



Université du Québec
à Rimouski

Modélisation CFD des épurateurs à gaz en milieu maritime

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

© **Oussama GHARBI**

Mars 2022

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamad Issa, codirecteur de recherche, Institut Maritime du Québec

Sasan Karkanroudi, examinateur externe, ITMI

Dépôt initial le 24 février 2022

Dépôt final le 11 mars 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, 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

Les colonnes à lit fixe à garnissage aléatoire de quatrième génération : constituent un moyen intéressant de mettre en œuvre le lavage à l'eau de mer du dioxyde de soufre (SO₂) à bord de grands navires, en raison de la faible perte de charge biphasique, de la capacité élevée, et de la grande efficacité de l'élimination du SO₂.

L'épuration de dioxyde de soufre à l'eau de mer a été étudiée au moyen d'un modèle eulérien 3D basé sur les équations macroscopiques de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et d'équilibre des espèces moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse. Il a été constaté que les performances du processus d'absorption du dioxyde de soufre par l'eau de mer dans les réacteurs à colonnes à lit fixe avec des garnissages aléatoires de quatrième génération peuvent être améliorées par l'augmentation du débit de liquide et la diminution de la température du liquide. Par conséquent, le lavage du dioxyde de soufre à l'eau de mer à bord de grands navires s'améliore considérablement dans les océans tempérés dont la température moyenne est comprise entre 10 et 20 °C.

D'autre part, l'augmentation de la pression améliore la force motrice du transfert de masse gaz-liquide et par la suite le processus d'élimination du dioxyde de soufre qui revient à des valeurs inférieures du rapport liquide-gaz. L'épuration à l'eau de mer du dioxyde de soufre à une pression plus élevée augmente le coût en capital et les besoins en énergie, mais offre des améliorations majeures telles que l'élimination totale du SO₂ lors de l'utilisation du carburant à une forte teneur en soufre et la prévention de la perte de puissance du moteur en raison de la forte contre-pression à l'échappement entrant. Le fonctionnement avec une hauteur de lit garnie supplémentaire permet d'amplifier le temps de contact gaz-liquide et par conséquent les performances du processus d'absorption. Dans ce contexte s'intègre ce présent travail qui vise à atténuer l'émission de SO₂ par les navires marchands utilisant des carburants à forte teneur en soufre.

Mots clés : garnissage, quatrième génération à colonnes à lit fixe, absorption/ émission de SO₂, simulation, modélisation CFD.

ABSTRACT

Fourth-generation random packed fixed-bed columns are an attractive way to implement sulfur dioxide (SO₂) seawater scrubbing on large ships because of the low two-phase pressure drop, high capacity, and high SO₂ removal efficiency.

Sulfur dioxide seawater scrubbing was studied using a 3-D Eulerian model based on the macroscopic equations of continuity, momentum, energy, and volume-averaged species equilibrium in the liquid and gas phases. It was found that the performance of the sulfur dioxide seawater absorption process in fixed-bed column reactors with fourth-generation random packing's, can be improved by increasing the liquid flow rate and decreasing the liquid temperature. As a result, the scrubbing of sulfur dioxide from seawater on board large ships improves significantly in temperate oceans with average temperatures between 10 and 20°C.

On the other hand, the increase in pressure improves the driving force of the gas-liquid mass transfer and subsequently the sulfur dioxide removal process which becomes complete at lower values of the liquid-gas ratio. Sulfur dioxide scrubbing at higher pressure increases capital cost and energy requirements, but offers major improvements such as complete removal of SO₂ at high fuel sulfur content and prevention of engine power loss due to high back pressure at the incoming exhaust. Operation with an additional packed bed height increases the gas-liquid contact time and thus the performance of the absorption process. In this context, the present work is integrated to mitigate SO₂ emission from merchant ships using high sulfur fuels.

Keywords: fourth-generation fixed-bed column packing, SO₂ absorption/emission, simulation, CFD modelling.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxiii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 LES RÈGLEMENTS TOUCHANT L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GES DES NAVIRES MARCHANDS	5
1.1 PREVENTION DE LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE PAR LES NAVIRES.....	5
1.1.1 La convention Marpol	5
1.1.2 Exigence de la méthode approuvée	7
1.2 TRANSPORT MARITIME AU MONDE	15
1.2.1 Evolution des trafics maritimes dans le monde.....	15
1.2.2 Les avantages du transport maritime.....	17
1.2.3 L'impact du transport maritime sur l'économie mondiale	17
1.3 L'IMPORTANCE DE CONTROLE DES EMISSIONS MONDIALE DES NAVIRES	18
CHAPITRE 2 PRESENTATION DES TECHNOLOGIES UTILISÉS POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DES NAVIRES.....	21
2.1 INTRODUCTION	21
2.2 LES TECHNOLOGIES DE REDUCTION DE L'EMISSION POUR LES MOTEURS DIESEL MARINS.....	22

2.2.1	Optimisation du carburant.....	22
2.2.2	Technologies de contrôle de la précombustion.....	24
2.2.2.5	Stratégie de combustion bi-carburant	33
2.2.3	Système de post-traitement des gaz d'échappement	35
2.3	LA RÉDUCTION DES EMISSIONS DU NOX PAR LA TECHNOLOGIE SCR.....	38
2.3.1	Les oxydes d'azote NOx.....	38
2.3.2	Réduire les émissions de NOx par la technologie SCR.....	41
2.4	L'ABBAT DU SOX PAR LE SYSTEME D'EPURATION DES GAZ D'ECHAPPEMENT	42
2.4.1	Oxyde de soufre SOx	42
2.4.2	Dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers).....	44
2.4.3	Réduire les émissions de SOx par le système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte.....	48
CHAPITRE 3 Modélisation de l'épuration de l'eau de mer Du SO ₂ dans des colonnes à garnissage à contre-courant haute performance		51
3.1	INTRODUCTION.....	51
3.2	MODELISATION PAR ASPEN CUSTOM MODELER.....	51
3.3	GEOMETRIE ET CONDITIONS INITIALES.....	52
3.4	MODELE HYDRODYNAMIQUE	53
3.5	MODELE DE TRANSPORT DE MASSE ET D'ENERGIE	57
3.5.1	Mécanisme d'absorption du SO ₂	57
3.5.2	Mécanisme d'absorption du CO ₂	58
3.5.3	Équations d'équilibre des espèces en phase liquide	58
3.5.4	Équations du bilan énergétique.....	61
3.6	PARAMETRES DU MODELE	62
3.7	IMPLEMENTATION NUMERIQUE.....	62
CHAPITRE 4 Simulation et discussion		67
4.1	INTRODUCTION.....	67
4.2	SIMULATION.....	67
4.3	CONCLUSION	86
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		87

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 . Valeur limite d'émission de NOx de l'annexe VI de MARPOL.	9
Tableau 2 . Limites de soufre actuelles de l'OMI et dates de mise en application.	11
Tableau 3 .Dates d'adoption, d'application et d'entrée en vigueur des OCE de l'annexe VI de MARPOL[5].....	15
Tableau 4 Résumé des stratégies d'injection de carburant sur les performances et les émissions des moteurs marins.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5 . Une comparaison entre la technologie HAM et la technologie DWI [25].....	33
Tableau 6 . Comparaison entre la conversion expérimentale et théorique du CO2 pour l'élimination enzymatique du CO2 dans une colonne à lit fixe structuré.....	65
Tableau 7 . Paramètres du modèle pour les simulations de cas de base.	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1 . La Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) [3].	6
Figure 2 . Règlement 13 de l'annexe VI de l'OMI limites de niveau de NOx [5]......	10
Figure 3 . Règle 14 de l'annexe VI de MARPOL - limites de soufre pour les MFO [5].	12
Figure 4 . Zones ECA existantes et possibles [11].	14
Figure 5 . Trafic maritime international, en tonnes-milles de marchandises, 2000-2019 [13].	15
Figure 6 . Trafic maritime mondial par région 2018 (pourcentage du tonnage mondial) [13]......	16
Figure 7 . Mise en place des stratégies de dépollution par l'OMI [18].	19
Figure 8 . Les territoires touchés en pourcentage de population sur la carte mondiale [19].	19
Figure 9 . ISFC et émissions de NOx en fonction des conditions du cycle de Miller [27].	27
Figure 10 . HAM (moteur à air humide) [31].	31
Figure 11 . Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [20].	32
Figure 12. Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [25].	32
Figure 13 . Composants de base du système d'épuration des gaz d'échappement [36].	38
Figure 14 . Structure du dioxyde d'azote.	39
Figure 15 . Technologie de réduction catalytique sélective (SCR) [38].	42
Figure 16 . Oxyde de soufre SOx.	43
Figure 17 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouvert [36].	45
Figure 18 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle fermée [36].	46

Figure 19 . Fonctionnement en boucle ouverte du système d'épuration des gaz d'échappement hybride [36].....	47
Figure 20 . Fonctionnement en boucle fermée du système d'épuration des gaz d'échappement hybride [36].....	48
Figure 21 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte à l'eau de mer - principales réactions chimiques [40].....	50
Figure 22 . Configuration du lit garni.	53
Figure 23 . modèle mathématique 3D de l'épuration de l'eau de mer au SO ₂ dans des colonnes à garnissage à contre-courant.	63
Figure 24 . Efficacité expérimentale et théorique d'épuration de l'eau de mer au SO ₂ dans un réacteur à colonnes à lit structuré garni de Sulzer Mellapak 250X (diamètre de la colonne = 0, 1 m; hauteur du lit à garnissage = 0,892 m).	64
Figure 25 . Effet de la vitesse superficielle du gaz sur les performances d'absorption d'eau de mer de SO ₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant.....	69
Figure 26 . Profils radiaux à l'état d'équilibre de la vitesse axiale du liquide dans des colonnes à lit fixe aléatoire.	70
Figure 27 . Profils radiaux à l'état stationnaire de la vitesse axiale du gaz dans des colonnes à lit garni aléatoire.	71
Figure 28 . Profils radiaux à l'état stable de la zone mouillée spécifique dans des colonnes à lit garni aléatoires.	72
Figure 29 . Effet de la concentration de SO ₂ à l'entrée dans la phase gazeuse sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	73
Figure 30 . Effet de la vitesse superficielle du gaz sur le processus d'absorption physique du CO ₂	74
Figure 31 . Effet de la concentration de SO ₂ à l'entrée dans la phase gazeuse sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	76
Figure 32 . Impact de la pression à différentes valeurs du rapport liquide/gaz sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.....	77

Figure 33 . Impact de la vitesse superficielle du liquide (a) et du rapport liquide/gaz (b) sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	79
Figure 34 . Profils axiaux de la fraction molaire de SO ₂ en phase gazeuse à différentes valeurs de vitesse superficielle du liquide dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	80
Figure 35 . Impact de la température du liquide d'entrée sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ (a) et la concentration de CO ₂ du liquide de sortie (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	82
Figure 36 . Facteur d'amélioration du transfert de masse en fonction de la température du liquide d'entrée dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	83
Figure 37 . Profils axiaux de la fraction molaire de SO ₂ en phase gazeuse à différentes valeurs de température du liquide d'entrée dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	83
Figure 38 . Efficacité d'élimination du SO ₂ par rapport à la longueur du lit garni - réacteur à colonnes à lit garni à contre-courant avec super-anneaux de Raschi.	84
Figure 39 . L'impact du modèle cinétique d'absorption sur l'efficacité d'élimination du SO ₂ (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.	85

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
MDE	Marine Diesel Engine
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 Équivalent vingt pieds

LISTE DES SYMBOLES

<i>U_{ne}</i>	Surface d'interface gaz-liquide	[m ² /m ³]
<i>U_{ns}</i>	Surface spécifique de garnissage	[kmol/m ³]
<i>C_j</i>	Concentration d'espèces <i>j</i>	[kmol/m ³]
<i>d_p</i>	Diamètre effectif des particules	[m]
<i>d_{min}</i>	Diamètre équivalent minimal	[m]
<i>d_c</i>	Diamètre de la colonne	[m]
<i>D_{él}</i>	Coefficient de diffusivité moléculaire en phase liquide	[m ² /s]
<i>D_{ég}</i>	Coefficients de dispersion de liquide et de gaz	[m ² /s]
<i>E</i>	Facteur d'amélioration du transfert de masse	[Ø]
<i>E₁, E₂</i>	Constantes d'Ergun	[Ø]
<i>f_e</i>	Fraction mouillée de la zone de garnissage	[Ø]
Fr_{am}	Force de dispersion mécanique	[N/m ³]
F_{gl}	Force de traînée gaz-liquide	[N/m ³]
F_{gs}	Force de traînée gaz-solide	[N/m ³]
F_{ls}	Force de traînée liquide-solide	[N/m ³]
G	Débit massique de gaz	[kg/m ² s]
H	Hauteur de l'épurateur	[m]

$H_{j,m0}$	Constante de la loi d'Henry en unité molaire	[Ø]
k_g	Coefficient de transfert de masse en phase gazeuse	[m/s]
k_{lune}	Coefficient volumétrique de transfert de masse en phase liquide	[1/s]
K_c	Constante d'équilibre effective de la réaction d'absorption du SO ₂	[mol/L]
L	Débit massique de liquide	[kg/m ² s]
m_j	Concentration molaire du composant j	[Ø]
M_j	Masse moléculaire du composant j	[kg/kmol]
N_j	Flux molaire interfacial du composant j	[kmol/m ²]
P	Pression du réacteur	[Pa]
P_j	Pression partielle de l'espèce j	[Pa]
P_c	Pression capillaire	[Pa]
r	Coordonnée radiale	[m]
R	Rayon du réacteur	[m]
S	Facteur d'étalement	[m]
t	Temps	[s]
T	Température	[K]
tu_{es}	Vitesse interstitielle du fluide α	[m/s]
$tur_{é\alpha}$	Vitesse de dérive pour la phase α	[m/s]
$v_{s\alpha}$	Vitesse superficielle de la phase α	[m/s]
z	Coordonnée axiale	[m]

α_{gt}	Coefficient de transfert de chaleur à l'interface gaz-liquide	[J/m ² s K]
ε	Porosité du lit garni	[Ø]
ε_{α}	Rétention de phase α	[Ø]
$\Delta H_{r,SO_2}$	Enthalpie de réaction d'absorption du SO ₂	[kJ/K mol]
$\lambda_{\alpha,ref}$	Conductivité thermique effective radiale de la phase α	[J/ms K]
$\lambda_{\alpha,\theta ef}$	Conductivité thermique effective azimutale de la phase α	[J/ms K]
μ_{α}	Viscosité dynamique de la phase α	[kg/ms]
$\mu_{\alpha ef}$	Viscosité effective de la phase α	[kg/ms]
ρ_{α}	Densité de la phase α	[kg/m ³]
σ_t	Tension superficielle	[N/m]
θ	Coordonnée azimutale	[m]
g	Phase gazeuse	[Ø]
je	Interface gaz-liquide	[Ø]
$dans$	Entrée de laveur	[Ø]
ℓ	Phase liquide	[Ø]
r	Direction radiale	[Ø]
$trans$	Transfert	[Ø]
z	Direction axiale	[Ø]
w	Mur d'épuration	[Ø]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le transport maritime, un mode de transport longue distance économe en énergie qui représente plus de 90% du commerce international en termes de volume, génère des émissions qui ont un impact néfaste sur la santé humaine et les écosystèmes marins. Les oxydes de soufre contenus dans les gaz d'échappement des moteurs marins fonctionnant au fioul lourd ont un impact significatif sur le milieu marin et sont en partie déplacés sur la terre ferme où ils s'ajoutent à la charge polluante au sol. Le SO₂ qui représente le principal composant des émissions d'oxydes de soufre (SO_x) des moteurs marins peut causer des pluies acides et un appauvrissement de la couche d'ozone.

La majorité des moteurs de propulsion marins moyens et gros fonctionnent avec du fioul lourd. Ce dernier est considéré comme un combustible bon marché contenant une quantité importante de substances contaminantes dont, notamment du soufre qui forme des SO_x par oxydation. Afin d'empêcher la formation de SO_x, l'Organisation maritime internationale (OMI) (via l'annexe VI de l'OMI de MARPOL 73/78, Règlement pour la prévention de la pollution de l'air par les navires) a adopté des réglementations sévères sur les émissions de SO_x des moteurs marins en fixant un maximum de la valeur de la teneur en soufre du carburant. Cette limite a été progressivement abaissée, passant de 4,5 à 3,5 % m/m de soufre lié au carburant (1er janvier 2012) et de 3,5 à 0,5 % m/m de soufre lié au carburant (1er janvier 2020).

