dessus, le facteur d'émission pour le carburant marin utilisé dans notre cas est de 3.76 kgCO₂/kg.

Le calcul des émissions de CO₂ dans cette partie est effectué théoriquement en utilisant la formule suivante :

$$E_{CO_2} = \tau_{con} \times d \times F_e \quad (4.4)$$

τ_{con} est le taux de consommation du carburant exprimé par (kg/km), d est la distance parcourue ou le trajet entre les deux payes en (km) et F_e est le facteur d'émission. Selon le tableau 10, $F_e = 3.76 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$.

La quantité des CO₂ après lavage pour les trois charges est calculée à travers l'équation suivante :

$$E_{ep} = E_{CO_2} \times \left(\frac{100-e}{100}\right) \quad (4.5)$$

Avec E_{ep} la quantité émise de CO₂ après lavage en (kg), E_{CO_2} les émissions non contrôlées (kg) et e est l'efficacité du laveur (49% indiqué dans la partie 4.1.2.2 efficacité de l'élimination des CO₂).

Les données utilisées ainsi que les résultats des émissions de CO₂ avant et après lavage sont affichées dans le tableau 25 et 26.

Tableau 25. Évaluation des émissions de CO₂ avant l'intégration du scrubber.

Charge (%)	Ps (kW)	Consommation Fe (kg/km)	Distance (km)	Facteur d'émission (kgCO ₂ /kg)	Poids (tonne)	E _{CO2} (kg CO ₂)	E _{CO2} (tonne CO ₂)
100%	2720	22,3	2445	3,76	6000	205008,36	205,01
75%	2040	16,8	2445	3,76	6000	154445,76	154,45
50%	1360	11,9	2445	3,76	6000	109399,08	109,40

Tableau 26. Les émissions de CO₂ après lavage

Charge (%)	E _{CO2} (tonne CO ₂)	Efficacité (%)	E _{CO2} après lavage (tonne CO ₂)
100%	205,01	49	104,55
75%	154,45	49	78,77
50%	109,4	49	55,79

4.5 DISCUSSION ET INTERPRETATION

L'objectif principal de cette section est d'évaluer avec un calcul théorique la quantité de SO_x et de CO₂ émise avant et après l'intégration d'un laveur a gaz d'échappement a 50%, 75% et 100% des charges appliquées par un navire équipé d'un moteur Wartsila 8L26 lors d'un trajet de 1320 milles nautiques (2445 km) entre deux pays méditerranéens de la Tunisie vers la Turquie.

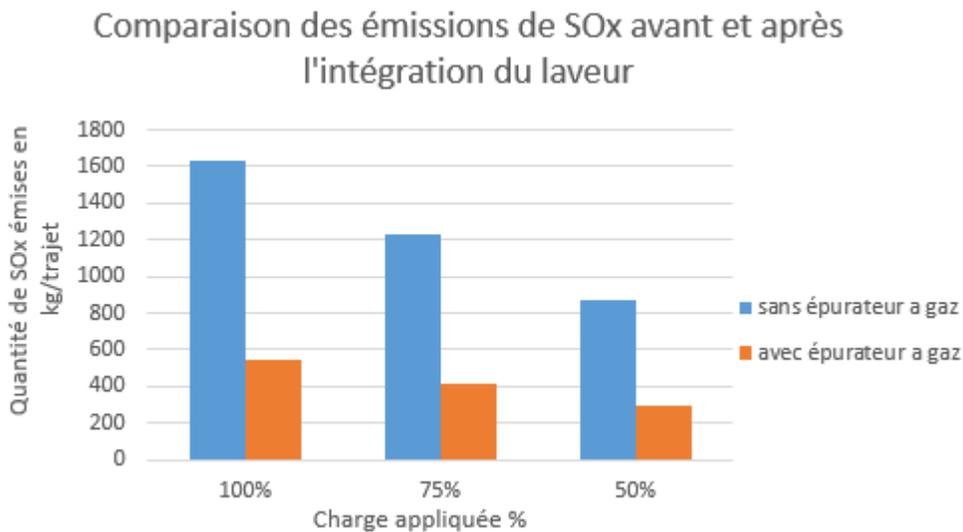


Figure 54. Comparaison des émissions de SO_x avant et après l'intégration du laveur.

Selon la figure 54 et pendant tout le trajet avec différentes charges appliquées, les émissions de SO_x ont été considérablement réduites. Pour une charge de 75 % (puissance = 2040 kw), sur une distance de 1320 milles nautiques, les émissions de SO₂ ont été diminuées de 823 kg, ce qui permet aux moteurs de continuer à utiliser même un fioul riche en soufre et permet aux armateurs de respecter les exigences de la convention MARPOL.

Le dioxyde de carbone CO₂ est considéré comme une source potentielle de développement des gaz à effet de serre (GES). Différentes études ont évalué que 3 à 4 % des émissions universelles de CO₂ sont attribuables aux navires.

Comparaison des émissions de CO₂ avant et après l'intégration du laveur et après l'intégration du laveur

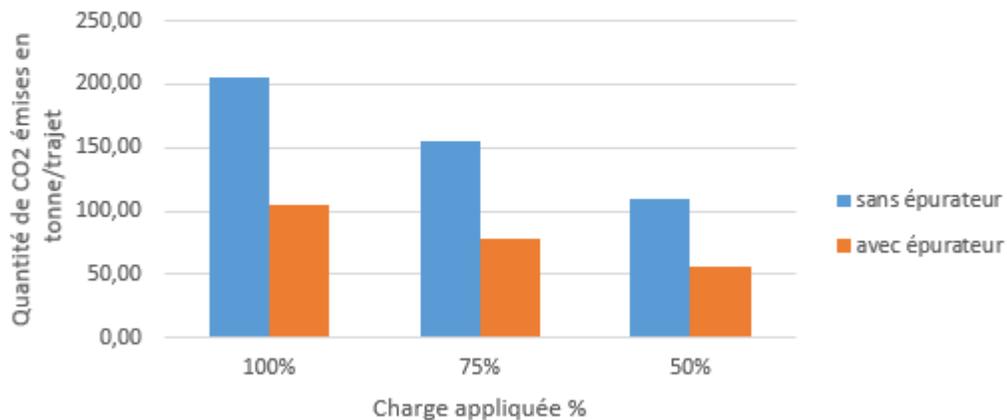


Figure 55. Comparaison des émissions de CO₂ avant et après l'intégration du laveur avec la solution MEA.