Alternativement, le SO₂ peut être éliminé du flux de gaz d'échappement des moteurs marins via des processus traditionnels tels que la réduction catalytique sélective et la désulfuration des gaz de combustion. Cependant, ces procédés d'élimination conventionnels augmentent considérablement le coût d'investissement, le besoin en énergie et la complexité de l'installation. Un autre inconvénient majeur de la réduction catalytique sélective est l'effet toxique du SO₂ sur la durée de vie du catalyseur, qui est un facteur important du coût de cette

technologie. L'épuration à l'eau de mer est une solution viable pour l'élimination postcombustion du SO_2 des gaz d'échappement des moteurs marins et permet l'utilisation du Fioul lourd au lieu des coûteux carburants à faible teneur en soufre (Marine Diesel Oil ou Marine Gas Oil) imposés par les réglementations internationales de l'Organisation maritime internationale et des autorités de protection de l'environnement du monde entier [1]. L'augmentation considérable des coûts d'exploitation (dans le transport maritime longue distance, le coût du carburant représente les deux tiers du coût total du fret) obtenue en passant du fioul lourd (3,5 à 4,5 % w/w S) au diesel marin (1,0 % w/w S) ou Gazole marin (0,1 % w/w S), peut être considérablement réduit par l'élimination postcombustion du SO_2 du mazout lourd par épuration à l'eau de mer.

Les développements techniques supplémentaires de l'épuration à l'eau de mer du SO_2 nécessiteront la conception de contacteurs gaz-liquide avec un transfert de masse gaz-liquide amélioré et une faible perte de charge pour ajuster efficacement le coût d'investissement, la demande énergétique et la complexité de l'équipement. Les réacteurs à colonnes à lit fixe gaz-liquide à contre-courant avec des garnissages aléatoires de quatrième génération offrent de nouveaux avantages tels qu'une capacité élevée, une faible perte de charge, une stabilité mécanique améliorée et des coûts réduits et se classent en bonne place dans le portefeuille comme une option encourageante [1]. La nouvelle géométrie ouverte des garnissages aléatoires de quatrième génération offre des propriétés de procédé qui se rapprochent de celles des garnissages structurés et répond aux avantages des plateaux de transfert de masse. De plus, ces garnissages aléatoires hautes performances affichent une surface ouverte très large et uniforme dans chaque orientation d'anneau, générant une grande surface de contact entre les phases liquide et gazeuse tout en minimisant les zones sèches. Ce travail vise à étudier les processus d'absorption de SO_2 et le CO_2 (gaz coexistant) lors du lavage à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins dans des réacteurs à colonnes à lit fixe avec des garnissages aléatoires Raschig super-Rings (quatrième génération). L'approche utilisée est définie par l'hydrodynamique des écoulements biphasiques, les processus de transport de masse et d'énergie, la réaction chimique et la thermodynamique à travers un modèle eulérien 3D. Ce modèle utilise les équations macroscopiques de continuité, de quantité de

mouvement, d'énergie et d'équilibre d'espèces moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse. Les performances du processus de lavage à l'eau de mer dans des colonnes à lit garni à contre-courant avec un garnissage aléatoire de quatrième génération ont été comparées aux performances des colonnes de garnissage de troisième génération et de deuxième génération standard. Différentes stratégies ont été testées pour améliorer les processus d'élimination du SO₂, étant donné que ces processus sont souvent dominés par la résistance au transfert de masse en phase liquide.

CHAPITRE 1

LES RÈGLEMENTS TOUCHANT L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GES DES NAVIRES MARCHANDS

1.1 PREVENTION DE LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE PAR LES NAVIRES

1.1.1 La convention Marpol

La Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) est la principale convention internationale couvrant la prévention de la pollution du milieu marin par les navires pour des causes opérationnelles ou accidentelles. La Convention MARPOL a été adoptée le 2 novembre 1973 par l'Organisation maritime internationale (OMI), comme réponse à l'augmentation des accidents maritimes de pétroliers entre 1976 et 1977, le Protocole de 1978. 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. Le Code polaire entré en vigueur le 1er janvier 2017 inclut des amendements visant à ajouter à MARPOL des exigences plus rigoureuses au sujet des rejets, y compris les interdictions de déversements d'hydrocarbures et de substances liquides nocives dans les eaux arctiques [2].

La Convention comprend des règlements visant à empêcher et à réduire au minimum la pollution provenant de navires, la pollution accidentelle et celle provenant des opérations de routine et comprend à l'heure actuelle six annexes techniques. Des zones spéciales où des contrôles stricts sont exercés sur les déversements opérationnels sont prévues dans la plupart des annexes.

- 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 1er 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)

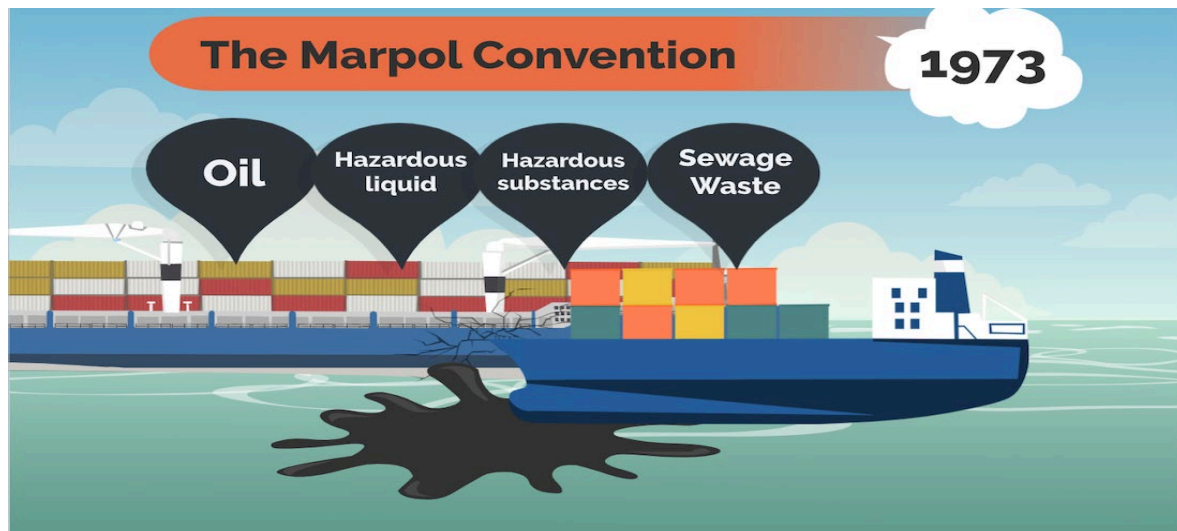


Figure 1 . La Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) [3].

1.1.2 Exigence de la méthode approuvée

MARPOL, la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires, vise à prévenir la pollution marine par les navires. Plus précisément, l'annexe VI de la convention MARPOL traite de la pollution de l'air par les navires océaniques.

L'annexe VI, Règles relatives à la prévention de la pollution de l'air par les navires, est entrée en vigueur le 19 mai 2005. Une annexe VI révisée est entrée en vigueur le 1er juillet 2010. Cette annexe fixe des limites sur les émissions d'oxyde de soufre et d'oxyde d'azote de l'échappement des navires et interdit les émissions délibérées de substances appauvrissant la couche d'ozone. Les zones de contrôle des émissions désignées établissent des normes plus rigoureuses pour le SO_x, le NO_x et les particules de matière. Les exigences internationales de l'annexe VI en matière de pollution atmosphérique fixent des limites suivantes :

- Limite des émissions de NO_x des moteurs diesel marins d'une puissance supérieure à 130 kW. Les normes s'appliquent à la fois aux moteurs de propulsion principale et aux moteurs auxiliaires et exigent que les moteurs soient exploités conformément aux limites d'émission de NO_x de l'annexe VI.
- Limites de la teneur en soufre des combustibles marins.
- Les navires opérant jusqu'à 200 miles nautiques doivent respecter les normes les plus avancées en matière d'émissions de NO_x et utiliser un carburant à plus faible teneur en soufre.
- Chaque moteur diesel réglementé des navires battant pavillon américain doit être muni d'un certificat EIAPP (Engine International Air Pollution Prévention), délivré par l'EPA (Environmental Protection Agency), afin de prouver que le moteur est conforme aux normes NO_x de l'annexe VI. Certains navires doivent également être munis d'un certificat international de prévention de la pollution atmosphérique (IAPP), délivré par la Garde côtière des États-Unis (USCG).

Les exploitants de navires doivent également tenir des registres à bord concernant leur conformité aux normes d'émission, aux exigences relatives aux carburants et aux autres dispositions de l'annexe VI.

- Les navires sont soumis à une inspection de conformité à l'annexe VI. Les navires ne battant pas pavillon américain sont soumis à un examen dans le cadre du contrôle par l'État du port lorsqu'ils opèrent dans les eaux américaines. L'USCG ou l'EPA peuvent prendre des mesures d'exécution en cas de violation [3].

1.1.2.1 Limites des émissions des oxydes d'azote NO_x

La règle 13 limite les émissions de NO_x de tous les MDE (Marine Diesel Engines) installés au-dessus de 130kW. Les navires construits à compter du 1er janvier 2000 sont des navires avec quille posée. Il convient également aux moteurs de même puissance qui font l'objet d'une "conversion majeure" le 1er janvier 2000 ou après cette date. Ce règlement n'inclut pas les chaudières et les turbines à gaz. Toutefois, ce règlement ne s'applique pas aux MDE de secours, aux moteurs de canots de sauvetage, à tout dispositif ou équipement destiné à être utilisé uniquement en cas d'urgence, ni aux moteurs installés sur des navires effectuant exclusivement des voyages dans des eaux relevant de la souveraineté ou de l'autorité du pays dont le navire bat le pavillon. Le protocole de 1997 a introduit en 2005 des niveaux initiaux de contrôle des émissions de NO_x qui étaient applicables aux moteurs installés sur les navires susmentionnés construits avant le 1er janvier 2000.

La révision de l'annexe VI en 2008 a considérablement renforcé les émissions de NO_x autorisées en introduisant deux limites de contrôle supplémentaires qui s'appliquent aux MDE installés sur des navires plus récents. Ces niveaux de contrôle, appelés Tiers, sont basés sur la date de construction du navire tandis que les limites d'émissions de NO_x, exprimées en poids total en g/kWh, dépendent du régime nominal du moteur.

Le niveau III ne s'applique que lorsque les navires sont exploités dans des ZCE (Zones de contrôle des émissions) NO_x. Lorsqu'ils naviguent en dehors des ZCE, ils doivent se conformer aux exigences du niveau I ou du niveau II, selon la date de construction des navires. Par conséquent, l'exploitation de chaque MDE auquel s'applique la règle 13 est interdite, sauf si les émissions de NO_x du moteur sont conformes aux limites du niveau, comme le montrent le Tableau 1, qui illustre les limites d'émission de NO_x à différents régimes du moteur.

Tableau 1 . Valeur limite d'émission de NO_x de l'annexe VI de MARPOL [2]

Tier	Date de construction du navire (le ou après)	Valeur limite pondérée totale des émissions de Nox (g/kWh)		
		n= régime nominal du moteur / tours de vilebrequin par minute (tr/min)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 janvier 2000	17,0	$45 * n^{-0,2}$	9,8
II	1 janvier 2011	14,4	$44 * n^{-0,23}$	7,7
III	1 janvier 2016	3,4	$9 * n^{-0,2}$	2,0
	1 janvier 2021			

À partir de la date d'entrée en vigueur d'une zone NECA (NO_x Emission Control Area), tous les navires neufs ou déjà existants, mais subissant une transformation importante dès lors devront satisfaire aux exigences de la Règle 13 de l'Annexe VI de la Convention MARPOL. Cette règle s'applique à tous les navires équipés de moteurs d'une puissance de sortie supérieure à 130 kW. En application du TIER III de la règle 13, l'exploitation de leur moteur est interdite lorsque la quantité d'oxydes d'azote émise dépasse les limites suivantes (n représente le régime nominal du moteur en tour vilebrequin par minute):

1. 3,4 g/kWh lorsque n est inférieur à 130 tr/min,
2. $9 \times n^{-0,2}$ g/kWh lorsque n est égal ou supérieur à 130 tr/min mais inférieur à 2 000 tr/min,
3. 2,0 g/kWh lorsque n est égal ou supérieur à 2 000 tr/min.

Malgré ces dispositions, la réglementation 13 stipule également que l'exploitation d'un MDE est autorisée lorsqu'elle est approuvée par une administration du pavillon, un système

d'épuration des gaz d'échappement ou lorsque toute autre méthode équivalente est mise en œuvre pour réduire les émissions de NO_x dans les limites spécifiées.

La révision de l'annexe VI en 2008, comme présente la Figure 2, a introduit une exigence de conformité rétrospective pour tous les navires construits entre le 1er janvier 1990 et le 30 décembre 1999 qui sont équipés d'un MDE d'une puissance supérieure à 5 000 kW et d'un déplacement par cylindre égal ou supérieur à 90 litres, sous réserve de la disponibilité commerciale d'une méthode approuvée pour améliorer le moteur [4].

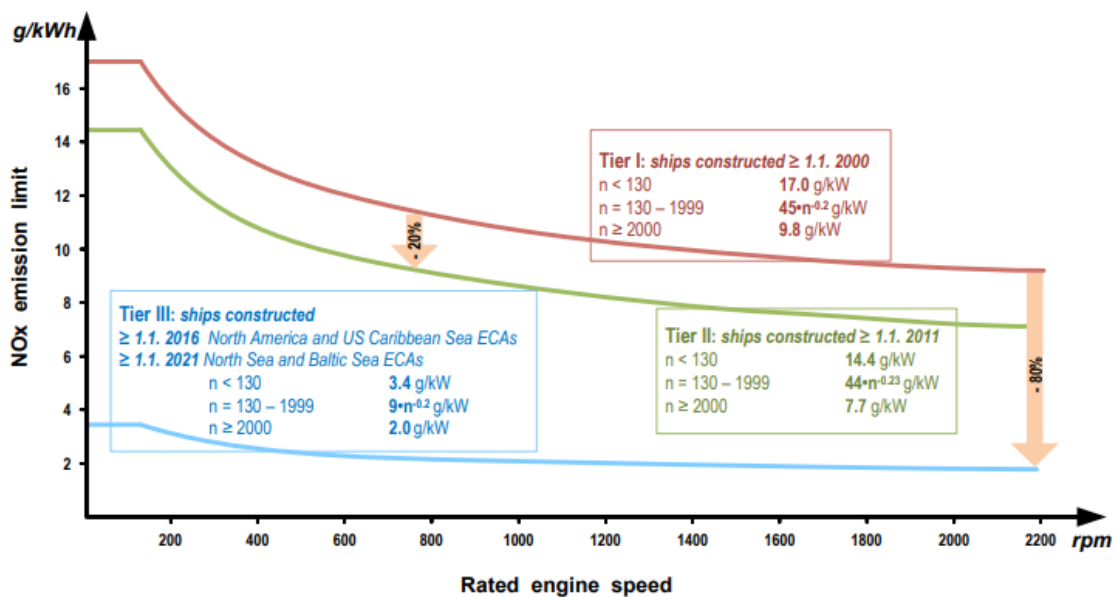


Figure 2 . Règlement 13 de l'annexe VI de l'OMI limites de niveau de NO_x [5].

- **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.

1.1.2.2 Limites des émissions des oxydes de soufre SO_x

Les émissions de SO_x et de PM des navires sont contrôlées par la règle 14 de l'annexe VI et s'appliquent à tous les MDE utilisés à bord des navires. Alors que la règle 13 ne couvre que les émissions de NO_x des MDE, la réglementation sur les SO_x et les PM s'applique à tous les MDE et à tous les autres équipements de bord, tels que les chaudières, les turbines à gaz, etc., qui utilisent des MFO (Marine Fuel Oil) pour fonctionner. Les limites de la teneur en soufre autorisée dans les MFO, exprimées en pourcentage de la fraction massique (% m/m), ont été progressivement réduites au cours des dernières années. La règle 14 actuelle définit la teneur maximale en soufre autorisée dans les MFO utilisés à bord des navires dans le monde entier et renforce encore ces limites dans certaines ZCE, comme le montre le Tableau 2, qui indique également les dates auxquelles les dispositions relatives à la teneur maximale en soufre sont entrées ou entrent en vigueur [6].

Tableau 2 . Limites de soufre actuelles de l'OMI et dates de mise en application [2]

Limites mondiales de la teneur en soufre	Limites de soufre des ECA (Emission Control Area)
4,50% m/m avant le 1er janvier 2012	1,50% m/m avant le 1er juillet 2010
3,50 % m/m à partir du 1er janvier 2012	1,00% m/m à partir du 1er juillet 2010
0,50% m/m à partir du 1er janvier 2020	0,10% m/m à partir du 1er janvier 2015

L'OMI a commandé une évaluation pour déterminer si le secteur mondial des raffineries de pétrole serait en mesure de produire des MFO d'une teneur en soufre de 0,50 % m/m en quantités suffisantes, avant de décider d'introduire cette limite inférieure en 2020 ou 2025. Dans leurs analyses, ils ont tenu compte des tendances des marchés mondiaux du fioul, de l'offre et de la demande de ces MFO, des demandes d'autres secteurs et de la viabilité économique ou non de la production de ces combustibles. Sur la base des résultats de l'audit, le jour de mise en œuvre de la limite mondiale de 0,50 % m/m de soufre a été le 1er janvier 2020, conformément à la résolution MEPC (Marine Environment Protection Committee) qui a été adoptée le 28 octobre 2016. La Figure 3 illustre la réduction progressive par l'OMI de

la teneur en soufre des MFO au fil du temps. Les dates d'application et le pourcentage estimé de réduction des émissions globales de SO_x des navires sont également inclus [7].

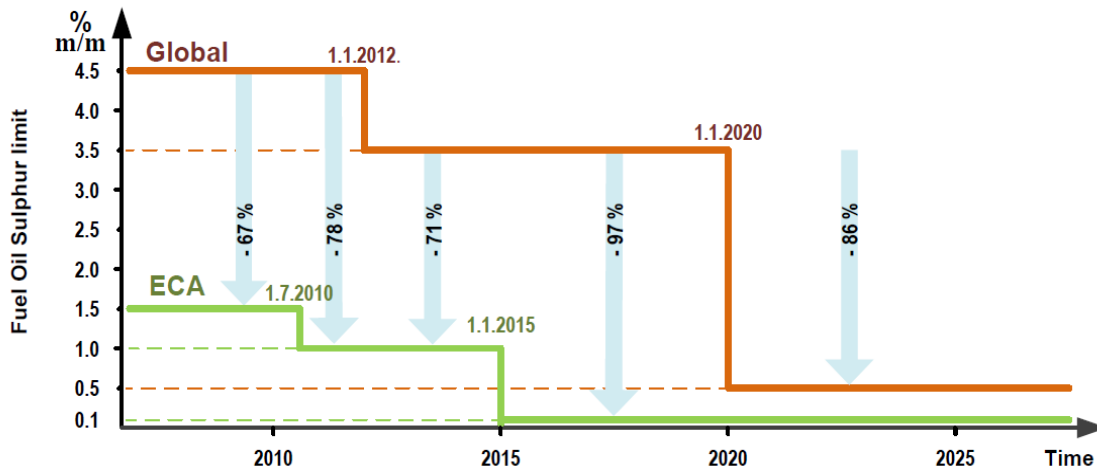


Figure 3 . Règle 14 de l'annexe VI de MARPOL - limites de soufre pour les MFO [5].

La règle 14 stipule que pour que les navires soient conformes, ils doivent disposer de procédures écrites à bord qui détaillent la manière d'effectuer le changement de MFO afin de leur permettre d'utiliser du MFO à teneur en soufre différente pour la navigation et l'exploitation à l'intérieur et à l'extérieur des ZCE. Cette procédure doit laisser suffisamment de temps pour que le système d'alimentation en carburant évacue complètement tous les MFO dont la teneur en soufre est supérieure à celle autorisée pour l'exploitation à l'intérieur de la ZCE avant que le navire n'y entre. La date, l'heure et la position du navire après l'achèvement de cette procédure de remplacement du combustible doivent être consignées dans le journal de bord prescrit par l'administration du pavillon, ainsi que le volume de combustible à faible teneur en soufre dans chaque réservoir, soit avant l'entrée dans la ZCE, soit au début de cette opération et à la sortie de la zone de la ZCE [8].

En outre, l'un des instruments de contrôle de la teneur en soufre et de la qualité des MFO avitaillés est la règle 18 de l'annexe VI, qui contient des dispositions concernant principalement les fournisseurs de MFO et qui peut être considérée comme appuyant les règles 13 et 14 concernant les aspects échappant au contrôle du propriétaire du navire. Cette règle stipule que les détails de chaque MFO livré pour la combustion à bord des navires

doivent être spécifiés dans la note de livraison de soufre accessible à tout moment pour inspection.

Un autre moyen potentiel de se conformer aux exigences en matière de contrôle des émissions, soumis à l'approbation de l'administration du pavillon, peut être accepté conformément à la règle 4 de l'annexe VI. Toute directive pertinente de l'OMI élaborée pour l'approbation de ces méthodes doit être prise en compte. Un système d'épuration des gaz d'échappement appelé "scrubber" est une telle méthode pour laquelle les directives MEPC.259(68) ont été adoptées. Ce système est appelé méthode de contrôle secondaire, car les polluants SO_x ont déjà été formés, mais sont ensuite, partiellement, éliminés par l'eau de lavage des gaz d'échappement avant leur rejet dans l'atmosphère. Cela permet d'utiliser des MFO à haute teneur en soufre si le système fonctionne dans des limites acceptables approuvées par l'administration du pavillon [9].

1.1.2.3 Zones de contrôle des émissions (ZCE)

Les ZCE (ECA – Emission Control Area) ou les zones de contrôle des émissions sont un ensemble de zones spécifiques de la mer, y compris les zones portuaires, qui a été défini par l'Organisation maritime internationale et où les réglementations sur les émissions sont plus intenses. En raison des normes d'émission des règlements 13, il y a actuellement quatre zones de contrôle des émissions désignées comme indiqué par un surlignage vert foncé dans la Figure 4. La zone de la mer Baltique, la zone de la mer du Nord, la zone de la mer d'Amérique du Nord (couvrant des zones désignées des États-Unis et du Canada) et la zone de la mer des Caraïbes des États-Unis (autour de Porto Rico et des îles Vierges américaines), relèvent actuellement des zones de contrôle des émissions [10].

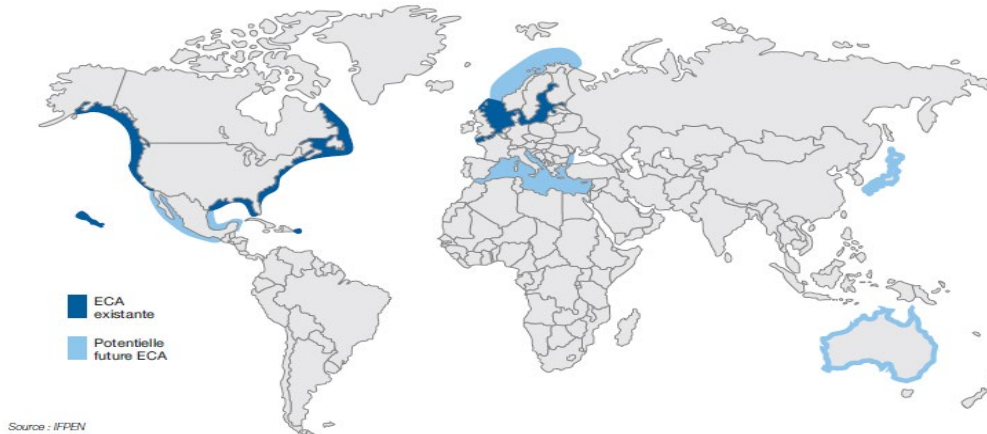


Figure 4 . Zones ZCE (ECA) existantes et potentielles [11].

Des mesures visant à réduire les émissions de SO_x et de particules des navires ont déjà été mises en œuvre par l'OMI dans ces régions ECA désignées. À compter du 1er janvier 2015, la limite d'émission de SO_x et de PM a été ramenée de 1,00 % m/m à 0,10 % m/m, et restera inchangée même après l'entrée en vigueur du règlement sur le plafonnement mondial du soufre à partir du 1er janvier 2020 (OMI, 2019b). Le règlement sur les oxydes d'azote (règlement 13 Tier III) ne s'applique pas à la région de la mer du Nord et de la mer Baltique. Cependant, les amendements à l'annexe VI de MARPOL ont inclus ces deux régions comme zones de contrôle des émissions d'oxydes d'azote. Ces amendements sont entrés en vigueur le 1er janvier 2019 et sont effectifs à partir du 1er janvier 2021. Cela signifie que tout navire construit à partir du 21 janvier 2021 et qui sera exploité dans les eaux désignées de l'ECA, est ou sera obligé de se conformer aux normes NO_x de niveau III. Les quatre régions ECA ont été adoptées par l'OMI à des dates différentes, de même que les composés (SO_x , NO_x et PM) adoptés et applicables à des dates différentes également. Le [Tableau 3](#) représente les quatre ECA avec leurs dates d'adoption, d'application et d'entrée en vigueur des différents composés [12].

Tableau 3 Dates d'adoption, d'application et d'entrée en vigueur des ECA de l'annexe VI de MARPOL [5].

ECA	Date d'adoption	Date d'exécution	Date d'entrée en vigueur
Zone de la mer Baltique : SO _x	26 September 1997	19 Mai 2005	19 mai 2006
Zone de la mer Baltique : NO _x	7 juillet 2017	1er janvier 2019	1er janvier 2021
Zone de la mer du Nord : SO _x	22 juillet 2005	22 novembre 2006	22 novembre 2007
Zone de la mer du Nord : NO _x	7 juillet 2017	1er janvier 2019	1er janvier 2021
Zone nord-américaine : SO _x	26 mars 2010	1er août 2011	1er août 2012
Zone nord-américaine : NO _x	26 mars 2010	1er août 2011	1er janvier 2016
Zone de la mer des Caraïbes : SO _x	26 juillet 2011	1er janvier 2013	1er janvier 2014
Zone de la mer des Caraïbes : NO _x	26 juillet 2011	1er janvier 2013	1er janvier 2016

1.2 TRANSPORT MARITIME AU MONDE

1.2.1 Evolution des trafics maritimes dans le monde

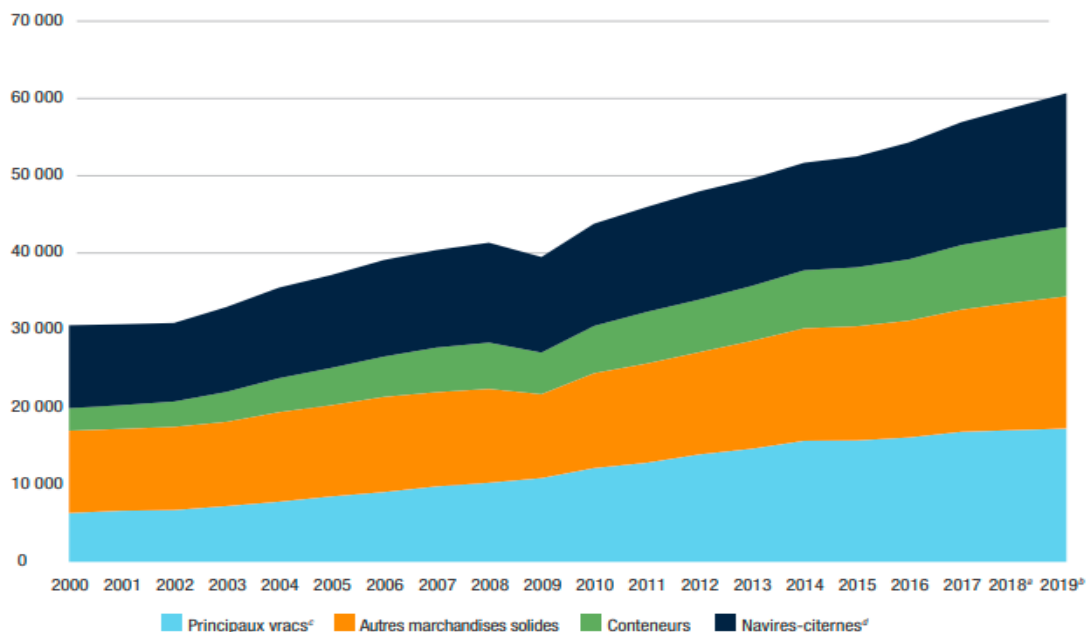


Figure 5 . Trafic maritime international, en tonnes-milles de marchandises, 2000-2019 [13].

Le trafic maritime international est en plein essor, avec une augmentation de 2,62% du volume des transports en 2018 comme présenté sur la Figure 5. Compte tenu de la reprise économique et de l'amélioration du commerce de marchandises au niveau mondial, la CNUCED (Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement) estime qu'en 2018 ces volumes se sont élevés à 289 millions de tonnes chargés [14], ce qui montre la grande importance de l'exploitation maritime au monde.

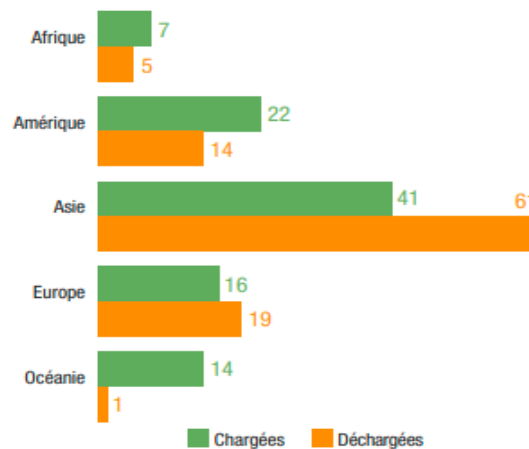


Figure 6. Trafic maritime mondial par région 2018 (pourcentage du tonnage mondial) [13].

La Figure 6 illustre la répartition régionale du trafic maritime mondial. En 2018, 41 % du total des marchandises chargées provenaient d'Asie et 61% du total des marchandises déchargées ont été reçues par cette région. À travers les années, la participation de l'Afrique a diminué, en particulier en termes de marchandises chargées, ce qui reflète l'importance réduite des exportateurs africains traditionnels de vrac liquide et sec.

Cette situation n'a été que partiellement compensée par d'autres sources de matières premières en provenance d'Afrique, et non par le fait que l'Afrique est devenue plus active dans l'exportation de biens à plus forte valeur ajoutée et de biens qui sont généralement transportés en conteneurs, y compris les produits manufacturés et les produits alimentaires ou industriels transformés. Le déclin relatif des pays d'Amérique latine en tant que source de volumes commerciaux est tout aussi notable. En revanche, les pays asiatiques ont connu une forte augmentation des échanges intrarégionaux, principalement basée sur le commerce de

produits manufacturés et s'expliquant par la fragmentation des processus de production. Les pièces sont généralement fabriquées dans plusieurs endroits en Asie et assemblées dans un autre lieu. Ce phénomène n'a pas été observé en Afrique et seulement dans une mesure limitée en Amérique latine, en partie en raison des dotations analogues en facteurs de production de la région et des limites des infrastructures et des services de transport maritime (UNCTAD, 2018) [15].

1.2.2 Les avantages du transport maritime

Le transport maritime assure selon des estimations, entre 70 et 80 % de toutes les marchandises transportées à travers le monde donc il est clair que nous dépendons du transport maritime. Même si vous ne vivez pas près d'une côte, votre existence quotidienne dépend du transport maritime. Lorsque vous songez à certains des problèmes qui sont liés au transport maritime, il est donc important de tenir compte de la manière dont ce secteur d'activités influence notre vie et de ses incidences sur l'économie du pays.