La figure 55 montre la réduction significative des émissions de dioxyde de carbone pendant le trajet grâce à l'intervention de la solution MEA dans le laveur. Cependant, l'utilisation de MEA dans le captage du CO₂ ne semble pas être la meilleure stratégie. La production de MEA à partir d'ammoniac entraîne d'importantes émissions de CO₂ au cours du procédé, de plus, à des températures élevées, la solution MEA n'est pas adaptée pour capturer le CO₂.

D'autres technologies sont en cours de développement pour atteindre l'objectif de l'IMO 2050 la réduction de 70 % de CO₂, le groupe technologique Wärtsilä a proposé un concept basé sur la combinaison du GNL et de la vapeur pour produire de l'hydrogène et du CO₂. L'hydrogène produit sera utilisé directement en mélange avec du gaz naturel dans des moteurs à combustion interne ou des piles à combustible, ce qui élimine la nécessité de stocker l'hydrogène à bord. Le CO₂ sera liquéfié en utilisant le flux de GNL cryogénique qui serait de toute façon utilisé comme carburant, puis relâché à terre pour le stockage du carbone.

4.6 LA TECHNOLOGIE SCR POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE NO_x

L'oxyde de soufre et le dioxyde de carbone ne sont pas les deux seuls polluants émis par les navires. Les oxydes d'azote (NO_x) constituent un des polluants atmosphériques émis dans les gaz d'échappement des moteurs diesels qui propulsent et alimentent le réseau électrique des navires marchands. Les effets néfastes de ce polluant sont également connus sur l'homme et son environnement. Face à ces constats, l'OMI a su réagir en adoptant des normes fermes concernant le transport maritime international pour les émissions de NO_x.

Un certain nombre de mesures prises par les fabricants de moteurs diesel permettent de réduire aujourd'hui grandement les émissions de NO_x. Parmi elles, la SCR est la technologie de post-traitement des gaz d'échappement la plus dominante et la plus mature pour contrôler les émissions de NO_x des moteurs diesel marins, car elle peut éliminer jusqu'à 90 % des émissions [15].

4.6.1 Système Selective Catalytic Reduction SCR

Selon l'agencement et la configuration de la canalisation d'échappement, les systèmes SCR sont divisés en réduction catalytique sélective basse pression (LP-SCR) et réduction catalytique sélective haute pression (HP-SCR), les systèmes LP-SCR et HP-SCR sont installés respectivement après et avant la turbine. HP-SCR peut être utilisé pour les carburants à faible ou à haute teneur en soufre, mais LP-SCR n'est applicable que pour les carburants dont la teneur en soufre ne dépasse pas 0,1% en raison de la corrosion des aubes de turbine causée par les oxydes de soufre. Comparé au HP-SCR, le LP-SCR a une plus grande flexibilité pour l'agencement et moins d'effet sur les performances du moteur diesel et de la turbine. Il est à noter que le HP-SCR présente les avantages d'une conception plus compacte et d'une utilisation plus élevée de la chaleur d'échappement [79].

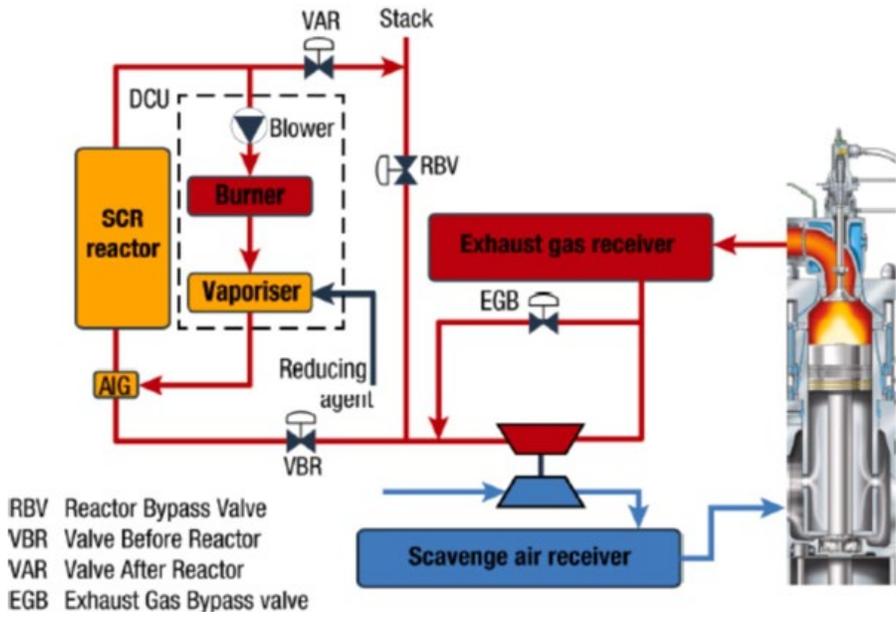


Figure 56. LP-SCR [79].

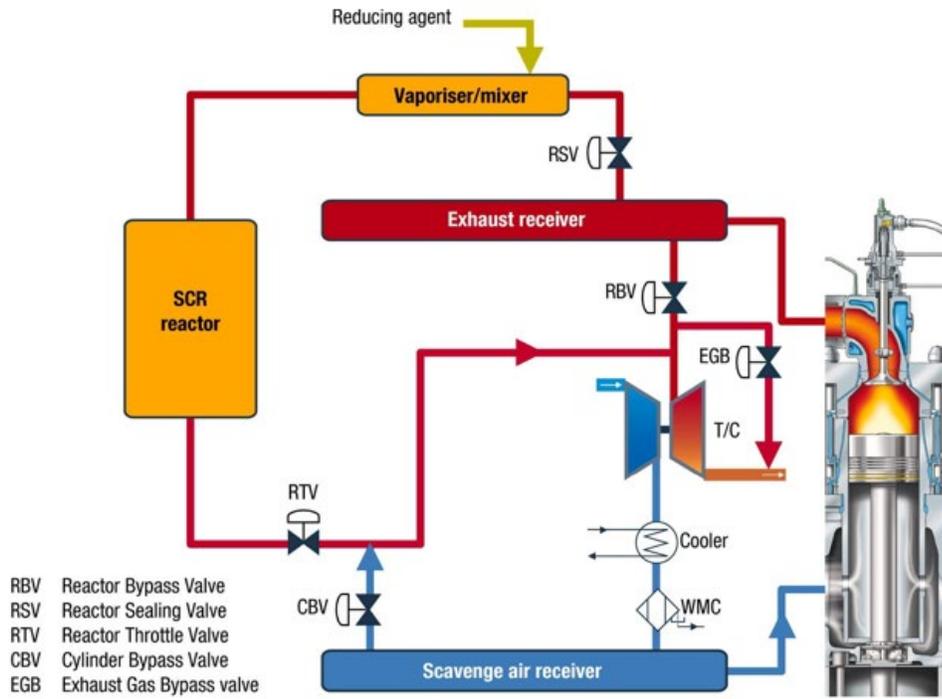


Figure 57. HP-SCR [79].

4.6.1.1 Principe de fonctionnement

Les gaz sont en fait débarrassés des NO_x par réaction chimique avec de l'ammoniac. Un mélange d'eau et de 40% d'urée (soit environ 30L par MWh) est injecté dans les gaz d'échappement, en présence d'un catalyseur à une température comprise entre 290°C et 450°C. Lors de l'injection dans les gaz d'échappement l'urée se décompose en ammoniac et dioxyde de carbone, l'ammoniac permet alors de réduire les NO_x en gaz non nocifs comme l'eau et l'azote [15].

La limite de température basse est notamment donnée par la teneur en soufre du combustible, en effet en deçà de 270°C l'ammoniac réagit avec les oxydes de soufre en créant des dépôts de sulfate d'ammonium, c'est pourquoi on privilégie les combustibles à faible teneur en soufre pour un bon fonctionnement. La température d'échappement minimale requise pour empêcher cette réaction est bien connue et documentée par les fabricants de catalyseurs et de moteurs. De même la température limite haute est donnée par le catalyseur qui se dégrade à forte température. De plus, le dosage de l'urée est fondamental pour le bon fonctionnement du SCR, il doit être précis en fonction des conditions de charge du moteur [15].

4.6.1.2 Les principaux composants d'un système SCR

- Une unité de pompage pour le transfert de la solution d'urée
- Une unité de dosage de l'urée
- Un conduit de mélange avec point d'injection d'urée
- Un boîtier de réacteur contenant des blocs de catalyseur
- Un système de contrôle
- Un système de nettoyage

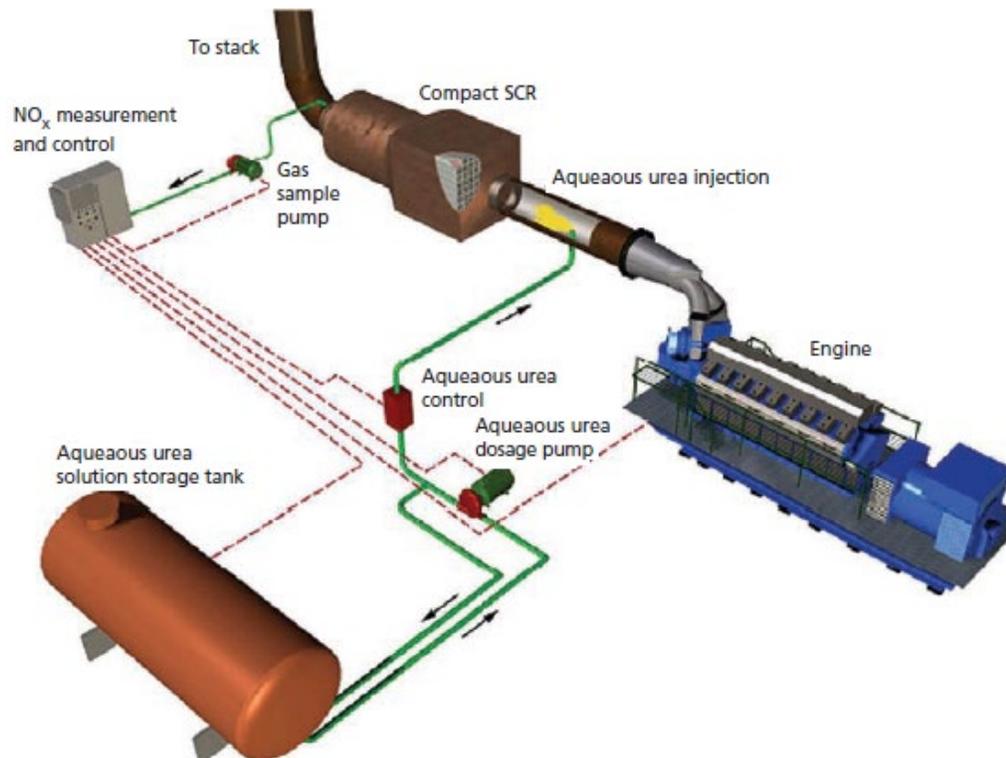


Figure 58. Dispositif SCR marin[74]

Le réducteur (urée) utilisé par ces moteurs est facile à obtenir. Aujourd'hui, l'urée adaptée aux dispositifs de SCR, y compris pour les applications marines, est disponible en Extrême-Orient, au Moyen-Orient, en Amérique du Nord et du Sud, en Asie et en Europe. Les types d'urée disponibles diffèrent d'un endroit à l'autre, mais cela ne pose pas de problème.

4.6.1.3 Coûts matériels et de fonctionnement de la SCR

Une étude de l'ICF (International Coach Federation) tient compte de renseignements fournis par de nombreux fabricants pour estimer les coûts fixes et variables de la SCR pour des moteurs types de différentes dimensions et caractéristiques[15].

Tableau 27. Estimations des coûts matériels de la SRC (US\$/kW) [15].

TECHNOLOGIE		VITESSE DU MOTEUR	FOURCHETTE DE PUISSANCE DU MOTEUR (kW)	COÛT (US\$/KW)
Réduction de NO _x	SCR	Moyenne	4 500-18 000	41-83
		Lente	8 500-48 000	46-76

En plus des coûts matériels liés à la SCR, les navires construits à partir de 2016 devront assumer les coûts de consommation d'urée par les systèmes de SCR. L'analyse de coût dans [15] est basée sur le dosage d'urée de 7,5% de la consommation spécifique de carburant au frein (BSFC) des moteurs, permettant une estimation du coût de l'urée pour différents types et tailles de moteurs (tableau 28).

Tableau 28. Coûts horaires associés à l'urée pour les types classiques de moteurs (US\$) [15].

VITESSE DE ROTATION	MOYENNE	MOYENNE	MOYENNE		LENTE	LENTE	LENTE
Puissance du moteur (kW)	4 500	9 500	18 000		8 500	15 000	48 000
Cylindres	9	12	16		6	8	12
Litres par cylindre	35	65	95		380	650	1400
Vitesse du moteur (tours/min)	650	550	500		130	110	100
BSFC (g/kWh)	210	210	210		195	195	195
Coût horaire de l'urée aqueuse (USD)	19	40	76		33	59	188

4.7 UTILISATION COMBINÉE D'UN DISPOSITIF D'ÉPURATION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT ET D'UN DISPOSITIF SCR

La combinaison de zones de contrôle des émissions de NO_x et de zones de contrôle des émissions de SO_x entraînera l'utilisation de combustible à faible teneur en soufre ou d'un EGCS pour éliminer le SO_x du conduit d'échappement des gaz avec le dispositif Selective Catalytic Reduction SCR pour le contrôle de NO_x.