Le transport maritime est aujourd'hui la voie privilégiée pour le transit de marchandises et représente 80% du commerce mondial en volume. On compte actuellement près de 50 000 navires naviguant dans les zones maritimes internationales, ce chiffre devrait quadrupler d'ici 2050.

1.2.3 L'impact du transport maritime sur l'économie mondiale

La mondialisation, c'est l'échange généralisé entre les différentes parties de la planète, l'espace mondial étant alors l'espace de transaction de l'humanité. Simultanément, croissances et changements accompagnent ce développement des échanges globaux. Jamais dans son histoire, l'humanité n'a connu une accélération de changements aussi forte qu'au cours du dernier siècle et surtout des cinquante dernières années.

Le transport maritime joue un rôle clé dans cette interconnexion généralisée du monde. Plus de 80% du commerce international en volume est acheminé par la voie maritime, ce qui représente aujourd'hui plus de 10 milliards de tonnes transportées par la voie maritime contre

550 millions seulement en 1950. À l'intérieur du transport maritime, la conteneurisation élargit aux produits manufacturés et semi-finis cette capacité presque infinie de transport fiable à très bas coût sur de très longues distances.

Mais le constat ne se limite pas simplement à l'accompagnement du développement des échanges par le transport maritime. Ce dernier contribue aussi à remodeler l'espace productif mondial. Le déploiement à l'échelle internationale des chaînes de la valeur est rendu physiquement possible : concevoir un produit dans un centre de R&D d'un pays riche, produire ses composants là où les compétences et le savoir-faire industriel existent, l'assembler dans un pays où le coût de la main-d'œuvre est faible, le distribuer dans les pays où les consommateurs disposent d'un pouvoir d'achat. Pour y parvenir, l'industrie du transport maritime en tant que secteur d'activité économique, avec ses règles spécifiques de fonctionnement et ses propres acteurs, se transforme profondément [16].

1.3 L'IMPORTANCE DE CONTROLE DES EMISSIONS MONDIALE DES NAVIRES

L'augmentation régulière du trafic dans le secteur engendre des impacts environnementaux conséquents. En effet le transport maritime consomme à lui seul 200 millions de tonnes de fioul par an soit 45% de la consommation mondiale annuelle et émet près d'1 milliard de tonnes de CO₂ chaque année. Cela représente entre 2 et 3% des émissions GES (Gaz à effet de serre) mondiales soit l'équivalent des émissions totales de l'Allemagne, le 6ème émetteur mondial. Ce chiffre pourrait passer à 17% d'ici 2050 si rien n'est fait [17].

Cette pollution climatique mondiale a une compilation scientifique importante sur les conséquences du réchauffement sur la nature et l'humanité, qui doit être adoptée début 2022 comme montre la Figure 7.

La Figure 8 ci-dessous montre l'influence du réchauffement climatique sur la hauteur de la mer et les premiers pays qui seront exposés, en fonction des populations et les territoires touchés.

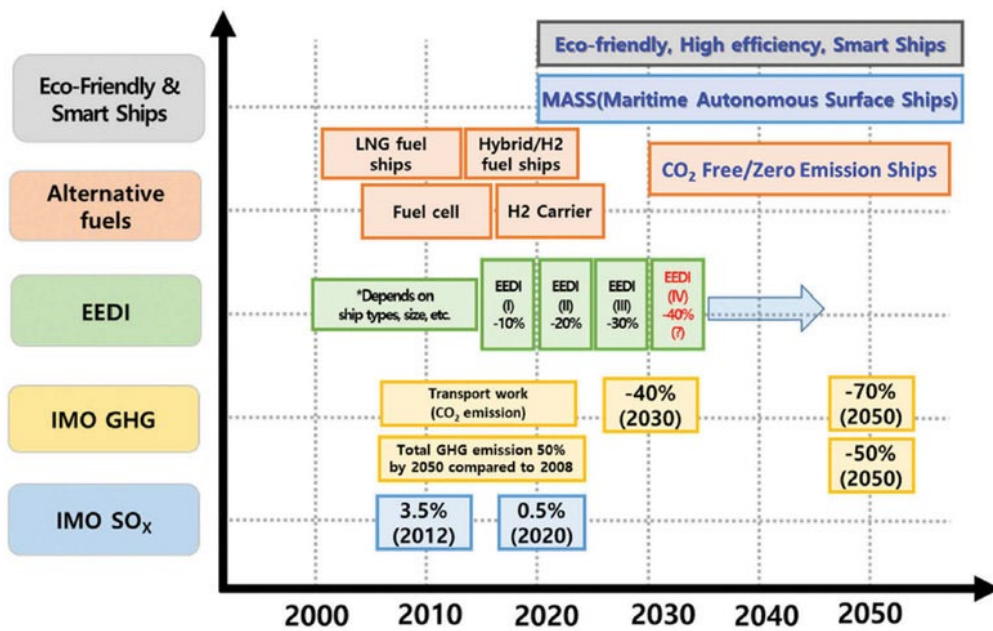


Figure 7 . Mise en place des stratégies de dépollution par l'OMI [18].

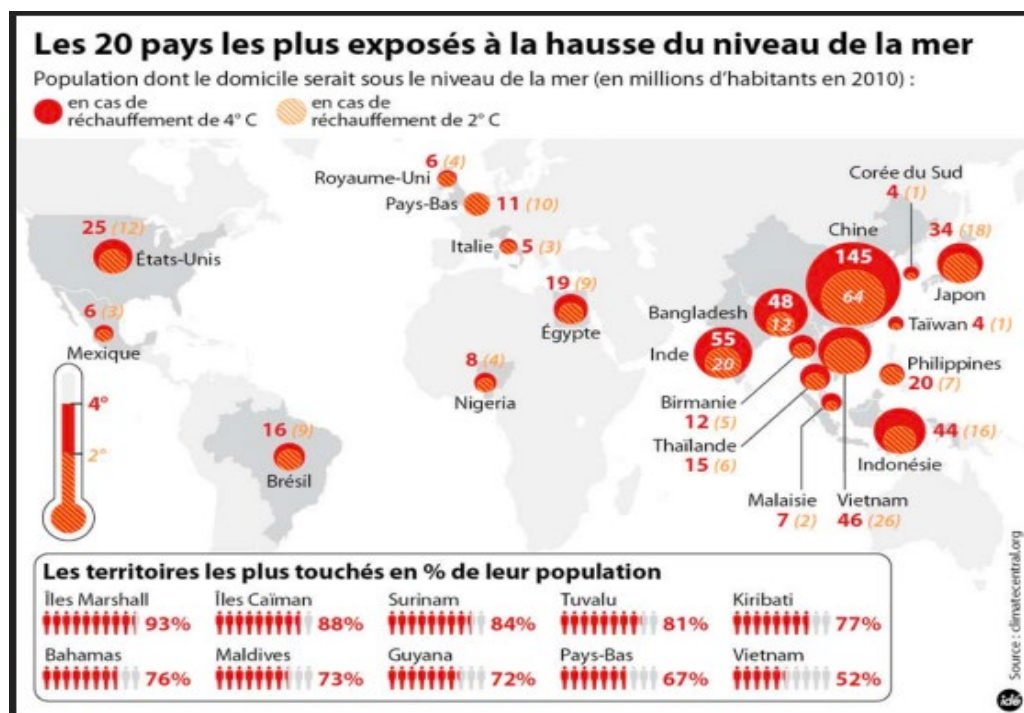


Figure 8 . Les territoires touchés en pourcentage de population sur la carte mondiale [19].

La Figure 8 montre l'impact du réchauffement climatique qui va forcer de nombreuses familles à abandonner leur foyer. Les inondations déplaceront par exemple en moyenne 2,7 millions de personnes en Afrique. D'ici 2050, entre 31 et 143 millions d'habitants (selon les niveaux d'émissions) d'Afrique sub-saharienne, d'Asie du Sud et d'Amérique Latine seront déplacés à l'intérieur de leur pays en raison des pénuries d'eau, de pression sur l'agriculture et de la hausse du niveau des mers.

Près de 2,5 milliards de personnes supplémentaires seront affectées d'ici 2050 par des risques climatiques, des vagues de chaleur aux inondations, en passant par l'impact sur l'agriculture.

Concernant l'alimentation, entre 2015 et 2019, environ 166 millions de personnes, principalement en Afrique et en Amérique centrale, ont déjà eu besoin d'une assistance alimentaire liée à des désastres climatiques. Entre 8 et 80 millions de personnes supplémentaires seront confrontées à la faim d'ici 2050. La production des principales cultures a déjà baissé de 4 à 10% ces dix dernières années et les récoltes d'espèces très consommatrices d'eau comme le maïs pourraient décliner d'un cinquième à un tiers d'ici le milieu du siècle.

La pêche sera touchée, avec des captures potentielles en baisse de 40 à 70% dans les zones tropicales d'Afrique.

En matière de santé, si la température augmente de +1,5°C à +2°C, 1,7 milliard de personnes supplémentaires seront également exposées à de fortes chaleurs, 420 millions à des chaleurs extrêmes et 65 millions à des canicules exceptionnelles tous les cinq ans.

Autre risque sanitaire : le déplacement des moustiques vecteurs de maladies vers des zones jusque-là épargnées pourrait menacer la moitié d'humanité d'ici 2050. Et dans un scénario de fortes émissions, 2,25 milliards de personnes supplémentaires seraient à risque de contracter la dengue en Asie, en Europe et en Afrique [20].

CHAPITRE 2

PRESENTATION DES TECHNOLOGIES UTILISÉS POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DES NAVIRES

2.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, la majorité des grands navires utilisent du fioul lourd (HFO) à faible coût. Accompagné d'une consommation de carburant considérable, le transport maritime produit 35,640 millions de tonnes de CO₂, ce qui représente 2,2 % des émissions mondiales de CO₂. Outre les gaz à effet de serre (GES), les flottes maritimes émettent également une quantité considérable d'émissions de polluants tels que les NO_x et les SO_x, qui sont également les principaux contributeurs à la pollution de l'air.

Dans ce contexte et pour des raisons de l'attention portée à l'environnement, en particulier aux émissions de SO_x et de particules (PM), l'OMI a introduit un plafond mondial sur la teneur en soufre du carburant. Il en résulte que les armateurs ont moins de liberté pour acheter des carburants compétitifs comme le HFO à plus forte teneur en soufre. En utilisant des technologies de réduction telles que les épurateurs de SO_x, les armateurs peuvent continuer à acheter du HFO à bas prix tout en respectant les réglementations sur le soufre.

En termes de voies optimisées, les technologies de réduction de l'émission actuelle pour les moteurs diesel marins peuvent être grossièrement divisées en trois catégories : l'optimisation du carburant, les technologies de contrôle de la pré-combustion et le système de post-traitement des gaz d'échappement [21].

2.2 LES TECHNOLOGIES DE REDUCTION DE L'EMISSION POUR LES MOTEURS DIESEL MARINS

2.2.1 Optimisation du carburant

Les navires alimentés au HFO émettront des quantités considérables de polluants dans l'atmosphère. Afin de réduire la grande quantité d'émissions polluantes causées par la combustion de HFO, cette section traite de trois principales méthodes d'optimisation du carburant, à savoir l'émulsification du carburant, l'additif pour carburant et la désulfuration du carburant.

2.2.1.1 Émulsification de carburant

La technologie d'émulsification de carburant mélange l'eau et le mazout pour former à l'avance l'huile émulsifiée, qui est ensuite pulvérisée dans le cylindre à travers la buse de combustion. Cela peut réduire simultanément la consommation de carburant et les émissions de NO_x.

Le mécanisme est expliqué comme suit :

- L'huile émulsifiée a une valeur calorifique inférieure à celle de l'huile d'origine, et la participation de l'eau rend la chaleur latente de l'huile émulsifiée supérieure à celle de l'huile, ce qui réduit considérablement la température dans le cylindre et l'émission de NO_x.
- La combustion d'huile émulsifiée peut réduire l'accumulation de carbone et de particules de carbone dans le cylindre, ce qui peut éliminer efficacement le point chaud dans la chambre de combustion.
- La pulvérisation secondaire homogénéise davantage le mélange en raison de l'effet de micro-explosion de l'huile émulsifiée, qui limite la formation d'une zone de haute température locale dans le cylindre.

- La vapeur surchauffée produite par l'huile émulsionnée après combustion est distribuée dans la chambre de combustion, ce qui équivaut à la dilution de l'oxygène dans le cylindre, et peut bien limiter la formation d'une zone locale riche en oxygène dans le cylindre.

De plus, la combustion de ces combustibles sous forme d'émulsion eau dans l'huile peut diminuer la longueur de la flamme, par rapport au combustible non émulsionné. La longueur de flamme plus courte permet à la combustion d'être plus économe en carburant et homogène, ce qui réduit la formation de zones locales à haute température et les émissions de NO_x [22].

2.2.1.2 Additif pour le carburant

L'adoption d'additifs pour améliorer les propriétés du carburant est également l'une des principales méthodes de réduction des émissions car le dioxyde de cérium (CeO_2) peut extrêmement bien contrôler la concentration d'oxygène en raison de sa forte capacité de stockage d'oxygène, de sa capacité d'élimination de l'oxygène et de sa forte capacité redox.

Le dioxyde de cérium (CeO_2) à l'excellente capacité de stockage et de libération d'oxygène, et la solution solide à base d'oxyde de cérium améliore la vitesse et la suffisance de combustion du carburant.

En fait, en plus des composés CeO_2 , de nombreuses études sont menées pour étudier les effets des additifs à base de fer (Fe) et de calcium (Ca) sur l'émission de NO_x .

La technologie des additifs pour carburant est une technologie prometteuse, mais son taux de réduction des émissions n'est pas stable, ce qui est sensible au changement de charge.

2.2.1.3 Désulfuration du carburant

L'utilisation de carburants à faible teneur en soufre est la méthode la plus simple pour réduire les émissions de SO_x .

Il existe deux méthodes pour réduire la teneur en soufre du carburant :

- Éliminer directement le soufre du carburant
- Réduire la teneur en soufre en mélangeant le carburant avec un autre carburant sans soufre

Pour éliminer le soufre du carburant, il existe plusieurs techniques de désulfuration telles que : l'hydrodésulfuration conventionnelle, la technologie de désulfuration par adsorption, la technologie de désulfuration additive de craquage catalytique, technologie d'hydrodésulfuration et d'aromatisation. À l'heure actuelle, la technologie la plus utilisée est la technologie de désulfuration additive de craquage catalytique. L'hydrodésulfuration et l'aromatisation ont la plus faible capacité de désulfuration, tandis que la technologie de désulfuration par adsorption présente les avantages de la commodité, de la rapidité, de la simplicité et de la désulfuration profonde, elle a donc été largement utilisée.

Pour réduire la teneur en soufre en mélangeant le carburant avec un autre carburant sans soufre, les propriétés du carburant résiduel peuvent être améliorées en le mélangeant avec un carburant alternatif propre, renouvelable et respectueux de l'environnement pour réduire les émissions polluantes des navires. Le mélange de HFO avec du biodiesel peut réduire considérablement la teneur en soufre du carburant parce que le biodiesel n'a presque pas de teneur en soufre [23].

Ainsi, les effets du mélange de biodiesel sur les caractéristiques du HFO pour les navires ont été étudiés par Yuan Lin (Lin, 2013b). Les résultats montrent que la teneur en soufre du carburant pourrait être réduite de 4,5 % en poids à 3,5 % en poids en ajoutant seulement 23 % en volume de biodiesel au HFO.

2.2.2 Technologies de contrôle de la précombustion

L'objectif principal des technologies de contrôle de la précombustion est de réduire la génération de NO_x en inhibant les conditions de formation de NO dans le processus de combustion. Récemment, des progrès considérables ont été réalisés dans les technologies de

contrôle interne des émissions de NO_x des moteurs diesel marins et différentes méthodes sont proposées pour réduire les émissions de polluants.

Cette section se concentre sur la turbo compression à deux étages, le cycle de Miller, la stratégie d'injection de carburant, la stratégie d'injection d'eau et la stratégie de combustion à double carburant [24].

2.2.2.1 Turbocompresseur à deux étages

Le turbocompresseur améliore la pression de suralimentation et le rendement volumétrique, et par conséquent augmente la puissance du moteur, mais diminue la consommation de carburant. Par conséquent, il a été largement utilisé dans la plupart des moteurs diesel lourds à basse et moyenne vitesse, en particulier pour le processus de balayage des moteurs diesel à basse vitesse à deux temps.