Le système EGCS peut être installé en amont ou en aval du dispositif de RCS. S'il est installé en amont, il faut chauffer les gaz d'échappement avant qu'ils n'atteignent le dispositif

de RCS pour obtenir la réduction voulue des émissions de NO_x . Si l'EGCS est installé en aval du dispositif de RCS, il n'a pas d'incidence sur la réduction catalytique sélective [15].

Néanmoins, dans ce cas, le dispositif de RCS doit être conçu pour une utilisation avec du mazout lourd à plus haute teneur en soufre. De plus l'armateur doit se renseigner sur la durée de vie du catalyseur à des niveaux d'émissions de SO_x plus élevés.

4.7.1 Application

Une étude de cas menée dans [80] basée sur un modèle de réduction des émissions composé d'un système SCR pour la réduction des émissions de NO_x , suivi d'un système de lavage à l'eau de mer, a présenté une comparaison de la combinaison de ces deux systèmes avec d'autres technologies telles que l'utilisation du GNL ou l'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre avec un dispositif SCR.

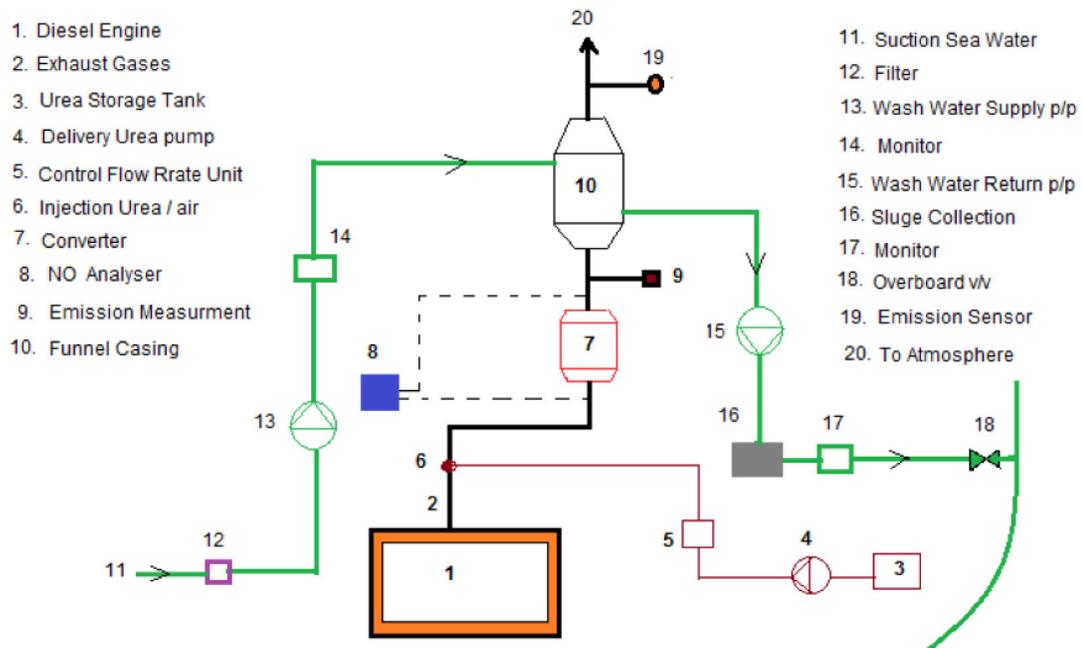


Figure 59. Modèle simple des principaux composants du système SCR et épurateur d'eau à l'intérieur de la salle des machines [80].

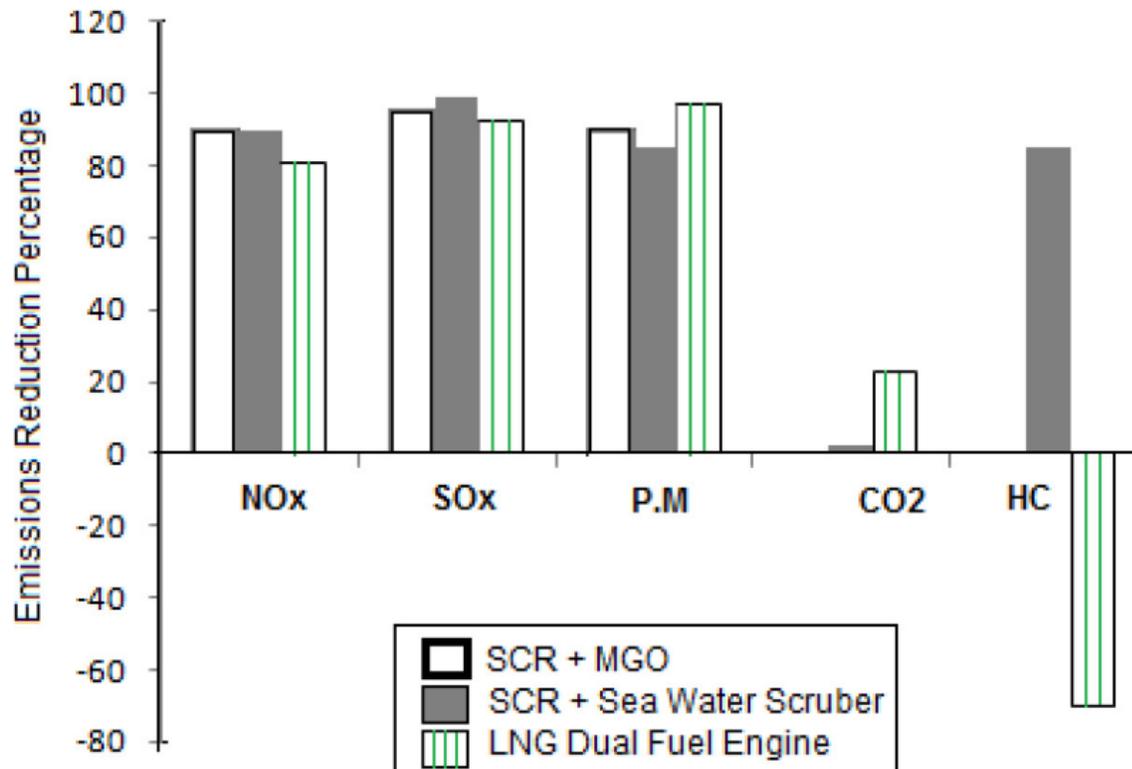


Figure 60. Comparaison entre différentes technologies [80].