Connectant deux compresseurs différents en série, la suralimentation à deux étages comprime successivement l'air d'admission, de manière à améliorer le taux de compression. Par conséquent, l'utilisation d'un système de suralimentation à deux étages améliore à la fois la puissance du moteur et la réduction de la consommation de carburant dans diverses conditions de charge.

Une étude a été faite par Chu et Li [25] sur les effets de la turbocompression à deux étages sur les performances et les émissions d'un moteur marin (modèle 6112) en utilisant GT-Power. Les résultats montrent que la suralimentation à deux étages peut améliorer considérablement l'efficacité de la combustion et l'économie de carburant. Plus précisément, à la puissance nominale, avec une augmentation de 15 % de la masse de carburant d'injection, la puissance est augmentée de 18% et la consommation spécifique de carburant est réduite de 4,4%. De plus, il réduit considérablement les émissions de HC, tandis que les émissions de CO_2 et de NO_x se maintiennent à un faible niveau. De plus, un système de suralimentation a été appliqué avec la combinaison du cycle de Miller et du SCR (Selective Catalytic Reduction) pour obtenir une efficacité du moteur plus élevée, mais avec des émissions de

moteur plus faibles. Ces technologies seront présentées avec plus de détails dans la partie suivante.

2.2.2.2 Cycle de Miller

Récemment, le cycle de Miller est devenu l'un des points chauds car il peut être facilement appliqué aux moteurs diesel pour réduire les émissions de NO_x et de nombreux auteurs le considèrent comme la stratégie la plus prometteuse pour contrôler la formation de NO_x dans les cylindres. Le cycle de Miller réduit les émissions de NO_x en modifiant le calage des soupapes pour rendre le processus d'expansion effectif plus important que le processus de compression effectif, réduire le taux de compression effectif et réduire la température et la pression dans le cylindre à la fin de la compression. Pendant ce temps, le cycle Miller peut réduire considérablement les pertes de la pompe. Pour les moteurs diesel marins à vitesse moyenne et élevée, le cycle de Miller est généralement réalisé par une fermeture précoce des soupapes d'admission (EIVC) et une fermeture ultérieure des soupapes d'admission (LIVC).

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études sur le cycle de Miller ont été réalisées car il augmente les performances du moteur et réduit les émissions de NO_x car la fermeture précoce de la soupape d'admission raccourcit la course effective d'admission et de compression, pour les courses d'expansion et d'échappement. Ce processus fournira un refroidissement interne et une température plus basse à la fin de la compression, ce qui entraînera une réduction des émissions de NO_x [26].

La consommation spécifique de carburant indiquée (ISFC) et les émissions de NO_x en fonction des conditions du cycle de Miller ont été étudiées par Ji et Li (2019) [25], comme le montre la figure 9. Sur la figure 9, le temps de fermeture prolongé de la soupape d'échappement peut réduire considérablement l'émission de NO_x . Le temps d'ouverture plus long de la soupape d'échappement implique un taux de compression effectif plus faible, ce qui diminuera le taux de combustion et la température maximale dans le cylindre.

La consommation spécifique de carburant indiquée (ISFC) et les émissions de NO_x en fonction des conditions du cycle de Miller ont été étudiées comme le montre la Figure 9.

Sur la Figure 9, le temps de fermeture prolongé de la soupape d'échappement peut réduire considérablement l'émission de NO_x . Le temps d'ouverture plus long de la soupape d'échappement implique un taux de compression effectif plus faible, ce qui diminuera le taux de combustion et la température maximale dans le cylindre [27].

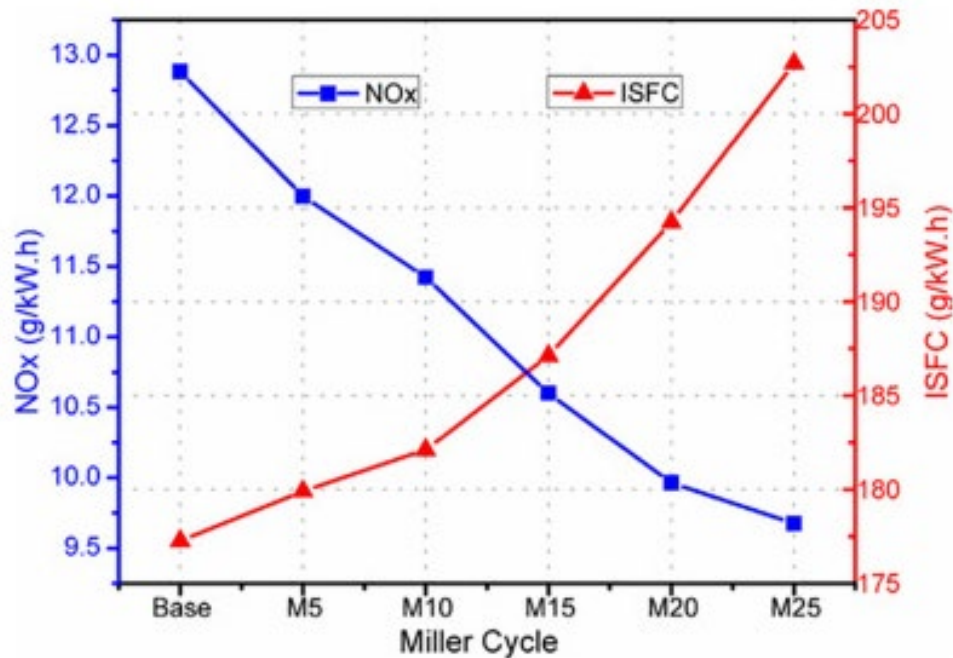


Figure 9 . ISFC et émissions de NO_x en fonction des conditions du cycle de Miller [27].

Cependant, le cycle de Miller ne réduit pas efficacement les émissions, mais augmente considérablement la consommation de carburant lorsque la fermeture de la soupape d'échappement est prolongée. Par conséquent, les cycles de Miller sont souvent utilisés en combinaison avec des systèmes de suralimentation et des stratégies d'injection d'eau.

2.2.2.3 Stratégie d'injection de carburant

Le système d'injection de carburant permet au carburant d'atteindre une pression suffisamment élevée en fonction des conditions de fonctionnement du moteur. Certaines règles et certaines quantités d'injection de carburant dans la position appropriée de la chambre de combustion du moteur peuvent optimiser le processus de combustion du moteur. Ainsi, les performances du système d'injection affectent directement la combustion du moteur diesel.

L'amélioration du fonctionnement du système d'injection peut augmenter l'efficacité du fonctionnement du moteur diesel, réduire la consommation de carburant et contrôler les émissions de polluants. De plus, les caractéristiques d'atomisation de la pulvérisation de carburant jouent un rôle important dans le processus de combustion [28].

Cependant, il est difficile de contrôler le système d'injection de carburant avec précision à proximité des conditions limites, qui affectent donc le taux de consommation de carburant et la réduction des émissions. Par exemple, une pression d'injection élevée réduit à la fois la taille des particules et les niveaux émis de PM, mais augmente les NO_x et le BSFC (Brake Specific Fuel Consumption). La mise en forme du taux d'injection peut réduire efficacement les NO_x, mais le taux d'injection avec une forme de rampe ou de botte s'accompagne toujours d'une augmentation de la formation de suie et de la consommation de carburant. L'avancement du calage de l'injection augmente les NO_x, mais réduit la consommation de carburant, les concentrations de CO, de HC et de fumée. Or une injection assez poussée peut engendrer des fumées importantes et des performances motrices médiocres. Par conséquent, la section suivante présente le système à rampe commune haute pression, grâce au contrôle précis des paramètres d'injection pour une meilleure conservation de l'énergie et une réduction des émissions.

Le système d'injection de carburant à rampe commune haute pression avec contrôle flexible peut atteindre la pression d'injection du système de contrôle libre et indépendant, le calage de l'injection, le volume d'injection et le taux d'injection de carburant qui sont

considérés comme la tendance actuelle du développement du système d'alimentation en carburant des moteurs diesel maritimes [29].

Le Tableau 4 donne un résumé des stratégies d'injection sur les performances et les émissions des moteurs marins.

Stratégie utilisée	Type de moteur	Alésage × Course (mm)	Numéro de cylindre	Vitesse (tr/min)	NOx
Calage d'injection →	6S35ME-B9	350 × 1550	6	142	↓
Calage d'injection →	Moteur à deux temps	340 × 1600	–	–	↓
Calage d'injection →	Moteur marin L21/31	210 × 310	6	900	↓
Temps d'injection ←	Moteur à quatre temps	160 × 200	6	1200	↑
Pression d'injection ↑	E2320	210 × 290	–	800/850	↑
Pression d'injection ↑	Moteur à deux temps	340 × 1550	6	142,5	↑
Post-injection	Moteur diesel à deux temps	350 × 1550	7	152	↓
↑ : augmentation ; ↓ : diminution ; ↑↓ : pas d'effet significatif ; -: Données non disponibles; ← : avance ; → : reporter					

2.2.2.4 Stratégie d'injection d'eau

La stratégie d'injection d'eau a été proposée comme une méthode efficace pour réduire les émissions de polluants en raison de son faible pouvoir calorifique, de ses caractéristiques d'évaporation et d'absorption de chaleur. Selon la littérature antérieure, l'introduction d'eau dans le mélange de combustion réduit la concentration en oxygène par unité de volume ou masse de charge. Ainsi, plus d'air est nécessaire pour atteindre la même teneur en oxygène, ce qui augmente le rapport air-carburant et diminue la température de combustion. De plus, l'injection d'eau dans le cylindre peut réduire la pression et la température de pointe, ce qui inhibe la génération de NOx à la source. En bref, les effets de l'injection d'eau peuvent être

divisés en quatre catégories de refroidissement, de dilution, d'effets thermiques et d'effets chimiques.

Selon le type d'injection d'eau, cette section aborde la technologie HAM (moteur à air humide) et la technologie DWI (injection directe d'eau), qui sont deux principales stratégies d'injection d'eau [30].

a) TECHNOLOGIE HAM

La technologie HAM (humid air motor) consiste à ajouter de la vapeur d'eau dans l'air de suralimentation initial au début de la compression, et le mélange homogène d'eau et d'air pénètre dans la chambre de combustion par les orifices d'admission (Figure10). HAM est une nouvelle technologie pour réduire les émissions des moteurs diesel, qui est largement utilisée dans les moteurs marins et testée avec succès dans un moteur marin pour la réduction des émissions. La technologie HAM peut réduire efficacement la température de la flamme locale et affecter la réaction chimique, le processus de transfert de chaleur et de masse dans le processus de combustion, la distribution du champ d'écoulement et la structure de la flamme, qui inhibent finalement la génération de NO_x thermique.

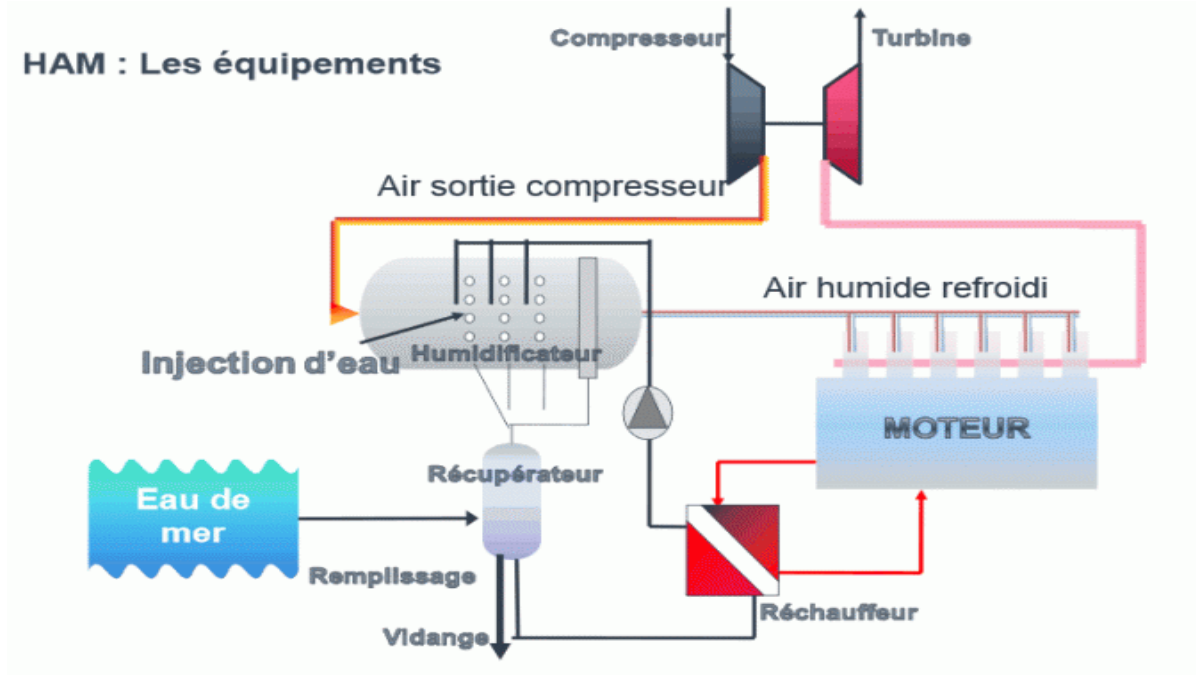


Figure 10 Technologie HAM (moteur à air humide) [31].

b) TECHNOLOGIE DWI

La technologie DWI (Direct Water Injection) a été largement utilisée sur les navires et peut atteindre avec succès des taux de réduction de NO_x élevés. La technologie DWI est plus efficace que la technologie HAM et l'émulsification du carburant pour réduire les émissions de NO_x . De même, l'effet de la DWI sur les émissions de NO_x peut être résumé en trois aspects : effet de dilution, effet thermique et effet chimique. En outre, la technologie DWI offre plus de flexibilité en termes d'injection d'eau à différents angles de manivelle.

Les chercheurs ont développé un système d'injection d'eau en temps réel pour les moteurs diesel lourds, par conséquent les émissions de NO_x ont été réduites de 42 %. De même, l'effet de la DWI sur les émissions d'un moteur diesel multi variable à grande échelle a été étudié, et les résultats expérimentaux montrent que la DWI diminue les émissions de NO_x . Pendant ce temps, ils ont conclu que de l'eau doit être fournie dans la zone de la flamme pour maximiser la réduction des NO_x lorsque ce polluant se forme [32].



Figure 11 . Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [20].

De plus, l'effet de différents teneurs en eau sur les performances, la combustion et les émissions dans un moteur diesel marin a été étudié expérimentalement par Ayhan et Ece (2020) . Les résultats expérimentaux montrent clairement que les émissions de NO_x ont atteint un taux de réduction de plus de 55% lorsque le taux d'eau est de 100%, comme présenté sur la Figure 12. (L'injection avait une teneur en eau de 10%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% de la masse de carburant, à savoir W10, W20, W40, W60, W80, W100, respectivement).

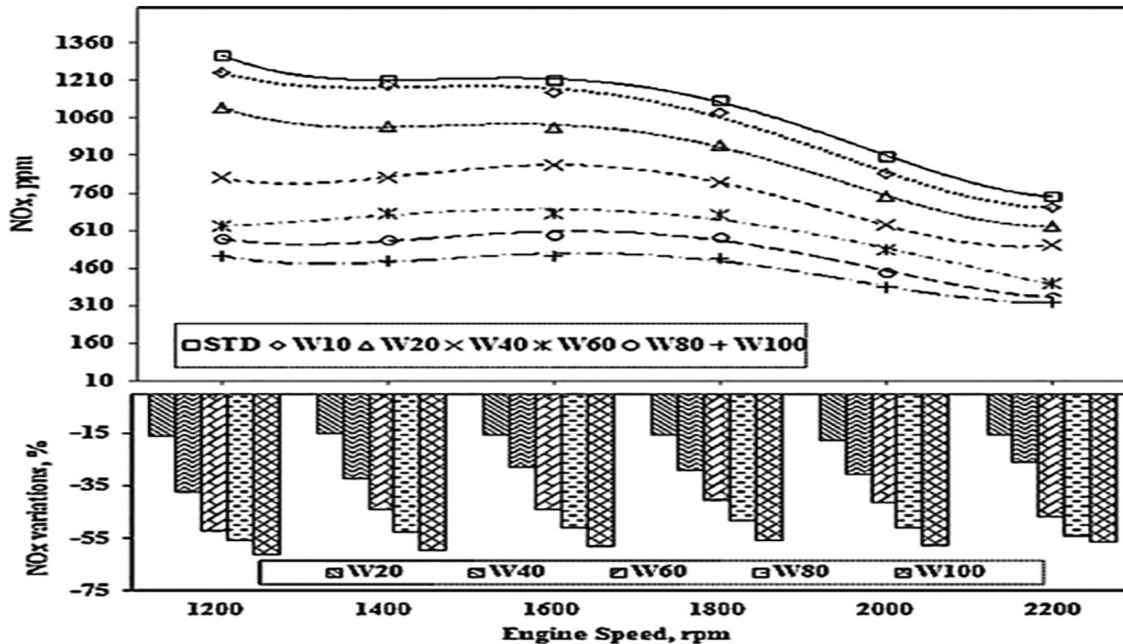


Figure 12. Système DWI Wärtsilä avec injecteur combiné eau/combustible [25].

Comparé à la technologie HAM, le principal avantage de DWI est le contrôle flexible de la teneur en eau et des distributions dans le cylindre au bon moment, ce qui peut ajuster les concentrations de carburant/air/eau dans la zone de combustion et diminuer la consommation de carburant et les émissions de NO_x. Par conséquent, le Tableau 5 donne une comparaison entre la technologie HAM et la technologie DWI.

Tableau 4 . Une comparaison entre la technologie HAM et la technologie DWI [25].

	Technologie HAM	Technologie DWI
Potentiel de réduction des NO_x	40%	50%
Taux de production de fumée	Moins	Suie
Consommation de carburant	Moyen	Haut
Consommation d'eau	Haut	Moyen
La qualité d'eau	Très propre	Commun
Maturité technologique	Pauvre	Bon
Modification du moteur	Moins compliqué	Plus compliqué
Système de contrôle des injections	Moins souple	Plus flexible
Coût	Moyen	Haut

2.2.2.5 Stratégie de combustion bi-carburant

D'après la discussion ci-dessus, on peut voir que le cycle de Miller entraînera une augmentation de la consommation de carburant, tandis que l'additif de carburant et la stratégie d'injection de carburant ne peuvent obtenir qu'une performance de réduction des émissions médiocre. Les moteurs à double carburant ont le potentiel de répondre aux exigences, car le gaz naturel est un carburant propre qui contribue à des niveaux relativement faibles de NO_x, PM, CO₂ et zéro SO_x. Le développement de ces dernières années a fait des moteurs à double carburant une solution alternative pour améliorer la rentabilité et respecter les réglementations environnementales. Au Japon, un moteur marin bicarburant à haute capacité de fonctionnement avec GNL (Gaz Naturel Liquéfié) a été appliqué et les résultats

expérimentaux ont montré que le NO_x, le CO₂ et les SO_x peuvent être réduits de 43%, 25% et 100%, respectivement (Watanabe, 2015) [33].

Les chercheurs ont étudié comment atteindre de très faibles émissions de NO_x et de gaz de combustion sans réduire l'efficacité thermique des moteurs à double carburant. Ils ont constaté que l'équilibre entre les NO_x et les gaz de combustion peut être considérablement amélioré à faible charge et à charge élevée grâce au pré-mélange de gaz naturel ou de méthanol avec une injection diesel minimale et un rapport EGR (Exhaust Gas Recirculation) élevé. Une enquête expérimentale sur les performances de la combustion bicarburant marine à différentes températures atmosphériques a également été étudiée. Les résultats ont suggéré que les performances du moteur étaient conformes à celles d'un moteur diesel conventionnel. De plus, par rapport au diesel pur, le moteur bicarburant a permis une réduction de 19% des émissions de CO₂. Il est également important de noter que le moteur bicarburant était considéré comme le premier moteur marin au Japon pouvant satisfaire aux limites de NO_x Tier III.

Cependant, le GNL doit être transformé à l'état gazeux avant d'être transporté vers les moteurs ce qui entraînera une température de combustion élevée des moteurs et des émissions plus élevées. Ces problèmes limitent les applications des moteurs à double carburant. De plus, le fonctionnement bicarburant ne montre sa supériorité que lorsque le GN (Gaz Naturel) est le combustible. En ce qui concerne le contrôle des émissions de NO_x, le moteur bicarburant est conforme à la réglementation sur les émissions de NO_x de niveau II de l'OMI en mode diesel et à la réglementation sur les émissions de niveau III en mode gaz.

En outre, il existe un autre problème avec les moteurs à gaz. Si le rapport air-carburant dans le cylindre est trop petit, cela peut entraîner un cognement du moteur. Si le rapport air-carburant est trop grand, cela entraînera des ratés. Par conséquent, le contrôle précis du moment, de la durée et de la quantité d'injection de gaz naturel sera un sujet brûlant pour les moteurs bicarburant [34].

2.2.3 Système de post-traitement des gaz d'échappement

Comme mentionné, les technologies d'optimisation du carburant et de contrôle de la précombustion sont propices à la réduction des émissions. Cependant, il est bien connu que les gaz d'échappement émis par les moteurs diesel marins contiennent une grande quantité de NO_x et de SO_x . Pour réduire les polluants éventuellement rejetés dans l'atmosphère, un système de post-traitement des gaz d'échappement a été créé ces dernières années. Parmi eux, l'EGR (Exhaust Gas Recirculation) et le SCR (Selective Catalytic Reduction) sont deux des technologies les plus efficaces pour réduire les émissions de NO_x pour la conformité à la législation OMI Tier III et devraient être les technologies de réduction des émissions de NO_x les plus réalisables.

Pendant ce temps, au cours des deux dernières décennies, la principale motivation pour le développement des moteurs est de réduire la consommation de carburant et les émissions, mais n'exerce aucun effet sur les performances du moteur. Heureusement, de nombreuses études montrent que les systèmes de post-traitement des gaz d'échappement peuvent réduire considérablement les émissions sans affecter les performances du moteur. Par conséquent, dans les sous-sections suivantes, ce document présentera l'EGR, le SCR et le SWFGD (Sea Water Flue Gas Desulfurization) qui sont identifiés comme trois systèmes de post-traitement des gaz d'échappement principaux.

2.2.3.1 Technologie EGR

L'EGR (Exhaust Gas Recirculation) est une technologie prometteuse et efficace pour la réduction des NO_x qui réduit les températures de combustion maximales en recirculant les gaz d'échappement pour augmenter la capacité thermique et diminuer la disponibilité de l'oxygène dans la chambre de combustion. La technologie EGR est couramment utilisée dans les moteurs diesel automobiles en raison de son potentiel élevé de réduction des NO_x , qui commence à faire son chemin dans les moteurs diesel à haute puissance et à vitesse moyenne.

En résumé, l'EGR a été mis en œuvre comme une stratégie de contrôle des NO_x car il a trois principaux effets de dilution, un effet thermique et un effet chimique sur la combustion dans le cylindre :

- Les gaz d'échappement réduisent la concentration d'oxygène dans l'admission, ce qui modifie le rapport équivalent de combustion dans le cylindre, entraînant une réduction du taux de combustion et de la température.
- Les gaz d'échappement augmentent la capacité thermique spécifique entraînant la diminution de la température des gaz dans le cylindre à volume constant, inhibant ainsi la production de NO thermique.
- Les gaz d'échappement entraînent une réaction chimique ($2\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{O}_2$) affectant le processus de combustion du carburant [35].

2.2.3.2 Technologie SCR

La réduction catalytique sélective (SCR) comprend l'injection d'eau urée dans les gaz d'échappement et l'utilisation de la chaleur des gaz d'échappement pour produire de l'ammoniac (NH₃). Celui-ci est ensuite mis à réagir avec le NO_x sur un catalyseur pour décomposer le NO_x en azote et eau inoffensifs. Le SCR peut fonctionner comme une technologie autonome (ne nécessitant aucun appareil supplémentaire) et est capable de réduire les NO_x de 80 % ou plus. Il est déjà largement utilisé sur terre en raison de son haut niveau de fiabilité et de durabilité.

Plusieurs réactions chimiques peuvent se produire dans les systèmes SCR. Les principales réactions sont les réactions d'oxyde nitreux, d'ammoniac et d'oxygène pour produire de l'azote et de l'eau.

2.2.3.3 Système d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers)

Le système d'épuration des gaz d'échappement (scrubber) est un dispositif installé à bord des navires qui réduit les oxydes de soufre nocifs des gaz d'échappement.

Les épurateurs permettent aux navires de consommer du mazout à haute teneur en soufre (HSFO) moins cher tout en respectant les niveaux d'émissions prescrits. Les navires dotés d'une technologie d'épuration seront en mesure de consommer du carburant à haute teneur en soufre avec une réduction significative par rapport au carburant à faible teneur en soufre. Cela est particulièrement vrai car les options à faible teneur en soufre devraient avoir un prix élevé en raison de l'augmentation de la demande. La [Figure 13](#) montre les composants de base du système d'épuration des gaz d'échappement [36].

Trois types d'épurateurs sont les plus courants : ouverts, fermés et hybrides :

- Les épurateurs à boucle ouverte absorbent l'eau de mer pour le processus de nettoyage. Après épuration des gaz d'échappement, l'eau est traitée et libérée. Sa composition naturelle en eau aide à neutraliser les effets des oxydes de soufre.
- Les systèmes en boucle fermée utilisent de l'eau douce traitée avec des produits chimiques alcalins pour imiter les effets neutralisants de l'eau de mer. Cette eau est réutilisée à plusieurs reprises, ajoutant de l'eau supplémentaire au processus au fur et à mesure que la combustion naturelle se produit. Cette eau est envoyée vers des stations d'épuration avant d'être rejetée dans l'océan.
- Les épurateurs hybrides peuvent fonctionner comme des systèmes en boucle ouverte ou fermée et peuvent être capables de fluctuer entre l'eau douce et l'eau de mer.

Ces deux dernières technologies (SCR et Scrubber) seront présentées avec plus de détails dans la partie suivante.

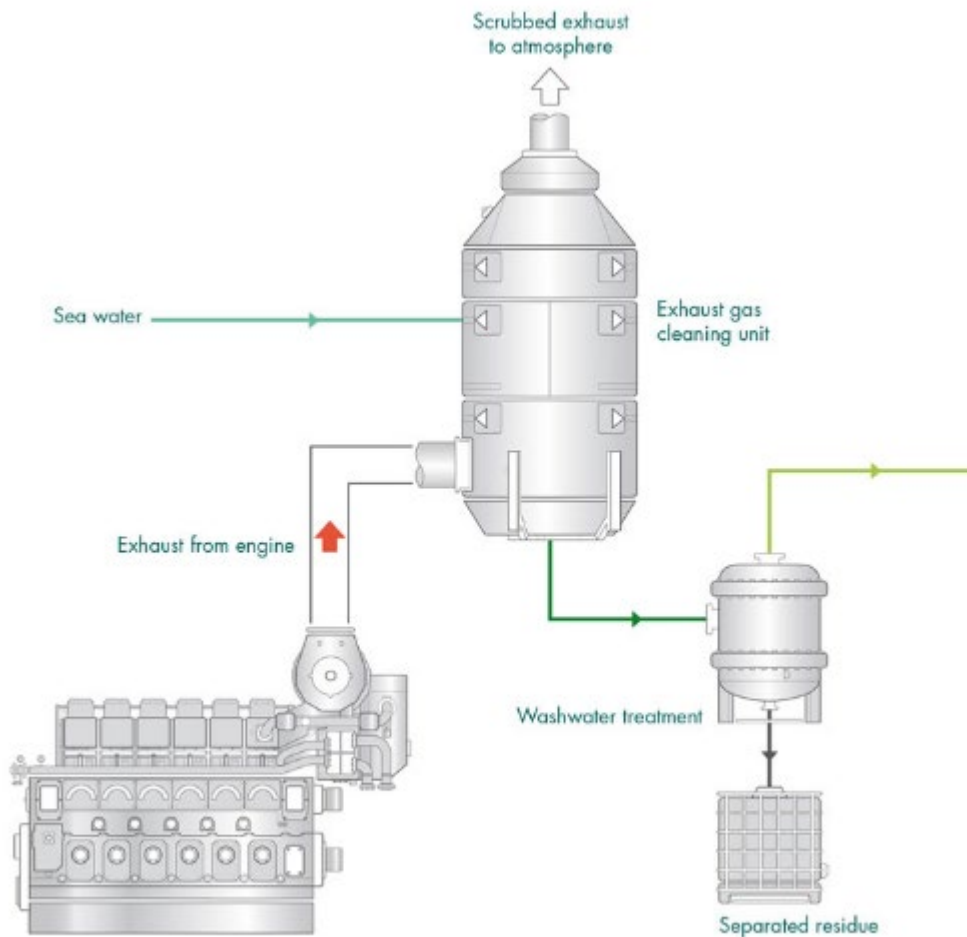


Figure 13 . Composants de base du système d'épuration des gaz d'échappement [36].

2.3 LA REDUCTION DES EMISSIONS DU NO_x PAR LA TECHNOLOGIE SCR

2.3.1 Les oxydes d'azote NO_x

Les oxydes d'azote, en anglais Nitrogen Oxides, sont des formes oxydées de l'azote - combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air. On désigne sous le terme générique NO_x le NO, oxyde azotique ou monoxyde d'azote, et le NO₂, peroxyde ou dioxyde d'azote, en majorité présents dans l'atmosphère. Mais il existe d'autres oxydes d'azote tels que le protoxyde d'azote (N₂O), gaz à effet de serre, l'acide nitrique (HNO₃) entrant dans la

composition des pluies acides, le diazote pentoxyde (N_2O_5) et de nombreux nitrates organiques. L'azote, à l'origine des NO_x produits, provient de l'air qu'on utilise pour la combustion dans les moteurs diesel marins par exemple, mais également du combustible utilisé dans ces mêmes moteurs (on a alors oxydation d'un produit azoté). En effet, l'azote, gaz incolore et inodore constitue un peu plus des trois quarts du volume de notre atmosphère. Or la faible réactivité de l'azote disparaît souvent par élévation de température ou sous l'effet de catalyseurs. Les oxydes d'azote sont ainsi essentiellement émis lors des phénomènes de combustion dans les processus industriels, mais sont aussi liés à des processus chimiques dans l'atmosphère et dépendent donc aussi des conditions météorologiques et de l'ensoleillement [37].

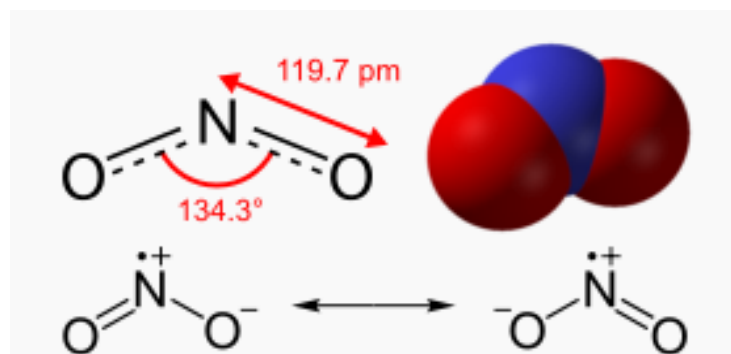


Figure 14 . Structure du dioxyde d'azote.

Suite à l'analyse de la combustion dans les cylindres moteurs on a pu identifier trois sources principales de formation d'oxydes d'azote. En effet, la formation de NO_x se fait, au cours de la combustion, selon trois chemins réactionnels:

- Formation thermique des NO_x par réaction de l'azote et de l'oxygène de l'atmosphère à haute température : “ NO_x thermique”. Il est à noter que l'azote et l'oxygène représentent 99% de la composition de l'air en entrée moteur.
- Oxydation des dérivés azotés contenus dans les carburants : “ NO_x carburants”.

- Réaction des intermédiaires hydrocarbures oxydés formés au cours de la combustion avec l'azote atmosphérique: "NO_x rapides".