Les résultats obtenus dans la figure 60 montrent que la combinaison des 2 systèmes, soit le SCR et l'épurateur à gaz, permet d'atteindre des pourcentages de réduction d'émissions intéressants d'ordre de 95 à 98%. Ceci dit que d'un point de vue environnemental, l'utilisation combinée de ces deux systèmes semble être la meilleure solution pour réduire les émissions à bord des navires, ce qui peut conduire à des émissions quasi nulles et atteindre les objectifs environnementaux établis par l'OMI. De plus, cette solution permettra aux armateurs de continuer à utiliser le carburant le moins cher, soit le Heavy Fuel Oil (HFO) dont la teneur en soufre est de 3,5%. Par contre, d'un point de vue économique, le coût reste le principal inconvénient de l'application de ces systèmes et dépend largement de l'âge du navire (rétrofit ou nouveau), et du type des carburants utilisés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

En raison du développement rapide de l'industrie du transport maritime et du trafic maritime au cours des dernières décennies, les émissions de pollution atmosphérique des navires ne cessent d'augmenter. Les gaz d'échappement des moteurs diesel marins sont la principale source d'émission de polluants nocifs qui contribuent de manière significative à la pollution de l'environnement, en particulier dans les zones portuaires qui sont souvent situées dans ou à proximité des zones urbaines, et un nombre important de personnes sont exposées à ces émissions.

L'Organisation maritime internationale a publié une législation maritime restreinte pour réduire les impacts environnementaux négatifs résultant de ces émissions. Par conséquent, le choix de la méthode appropriée pour la réduction des émissions des navires est devenu l'un des défis techniques et économiques auxquels sont confrontés les exploitants de navires.

De nombreux facteurs affectent le choix de la méthode appropriée de réduction des émissions des navires, notamment le type de navire, la puissance nominale, les problèmes économiques, l'adaptabilité et la conformité aux réglementations actuelles et futures sur les émissions.

Le remplacement des carburants marins traditionnels par des carburants propres, notamment le méthanol, le GNL et l'ammoniac, est une solution prometteuse pour réduire les émissions des moteurs diesel marins. Le méthanol convient mieux aux navires de petite et moyenne taille, tandis que le GNL a été utilisé dans les grands navires pour atteindre une bonne rentabilité, l'ammoniac liquide a l'avantage de zéro émission de carbone, mais il produira une grande quantité de NOx. Cependant, toutes ces solutions de prétraitement sont confrontées à des défis de stockage et nécessitent des coûts d'investissement élevés pour les intégrer sur les navires en service.

Les technologies de traitement interne, telles que l'EGR et le DWI sont couramment utilisés dans les moteurs diesel marins pour réduire les émissions de NOx.

La SCR est la méthode de post-traitement des gaz d'échappement la plus importante et la plus efficace pour contrôler les émissions de NOx, tandis que, le système d'épuration humide peut atteindre 95 % de réduction de SOx, qui est appliqué aux gros moteurs diesel marins avec des carburants à haute teneur en soufre. La plupart des techniques de post-traitement des gaz d'échappement sont matures, mais elles doivent être utilisées avec une intégration et une combinaison appropriée pour parvenir à une co-réduction de tous les polluants et à un bon rapport coût-efficacité.

D'autre part des sources d'énergies alternatives pour réduire ou remplacer les combustibles fossiles à bord sont en cours d'évaluation telle que les énergies renouvelables et les systèmes électriques. L'utilisation de l'énergie solaire et éolienne peut répondre aux besoins énergétiques des navires et rendre le transport maritime vert. Néanmoins, ces technologies ne conviennent pas à tous les types de navires, et elles dépendent toujours de la fluctuation des conditions atmosphériques.

Les solutions électriques comme l'écrêtement des pointes et la technologie du stator rotatif ont un grand potentiel pour économiser du carburant et réduire les gaz polluants, mais elles n'ont pas encore été testées dans le transport maritime.

Les premières réflexions pour proposer des navires moins impactant commencent avant même le chantier naval, lorsqu'il s'agit de concevoir l'architecture des navires et de choisir les matériaux et les peintures. En raison des efforts supplémentaires de l'architecture navale, de nombreux chantiers du monde entier ont commencé à inculquer des méthodes et des équipements spéciaux à leurs navires. La conception de la coque et le type de matériaux utilisés dans la fabrication d'un navire jouent un rôle très important dans l'efficacité globale du navire. En titre d'exemple, l'optimisation des lignes de coque du navire augmente la vitesse du navire, économise du carburant et améliore également l'efficacité économique. De plus, la conception de la proue et de la poupe du navire peut améliorer l'efficacité de la propulsion, réduire la consommation de carburant et réduire les émissions de dioxyde de carbone.

D'autre part, l'impact direct de la construction navale sur l'environnement, qui concerne la construction, l'entretien et la réparation des navires a reçu relativement peu d'attention de la part du public. Cette activité est pourtant une source importante de préjudices potentiels pour l'environnement en raison notamment de la manipulation quotidienne de grandes quantités de matériaux, de vapeurs et de fluides toxiques. Les risques d'exposition de l'environnement à divers contaminants dangereux et toxiques se trouvent en outre aggravés dans l'industrie ; premièrement parce que la plupart des activités de construction navale se déroulent en plein air ; et deuxièmement parce que l'installation des chantiers navals au bord du littoral permet aux polluants potentiels de pénétrer directement dans le milieu aquatique. Trouver des solutions régionales pour réduire l'impact de l'industrie sur l'environnement, en imposant par exemple aux chantiers navals et aux ports, des obligations plus strictes au niveau technologique et environnemental, pourrait peut-être représenter un pas dans la bonne direction.

Perspectives des travaux

Les émissions de polluants nocifs des navires nécessitent une norme internationale plus stricte en raison de leur impact sur la santé humaine et l'environnement. Il comprend l'extension des zones de contrôle des émissions de SO_x (par exemple en Méditerranée, en mer Noire, en mer d'Irlande et dans l'Atlantique du Nord-Est) et la désignation de zones de contrôle des émissions de NO_x dès que possible.

Pour se conformer à la réglementation, les armateurs doivent arbitrer entre plusieurs technologies. Choisir une technologie plutôt qu'une autre n'est pas simple, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, l'évolution de l'économie et du commerce mondiaux, l'approvisionnement et les prix de l'énergie et les caractéristiques techniques du navire sont des exemples de facteurs qui influent sur le développement durable. Pour cela, dans des travaux futurs, il sera intéressant de mener une analyse économique détaillée des technologies étudiées afin d'évaluer le retour sur l'investissement de ses technologies en fonction de l'âge du navire (neuf ou rétrofit). D'autre part, il est également intéressant d'étudier les performances thermiques des carburants propres (LNG, l'hydrogène, et l'ammoniac) et la quantité requise de stockage par rapport aux carburants à haute densité de soufre avec un scrubber et un RCS afin que les armateurs puissent clarifier leurs choix et se prononcer sur la meilleure solution.