2.3.1.1 NO_x thermique

La majorité de NO est formée par réaction entre l'azote et l'oxygène :



Il s'agit donc d'une réaction en chaîne des atomes O et N activés. La quantité de NO produit dans la combustion dépend de la quantité de N₂ et d'O₂ présents dans les produits de la combustion et de la température. Elle n'est pas directement liée à la nature du combustible.

Ainsi, la formation de NO_x thermique est rapide dans les zones de flamme où la température est élevée et où la concentration en hydrocarbures est faible. C'est pourquoi on cherchera à limiter la température pendant la combustion dans un milieu moins riche en oxygène [33].

2.3.1.2 NO_x carburant

Les dérivés azotés des hydrocarbures sont la source principale des NO_x lors de la combustion des pétroles lourds (l'azote est notamment présent à hauteur d'environ 0,5% dans les Heavy Fuel Oil - residual oil - utilisés dans les moteurs diesel marins). La formation des NO_x est décrite de la manière suivante :



Dans les conditions d'atmosphère réductrice, les composés hydrocarbures azotés localisés autour des particules ou des gouttelettes enflammées sont transformés en composés azotés tels que HCN (cyanure d'hydrogène) ou NH₃ (ammoniac). Ces derniers sont alors rapidement oxydés en NO. C'est donc dans les zones riches en combustible proches du front de flamme que l'azote du combustible est oxydé en NO [34].

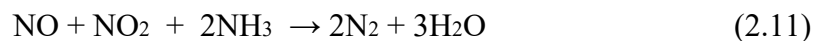
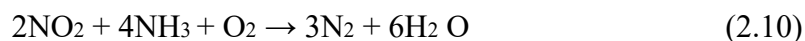
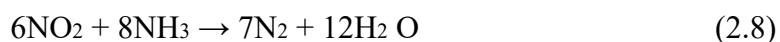
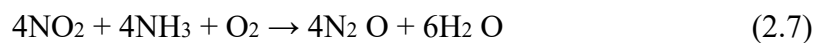
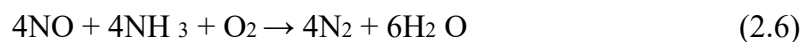
2.3.1.3 NO_x rapides

Les fragments hydrocarbonés tels que CH, CH₂ peuvent réagir avec l'azote de l'air dans des conditions réductrices (riches en hydrocarbures) pour former des espèces telles que HCN, H₂CN, et CN (composés organiques azotés) qui sont oxydées en NO. Ce mécanisme n'est responsable que de la formation d'une faible partie de l'ensemble des NO_x, mais le contrôle de cette réaction est important lorsqu'on cherche à atteindre les taux d'émissions de NO_x les plus bas possibles. La formation de NO₂ peut également avoir lieu en sortie moteur, dans la ligne d'échappement, où les températures sont plus basses, suivant l'équation :



2.3.2 Réduire les émissions de NO_x par la technologie SCR

Actuellement, le système SCR avec urée et ammoniac est largement utilisé dans les gros moteurs diesel stationnaires. La réaction chimique du système SCR est basée sur l'équation de réaction suivante :



Plusieurs réactions chimiques peuvent se produire dans les systèmes SCR. Les principales réactions sont les réactions d'oxyde nitreux, d'ammoniac et d'oxygène pour produire de l'azote et de l'eau comme le montre la [Figure 15](#).

Récemment, la technologie SCR a été reconnue comme une méthode mature et standard, qui peut satisfaire à la norme de niveau III. De plus, le SCR est la seule technologie approuvée par l'OMI pour réduire les émissions de NO_x de divers moteurs diesel marins. Bien que le système SCR ait une grande taille, cette technologie peut réduire efficacement les émissions de NO_x des moteurs diesel marins, tandis que les systèmes SCR sont efficaces sur une large plage de températures pour réduire les émissions de NO_x pendant les opérations riches et pauvres.

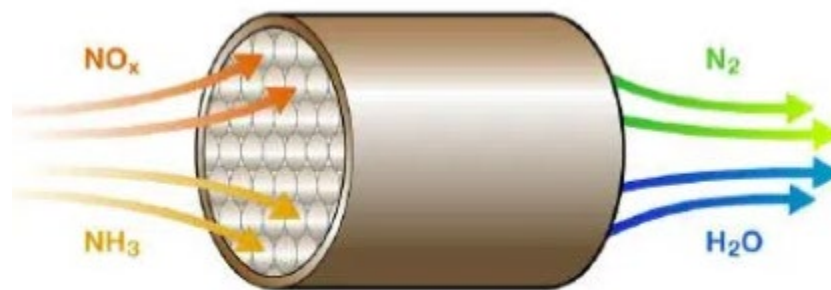


Figure 15 . Technologie de réduction catalytique sélective (SCR) [38].

2.4 L'ABBAT DU SO_x PAR LE SYSTEME D'EPURATION DES GAZ D'ECHAPPEMENT

2.4.1 Oxyde de soufre SO_x

La famille des oxydes d'azote couramment regroupé sous la formule NO_x et comprenant les composés suivants : le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2), le protoxyde d'azote (N_2O), le tétraoxyde de diazote (N_2O_4), le trioxyde d'azote (N_2O_3) comme illustre la Figure 16.

Les oxydes de soufre (SO_x) sont des composés de molécules de soufre et d'oxygène. Le dioxyde de soufre (SO_2) est la forme prédominante trouvée dans la basse atmosphère. L'oxyde de soufre est le terme commun pour de nombreux types de composés contenant du soufre et de l'oxygène tels que :

- Oxydes de soufre inférieurs ($\text{S}_n \text{O}$, $\text{S}_7 \text{O}_2$ et $\text{S}_6 \text{O}_2$)

- Monoxyde de soufre (SO)
- Anhydride sulfureux (SO₂)
- Trioxyde de soufre (SO₃)
- Oxydes de soufre supérieurs (SO₃ et SO₄ et leurs condensats polymères)
- Monoxyde de disoufre (S₂O)
- Anhydride sulfureux (S₂O₂)

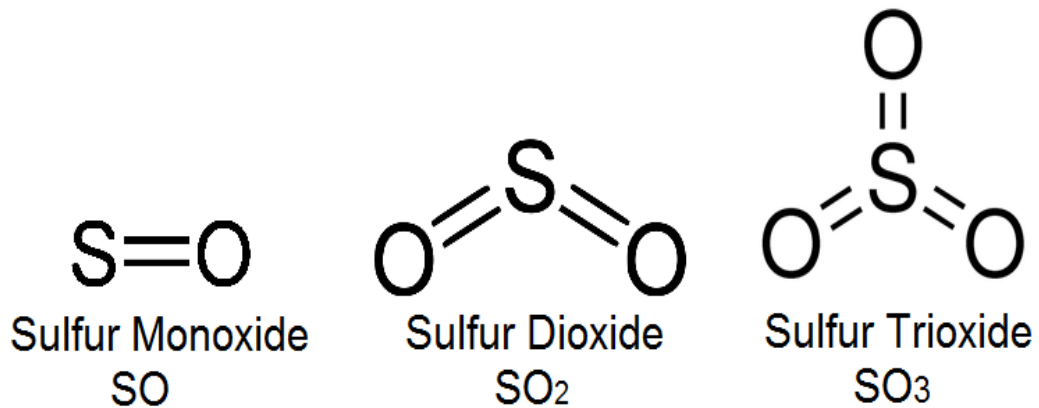


Figure 16 . Oxyde de soufre SO_x.

Ces molécules sont incolores, mais ont une odeur et un goût très distincts et forts qui peuvent être détectés lorsque le gaz est à forte concentration.

Le monoxyde de soufre, SO, est un composé courant d'oxyde de soufre que l'on trouve rarement en dehors de l'espace. Lorsqu'il est concentré ou condensé, il devient S₂O₂ ou dioxyde de disulfure. Dans des conditions de laboratoire extrêmes, le monoxyde de soufre peut être produit en traitant le dioxyde de soufre avec des vapeurs de soufre dans une décharge lumineuse.

L'émission d'oxydes de soufre est due à la présence de composés soufrés dans les carburants marins utilisés dans les moteurs marins à bord des navires. Plus la qualité est élevée, plus la teneur en soufre sera faible car il est éliminé par le raffinage du carburant.

La fumée contenant des oxydes de soufre émise par la combustion du carburant marin s'oxydera davantage et, en présence de catalyseur comme le NO_2 , formera de l'acide sulfurique qui est une cause majeure des pluies acides.

2.4.2 Dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers)

Les épurateurs, ou le terme technique, systèmes d'épuration des gaz d'échappement (EGCS) ou épurateurs de SO_x sont utilisés pour éliminer les éléments nocifs des gaz d'échappement. Avec des règles strictes à partir de 2020, les navires mettent en œuvre des systèmes d'épuration des gaz d'échappement destinés à réduire le soufre.

Ces systèmes d'épuration ont été développés et utilisés pour traiter les gaz d'échappement des moteurs, des moteurs et des chaudières, des navires à terre et à bord, afin de garantir qu'aucun dommage ne soit causé à la vie humaine et à l'environnement par des produits chimiques toxiques.

Il existe trois types d'épurateurs de gaz d'échappement : en boucle ouverte, en boucle fermée et hybride.

2.4.2.1 Systèmes d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte

L'épurateur de SO_x à boucle ouverte utilise de l'eau de mer pour neutraliser les SO_x des gaz d'échappement.

Les épurateurs à boucle ouverte pompent l'eau de mer dans l'épurateur et rejettent les eaux de lavage dans la mer. L'eau de mer est utilisée comme moyen de lavage pour nettoyer les gaz d'échappement. Ce procédé simple exploite l'alcalinité naturelle de l'eau de mer pour absorber les SO_x .

Généralement, les systèmes d'eau de mer ouverts utilisent $45\text{m}^3/\text{MWh}$ pour le lavage.

La Figure 17 montre les composants de base du système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte.

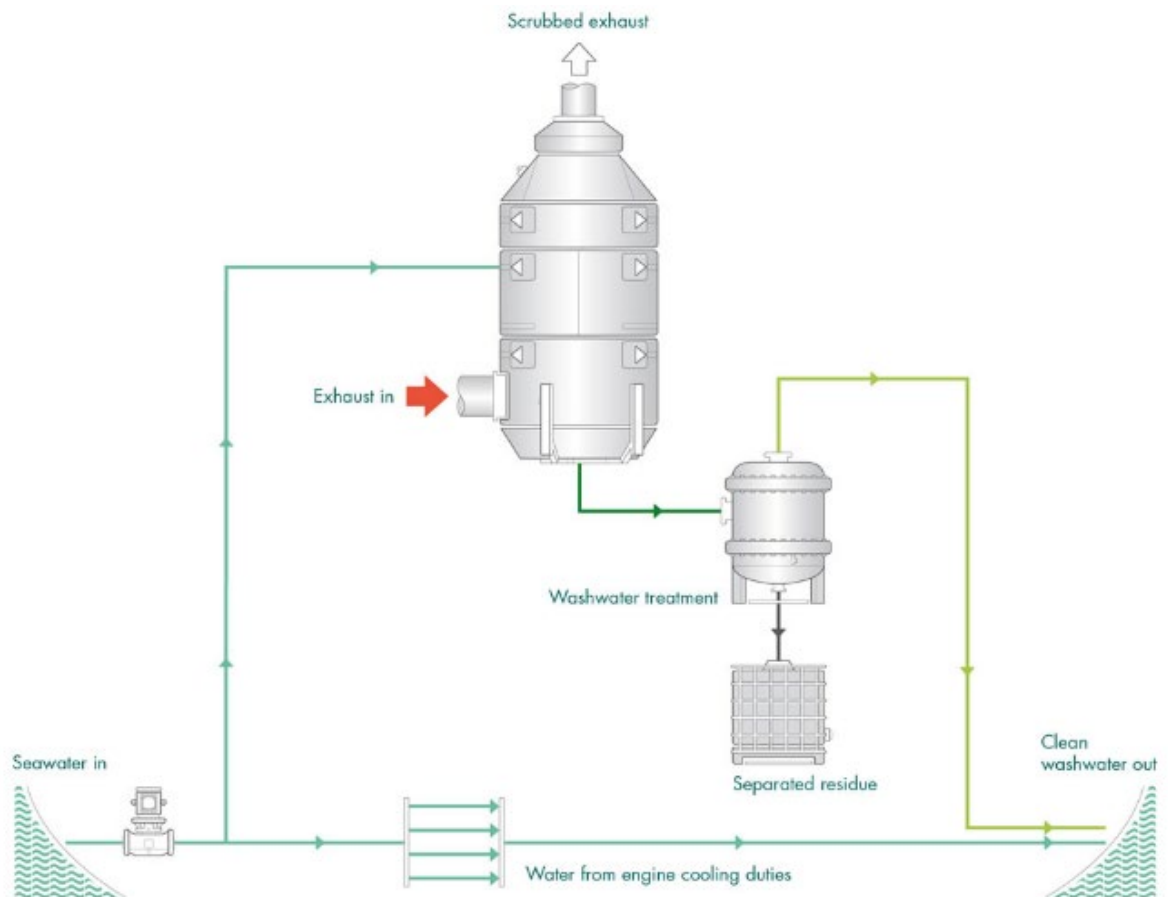


Figure 17 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouvert [36].

2.4.2.2 Systèmes d'épuration des gaz d'échappement en boucle fermée

Le système peut être de type "fermé", dans lequel l'eau douce traitée avec un produit chimique alcalin tel que la soude caustique qui est utilisée pour la neutralisation et le lavage. L'eau de lavage est recirculée et toute perte est compensée par de l'eau douce supplémentaire. Une petite quantité d'eau de lavage est évacuée vers une station d'épuration avant d'être rejetée en mer. Les systèmes d'eau douce généralement fermés ont un débit de

décharge de 0,1 à 0,3 m³/MWh bien que le système illustré puisse fonctionner sans décharge pendant des périodes limitées [39].

La Figure 18 montre les composants de base du système d'épuration des gaz d'échappement en boucle fermée.

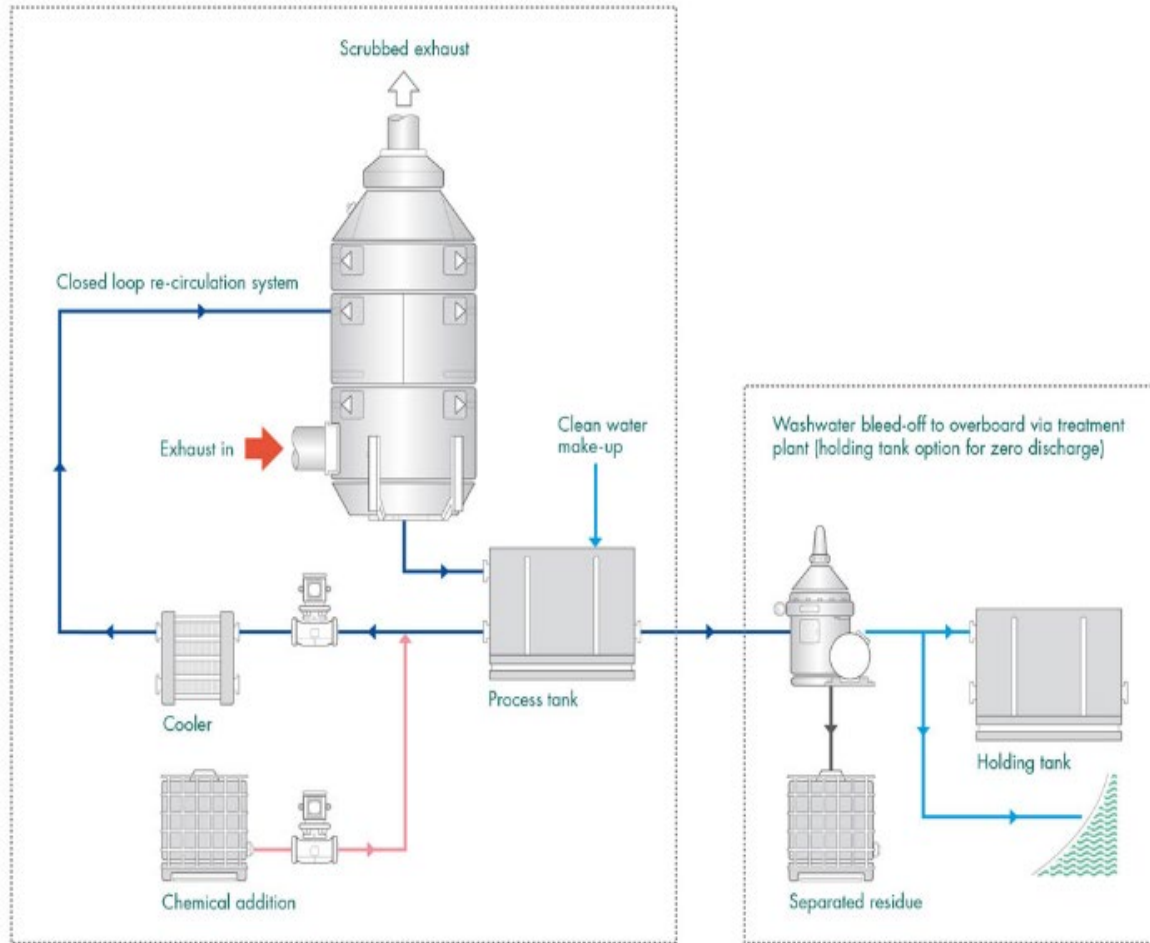


Figure 18 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle fermée [36].