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristique du moteur Wartsila 8L26

Wärtsilä 8L26		AE/DE	AE/DE	ME	ME
Cylinder output	kW/cyl	325	340	325	340
Engine speed	rpm	900	1000	900	1000
Engine output	kW	2600	2720	2600	2720
Mean effective pressure	MPa	2.55	2.4	2.55	2.4
Combustion air system (Note 1)					
Flow of air at 100% load	kg/s	5.1	5.4	5.1	5.4
Temperature at turbocharger intake, max.	°C	45	45	45	45
Air temperature after air cooler, nom. (TE601)	°C	55	55	55	55
Exhaust gas system (Note 2)					
Flow at 100% load	kg/s	5.2	5.5	5.2	5.5
Flow at 85% load	kg/s	4.6	4.8	4.4	4.6
Flow 75% load	kg/s	4.2	4.4	3.9	4.2
Flow 50% load	kg/s	3.0	3.2	2.6	3.0
Temp. after turbo, 100% load (TE517)	°C	340	340	340	340
Temp. after turbo, 85% load (TE517)	°C	340	340	340	344
Temp. after turbo, 75% load (TE517)	°C	340	340	357	357
Temp. after turbo, 50% load (TE517)	°C	353	344	390	378
Backpressure, max.	kPa	5.0	5.0	5.0	5.0
Exhaust gas pipe diameter, min	mm	550	550	550	550
Calculated exhaust diameter for 35 m/s	mm	572	589	572	589
Heat balance (Note 3)					
Jacket water, HT-circuit	kW	488	512	488	512
Charge air, LT-circuit	kW	840	904	840	904
Lubricating oil, LT-circuit	kW	400	432	400	432
Radiation	kW	120	128	120	128
Fuel system (Note 4)					
Pressure before injection pumps (PT101)	kPa	700±50	700±50	700±50	700±50
Engine driven pump capacity at 12 cSt (MDF only)	m³/h	3.7	4.1	3.7	4.1
Fuel flow to engine (without engine driven pump), approx.	m³/h	2.2	2.3	2.2	2.3
HFO viscosity before engine	cSt	16...24	16...24	16...24	16...24
HFO temperature before engine, max. (TE 101)	°C	140	140	140	140
MDF viscosity, min	cSt	2.0	2.0	2.0	2.0
MDF temperature before engine, max. (TE 101)	°C	45	45	45	45
Fuel consumption at 100% load	g/kWh	191.0	194.9	191.0	194.9
Fuel consumption at 85% load	g/kWh	190.6	194.4	188.7	191.5
Fuel consumption at 75% load	g/kWh	193.9	196.3	190.1	193.4
Fuel consumption at 50% load	g/kWh	203.2	207.0	193.7	198.5
Clean leak fuel quantity, MDF at 100% load	kg/h	10.3	10.9	10.3	10.9
Clean leak fuel quantity, HFO at 100% load	kg/h	2.1	2.2	2.1	2.2
Lubricating oil system (Note 5)					
Pressure before bearings, nom. (PT201)	kPa	450	450	450	450

Annexe 2 : Caractéristique du carburant marin

Characteristics	Unit	Limit	Category ISO-F						Test method(s) and references
			DIMX	DVA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	
Density at 15 °C	kg/m ³	Max	-	890,0	890,0	890,0	900,0	ISO 3675 or ISO 12185	
Cetane index		Min	45	40	40	35	ISO 4264		
Sulphur ^{b, k)}	% m/m	Max	1,00	1,00	1,00	1,50	ISO 8754 or ISO 14596, ASTM D4294		
Flash point	°C	Min	43,0 ^{l)}	60,0	60,0	60,0	ISO 2719		
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00	2,00	2,00	IP 570		
Acid number	mg KOH/g	Max	0,5	0,5	0,5	0,5	ASTM D664		
Total sediment by hot filtration	% m/m	Max	-	-	-	0,10 ^{c)}	ISO 10307-1		
Oxidation stability	g/m ³	Max	25	25	25	25 ^{d)}	ISO 12205		
Fatty acid methyl ester (FAME) ^{e)}	% v/v	Max	-	-	7,0	-	7,0	ASTM D7963 or IP 579	
Carbon residue – Micro method on 10% distillation residue	% m/m	Max	0,30	0,30	0,30	-	ISO 10370		
Carbon residue – Micro method	% m/m	Max	-	-	-	0,30	ISO 10370		
Cloud point ^{f)}	winter	°C	Max	-16	Report	Report	-	ISO 3015	
	summer			-16	-	-	-		
Cold filter plugging point ^{g)}	winter	°C	Max	-	Report	Report	-	IP 309 or IP 612	
	summer			-	-	-	-		
Pour point ^{h)}	winter	°C	Max	-	-6	-6	0	ISO 3016	
	summer			-	0	0	6		
Appearance		-	Clear and bright ⁱ⁾				^{c)}	-	
Water	% v/v	Max	-	-	-	0,30 ^{c)}	ISO 3733 or ASTM D6304-C ^{m)}		
Ash	% m/m	Max	0,010	0,010	0,010	0,010	ISO 6245		
Lubricity, corr. wear scar diam. ⁿ⁾	µm	Max	520	520	520	520 ^{d)}	ISO 12156-1		

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. d. N. U. s. l. c. e. l. développement, *Études sur les transports maritimes 2018*. United Nations, 2019.
- [2] C. A. Inc and Q. D. o. Transport, *Étude de l'impact économique de l'industrie maritime au Québec: rapport final*. Ministère des Transports du Québec, 2012.
- [3] D. C. H. Gordon English, "Impacts environnementaux et sociaux du transport maritime dans la région des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent," Research and Traffic Group 2013.
- [4] V. L. France Delisle, Julie Paradis,, "Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990," *Gouvernement du Québec*, 2019.
- [5] I. Komar and B. Lalić, "Sea Transport Air Pollution," in *Current Air Quality Issues*, 2015, ch. Chapter 8.
- [6] H. Ntikala Bompola, "Amélioration de l'efficacité énergétique des navires," Université du Québec à Rimouski, 2019.
- [7] G. O. B. McEwen, D. Herbenyk, J. Vieira, j.-L. Allard, "Inventaire des émissions des opérations terrestres et maritimes au port du Montréal," 2009.
- [8] ClearSeas. "Pollution atmosphérique & transport maritime." <https://clearseas.org/fr/pollution-atmospherique/> (accessed).
- [9] C. König. "Conséquences des pluies acides." <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-tout-savoir-soufre-803/page/6/> (accessed).
- [10] É. Santelli, "La prévention de la pollution atmosphérique par les navires," 2010.
- [11] g. d. canada;, "Convention internationale pour la prévention de la pollution causée par les navires, 1973, tel que modifié par le Protocole de 1978 (MARPOL 1973/1978)," 2020. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenerariats-organisations/prevention-pollution-navires.html>.
- [12] M. d. l. E. e. d. C. climatique, "RECUEIL DES ENGAGEMENTS DU CANADA AUX ACCORDS INTERNATIONAUX ET INSTRUMENTS SUR L'ENVIRONNEMENT Convention international pour la prévention de la pollution causée par les navires, 1973, tel que modifié par le Protocole de 1978 (MARPOL 1973/1978)," 2020.
- [13] EPA. "MARPOL Annex VI and the Act To Prevent Pollution From Ships (APPS)." <https://www.epa.gov/enforcement/marpol-annex-vi-and-act-prevent-pollution-ships-apps> (accessed).
- [14] AirPaca, "Impact des émissions du transport maritime sur la qualité de l'air des zones portuaires," 2017.
- [15] Marie-Charlotte GOURDAIN, "LE CONTROLE DES EMISSIONS D'OXYDE D'AZOTE DANS LE TRANSPORT MARITIME : ASPECTS TECHNIQUES ET JURIDIQUES," EAAM 2015.

- [16] BARRELPARJOUR. "Changing marine fuel legislation – a curse or blessing for refineries?" <https://barrelderday.com/2017/06/20/changing-marine-fuel-legislation/> (accessed).
- [17] ClearSeas;. "QU'EST-CE QUE L'OMI 2020?" <https://clearseas.org/fr/blogue/quest-ce-que-lomi-2020/> (accessed).
- [18] A. F. D. C. D. NAVIRES;. "Réglementation pour la prévention de la pollution de l'air par les navires Annexe VI de MARPOL 73/78," 2021. [Online]. Available: https://www.afcan.org/dossiers_reglementation/marpol_air.html.
- [19] M.-M. Ion, "Amélioration de la sélectivité des protections électriques des navires lors de l'alimentation à quai-Augmentation du courant de court-circuit," Université Grenoble Alpes, 2015.
- [20] O. m. i. (OMI). "Réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des navires." <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (accessed).
- [21] M. Issa, H. Ibrahim, R. Lepage, and A. Ilinca, "A Review and Comparison on Recent Optimization Methodologies for Diesel Engines and Diesel Power Generators," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 07, no. 06, pp. 31-56, 2019, doi: 10.4236/jpee.2019.76003.
- [22] M. Issa, H. Ibrahim, A. Ilinca, and M. Y. Hayyani, "A Review and Economic Analysis of Different Emission Reduction Techniques for Marine Diesel Engines," *Open Journal of Marine Science*, vol. 09, no. 03, pp. 148-171, 2019, doi: 10.4236/ojms.2019.93012.
- [23] A. VERTE. "LA STQ MET EN SERVICE LE PREMIER TRAVERSIER PROPULSÉ AU GNL EN AMÉRIQUE DU NORD." <https://allianceverte.org/2015/07/13/stq-met-en-service-premier-traversier-propulse-au-gnl-en-amerique-du-nord/> (accessed).
- [24] W. Engines, "Wärtsilä 20DF," 2017.
- [25] Fraunhofer. "La première pile à combustible au monde alimentée à l'ammoniac à haute température pour le transport maritime." <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/march-2021/worlds-first-hightemperature-ammonia-powered-fuel-cell-for-shipping.html> (accessed).
- [26] F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, "Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 31, p. 100670, 2021.
- [27] M. GALLUCCI. "POURQUOI L'INDUSTRIE DU TRANSPORT MARITIME PARIE GROS SUR L'AMMONIAC." <https://spectrum.ieee.org/why-the-shipping-industry-is-betting-big-on-ammonia> (accessed).
- [28] A. Richel. "L'ammoniac liquide : un carburant vert pour le secteur du transport ?" <http://www.chem4us.be/energie/lammoniac/> (accessed).
- [29] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, "Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 55, pp. 28282-28297, 2021.
- [30] L. Goldsworthy, "Design of ship engines for reduced emissions of oxides of nitrogen," *Australian Maritime College*, 2002.

- [31] S. Ibrahim, "Process evaluation of a SO_x and NO_x exhaust gas cleaning concept for marine application," 2016.
- [32] D. d. A. M. R. Française, "Projet de modification de la division 213 – Prévention de la pollution – Interdiction de rejet des épurateurs de fumées en système ouvert dès la limite des 3 miles nautiques," 2021.
- [33] BRENNTAG. "SYSTÈMES D'ÉPURATEUR MARIN." <https://www.brenntag.com/fr-ca/industries/plus/solutions-d%C3%A9missions-marines/syst%C3%A8mes-de-lavage/syst%C3%A8mes-de-lavage.html> (accessed.
- [34] C. SEAS. "RETOUR VERS LE FUTUR : L'ÉNERGIE ÉOLIENNE ET LA DÉCARBONISATION DU TRANSPORT MARITIME." <https://clearseas.org/fr/blogue/retour-vers-le-futur-lenergie-eolienne-et-la-decarbonisation-du-transport-maritime/> (accessed.
- [35] A. I. d. Windship. "Le vent aide-t-il ?" <https://www.wind-ship.org/en/does-wind-help/> (accessed.
- [36] M. M. O.S.K.Lines, "WIND CHALLENGER Next-Generation Wind Powered Vessel," 2021. [Online]. Available: <https://www.mol-service.com/service/windchallenger>.
- [37] A. Magazine. "Oceanbird, le plus grand navire à voile au monde." <https://www.actunautique.com/2020/11/oceanbird-le-plus-grand-navire-a-voile-au-monde.html> (accessed.
- [38] N. O. Ltd, "Rotor Flettner pour navire," 2021. [Online]. Available: <https://www.nauticexpo.fr/prod/norsepower-oy-ltd/product-66836-530305.html>.
- [39] J. d. Geek, "Michelin développe une étonnante voile d'aile gonflable pour les navires," 2021. [Online]. Available: <https://www.journaldugeek.com/2021/06/20/michelin-developpe-une-etonnante-voile-daile-gonflable-pour-les-navires/>.
- [40] ECONOWIND, "CONTAINERIZED ECONOWIND UNIT." [Online]. Available: <https://www.econowind.nl/index.php/econowind-unit/>.
- [41] P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, "Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111048, 2021.
- [42] E. marinepower. "Aquarius MRE." <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-wind-a-solar-power> (accessed.
- [43] E. marinepower. "Production of First EnergySail Begins at Factory." <https://www.ecomarinepower.com/en/news/120-production-of-first-energysail-begins-at-factory> (accessed.
- [44] E. m. power, "Aquarius Eco Ship," 2010-2021. [Online]. Available: <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-eco-ship>.
- [45] A. Moyou. "BARILLEC : Le peak shaving au service de l'efficacité énergétique." <https://www.meretmarine.com/fr/content/barillec-le-peak-shaving-au-service-de-lefficiency-energetique> (accessed.
- [46] G. Karmiris and T. Tengnér, "Peak shaving control method for energy storage," *Corporate Research Center, Vasterås, Sweden*, 2013.

- [47] Wartsila, "Hybrid Solutions," 2021. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/hybrid-solutions>.
- [48] I. Sorforn, "Wärtsilä's Hybrid Power System gives fuel savings and lower emissions," *Wartsila technical journal*, 2014.
- [49] K. A.-Y. Mohamad Issa, Richard Lepage, Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca,, "Integrated A Variable Frequency Drive for a Diesel-Generating Set using the Genset-Synchro Concept," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. Vol. 8, 2019.
- [50] É. D. Mohamad ISSA, Mohammadjavad MOBARRA, Jean FISET, Adrian ILINCA, "Modeling and optimization of the energy production based on Eo-Synchro application," 2017.
- [51] J. F. Mohamad ISSA , Mohammadjavad MOBARRA, Hussein IBRAHIM ,Adrian ILINCA, "Optimizing the performance of a 500kW Diesel Generator: Impact of the Eo-Synchro concept on fuel consumption and greenhouse gases," *Power Engineer*, 2018.
- [52] Ifremer. "Des « nageoires de baleines » pour réduire la consommation d'énergie des gros navires." <https://wwz.ifremer.fr/Espace-Presse/Communiqués-de-presse/Des-nageoires-de-baleines-pour-reduire-la-consommation-d-energie-des-gros-navires> (accessed).
- [53] Raunek. "How Air Lubrication System for Ships Works?" <https://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/> (accessed).
- [54] M. N. Network. "7 Technologies To Reduce Fuel Consumption Of Ships." <https://www.marineinsight.com/tech/7-technologies-to-reduce-fuel-consumption-of-ships/> (accessed).
- [55] M. N. Network. "HHI's New Fuel Saving Propeller Attachment Can Save Up To 2.5 % of Fuel." <https://www.marineinsight.com/shipping-news/hhis-new-fuel-saving-propeller-attachment-can-save-up-to-2-5-of-fuel/> (accessed).
- [56] S. Chakraborty. "What's The Importance Of Bulbous Bow Of Ships?" <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/why-do-ships-have-bulbous-bow/> (accessed).
- [57] N. Degiuli, I. Martić, A. Farkas, and I. Gospić, "The impact of slow steaming on reducing CO2 emissions in the Mediterranean Sea," *Energy Reports*, 2021.
- [58] I. M. Organisation, "Module 3 – From Management to Operation," 2016.
- [59] E. Du Pontavice, "Propulsion par cerf-volant: envol et pérégrinations," Université Paris-Saclay (ComUE), 2016.
- [60] G. Atkinson, H. Nguyen, and J. Binns, "Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships," *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 1543564, 2018.
- [61] norsepower. "norsepower key-advantages." <https://www.norsepower.com/key-advantages> (accessed).
- [62] O. Chicheportiche, "MICHELIN DÉVOILE UNE AILE GONFLABLE ET RÉTRACTABLE POUR LES NAVIRES," 2021. [Online]. Available:

- https://www.bfmtv.com/economie/entreprises/transports/michelin-devoile-une-aile-gonflable-et-retractable-pour-les-navires_AN-202106020144.html.
- [63] P. Tourret, "Une énergie économique et écologique: la force du vent," 2019.
- [64] U. pate. "Hissez le ventifoil." <https://www.upmpulp.com/media/blogs-and-stories/stories/hoist-the-ventifoil/> (accessed).
- [65] A. B. o. Shipping. "ABS Advisory on Hybrid Electric Power Systems." https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_Hybrid_Advisory_17033.pdf (accessed 12 Jun. 2018).
- [66] Mohamad Issa, "Rapport concernant l'intégration de la technologie Genset-Synchro dans le marché du transport maritime: possibilités et défis pour une génératrice d'un MégaWatt," 2019.
- [67] M. A. Grosenbaugh and R. W. Yeung, "Flow structure near the bow of a two-dimensional body," *Journal of ship research*, vol. 33, no. 04, pp. 269-283, 1989.
- [68] I. Panasiuk and L. Turkina, "The evaluation of investments efficiency of SOx scrubber installation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40, pp. 87-96, 2015.
- [69] wikipédia. "Impact écologique du transport maritime." https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_%C3%A9cologique_du_transport_maritime (accessed).
- [70] M. d. d. SUEZ. "échange gaz-liquide." <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/echange-gaz-liquide> (accessed).
- [71] S. Marsteau, "Absorption " Institut National de Recherche et de sécurité, 2006.
- [72] L. 2.0. "laveurs venturi (venturi scrubbers)." http://www.loplast.com/venturi_scrubbersfr.htm (accessed).
- [73] M. Issa, P. Beaulac, H. Ibrahim, and A. Ilinca, "Marinization of a Two-Stage Mixed Structured Packing Scrubber for Sox Abatement and CO2 Capture," *International Journal of Advanced Research*, vol. 7, pp. 73-82, 2019.
- [74] L. s. Register, "Understanding exhaust gas treatment systems: Guidance for shipowners and operators.," London, United Kingdom, 2012.
- [75] M. E. Solutions, "Emission Project Guide," 2020.
- [76] wikipédia, "Route maritime," 2020. [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Route_maritime.
- [77] M. S. Wärtsilä, "Wärtsilä 26 PRODUCT GUIDE," FINLAND, 2018.
- [78] d. D. d. e. d. l. é. Ministère de l'Écologie, *Information CO2 des prestations de transport-Guide méthodologique*. France, 2012.
- [79] P. Ni, X. Wang, and H. Li, "A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines," *Fuel*, vol. 279, p. 118477, 2020.
- [80] I. S. Seddiek and M. M. Elgohary, "Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SOx and NOx emissions," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 737-748, 2014.