2.4.2.3 Systèmes d'épuration des gaz d'échappement hybrides

Les systèmes hybrides peuvent fonctionner en mode boucle ouverte ou fermée.

- En mode boucle ouverte, l'eau de mer est pompée du coffre à la mer à travers l'épurateur et rejetée à la mer. L'alcalinité naturelle de l'eau de mer neutralise l'eau rejetée. Une surveillance continue à l'entrée et à la sortie garantit que la qualité de l'eau rejetée est bien dans les limites réglementaires et a un impact minimal sur les ports, les environnements marins et la vie aquatique (Figure19).
- En mode boucle fermée, l'eau est recirculée à travers l'épurateur, avec une petite quantité de purge prélevée de la boucle pour le traitement. L'eau est traitée en ajoutant une petite quantité d'alcali et en éliminant les particules. L'eau traitée peut être évacuée ou dirigée vers un réservoir de rétention lorsqu'elle se trouve dans des zones à rejet nul (Figure 20).

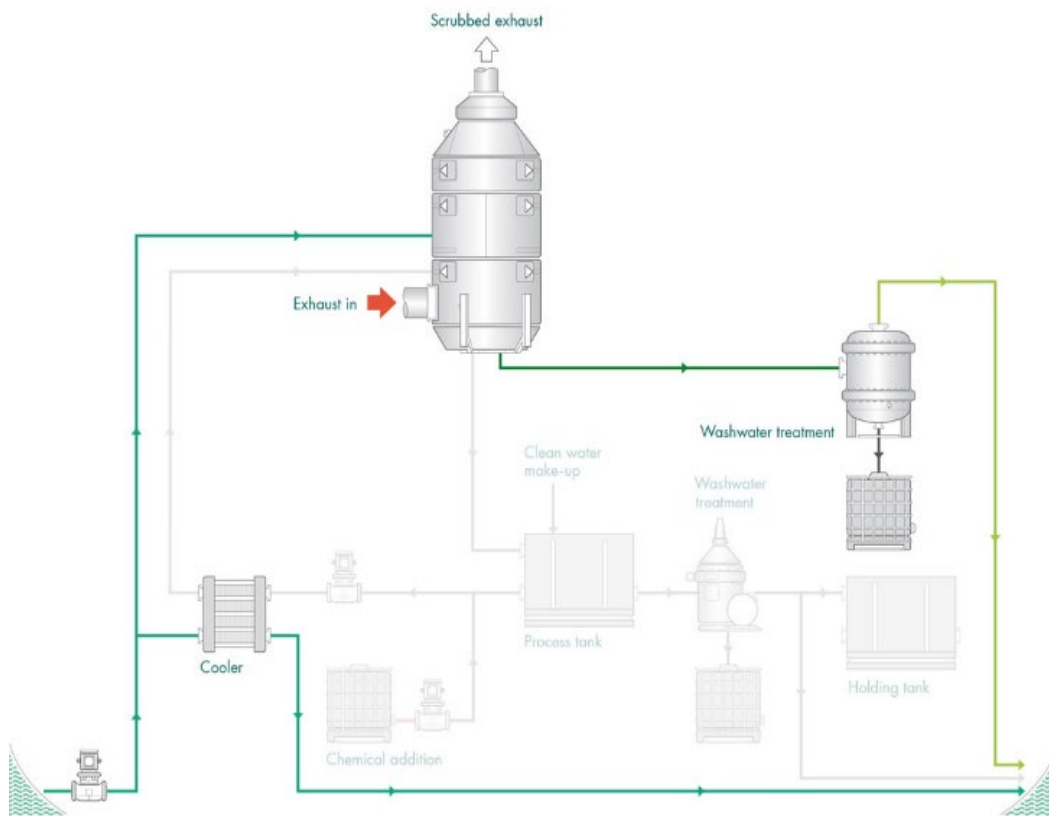


Figure 19 . Fonctionnement en boucle ouverte du système d'épuration des gaz d'échappement hybride [36].

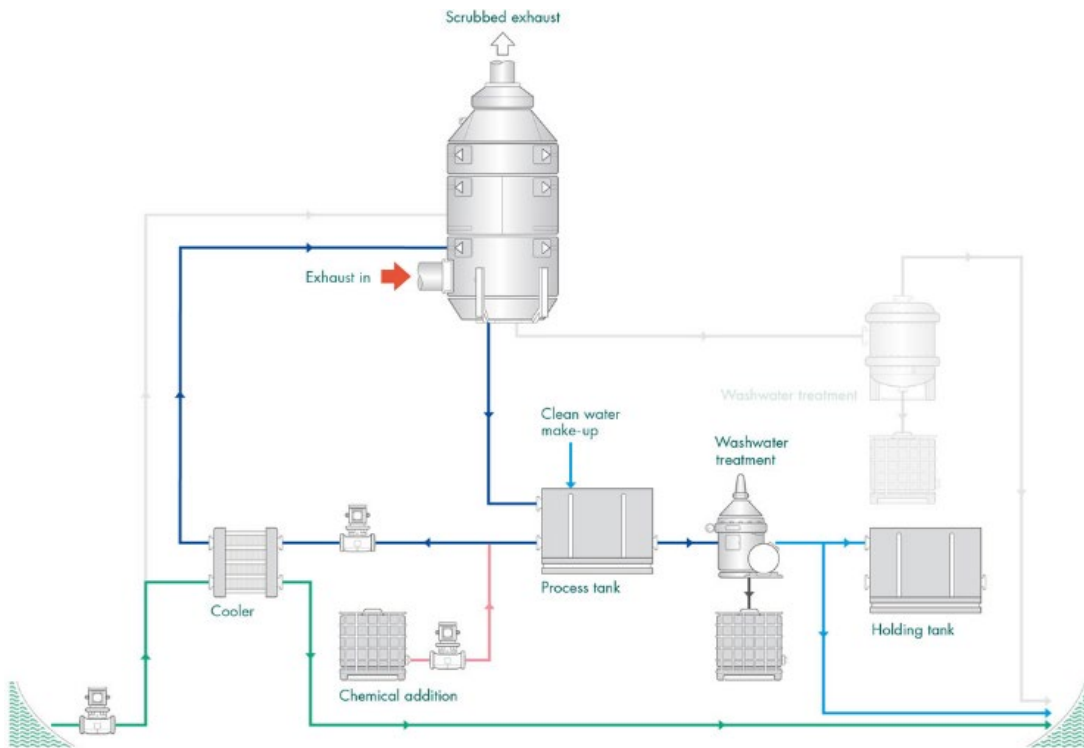


Figure 20 . Fonctionnement en boucle fermée du système d'épuration des gaz d'échappement hybride [36].

2.4.3 Réduire les émissions de SO_x par le système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte

L'OMI et les autorités de protection de l'environnement du monde entier ont recommandé que la technologie d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte soit une solution viable pour éliminer une multitude d'émissions de SO_x des moteurs diesel marins.

Récemment, de nombreux systèmes d'épuration par voie humide pour l'élimination des SO_x à l'aide d'eau de mer ont été utilisés avec succès sur les navires. De plus, dans des conditions optimales, les taux d'élimination maximum des NO_x et SO₂ émis par les navires simulés étaient respectivement de 92% et 100%.

Le lavage à l'eau de mer est une technique fiable pour désulfurer les gaz de combustion dans les applications marines en raison de la grande disponibilité et des propriétés chimiques

favorables. Par rapport aux épurateurs traditionnels à la chaux ou au calcaire, les principaux avantages des épurateurs humides sont qu'ils ne contiennent aucun produit chimique et sont moins susceptibles de boucher et de tartre les buses. Deuxièmement, en raison de la faible concentration d'hydroxydes et de carbonates dans l'eau de mer et de la forte corrosion, un débit plus élevé est nécessaire pour satisfaire aux exigences.

Enfin, l'utilisation de l'alcalinité inhérente de l'eau de mer peut absorber et neutraliser le dioxyde de soufre des gaz d'échappement. Ainsi, une technique réalisable et économiquement viable consiste à utiliser l'eau de mer au lieu de produits chimiques comme solutions d'absorption.

La principale réaction chimique dans le système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte est illustrée à la Figure 21.

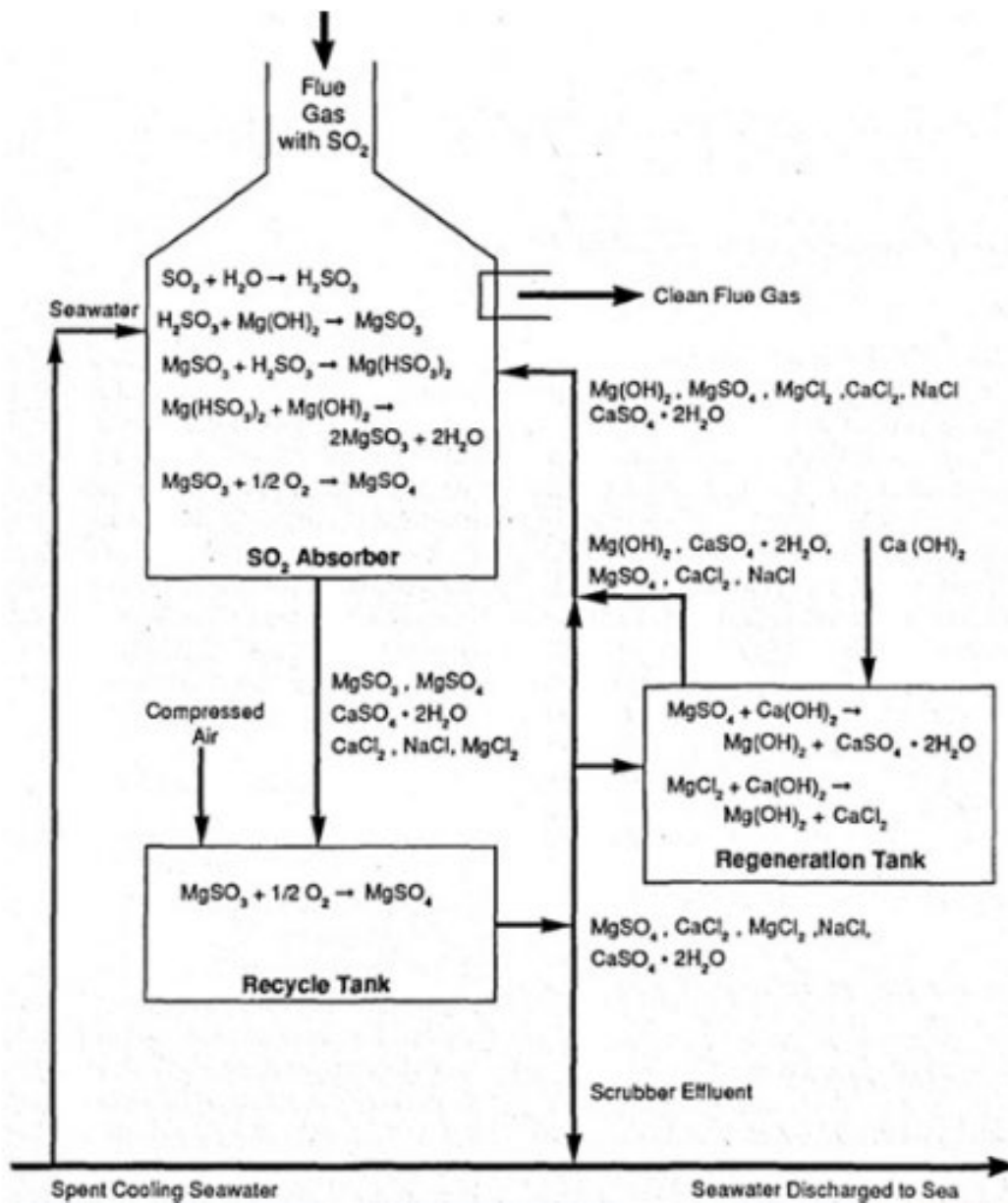


Figure 21 . Système d'épuration des gaz d'échappement en boucle ouverte à l'eau de mer - principales réactions chimiques [40].

CHAPITRE 3

MODELISATION DE L'EPURATION DU SO₂ A L'EAU DE MER DANS DES COLONNES A GARNISSAGE A CONTRE-COURANT HAUTE PERFORMANCE

3.1 INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est de créer un modèle mathématique 3D de l'épuration du SO₂ à l'eau de mer dans des colonnes à garnissage à contre-courant avec des garnissages à haute performance basé sur les équations macroscopiques de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et d'équilibre des espèces moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse.

Le modèle 3D d'épuration de l'eau de mer qui relie les équations macroscopiques de continuité et d'équilibre de quantité de mouvement moyennées en volume avec les équations d'équilibre des espèces et de la chaleur dans les phases liquide et gazeuse a été résolu dans Aspen Custom Modeler.

Ce travail est proposé d'analyser le SO₂ et le CO₂ (gaz coexistant) lors du lavage à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins dans des réacteurs à colonnes à lit fixe avec des garnissages aléatoires Raschig super-Rings (quatrième génération). L'approche utilisée intègre l'hydrodynamique, les processus de transport de masse et d'énergie, la réaction chimique et la thermodynamique à travers un modèle eulérien 3D basé sur des équations macroscopiques de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et d'équilibre d'espèces moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse.

3.2 MODELISATION PAR ASPEN CUSTOM MODELER

Aspen Custom Modeler est un moyen puissant de créer rapidement des modèles rigoureux d'équipements de traitement et d'appliquer ces modèles pour simuler et optimiser

des processus continus. Il est à la fois un environnement de développement de modèles et de modélisation de flux. Aspen Custom Modeler est un logiciel de simulation de procédés largement utilisé dans l'industrie. Compte tenu d'une conception de processus et d'une sélection appropriée de modèles thermodynamiques, ASPEN utilise des modèles mathématiques pour prédire les performances du processus.

Les avantages de Aspen Custom Modeler :

- Un outil de modélisation ayant notamment trait à la conception, à l'optimisation et au suivi des performances des procédés pétrochimiques, gaziers et de séparation d'air.
- Très utile à usage pratique sur les modèles thermodynamiques.
- Construire des modèles pour en faire des schémas de simulation complets.
- Exécuter des simulations statiques et dynamiques.
- Un langage pour la saisie directe d'équations différentielles temporelles à utiliser dans des modèles dynamiques et des équations différentielles partielles pour la modélisation de systèmes distribués.

Les outils de simulation d'Aspen comprennent des bibliothèques complètes de modèles d'opérations unitaires qui ont été utilisées pour simuler avec succès des milliers de processus.

3.3 GEOMETRIE ET CONDITIONS INITIALES

La longueur totale du réacteur de l'entrée à la sortie est de 1,85 m avec un diamètre de 0.3m, la zone spécifique de garnissage est de $305 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et la zone spécifique de conditionnement est de $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Au niveau de la paroi du réacteur, des conditions aux limites sans glissement ont été supposées pour les phases gaz et liquide. Initialement, aucun liquide n'était présent à

l'intérieur du réacteur. Les vitesses initiales des phases gazeuse et liquide ont été fixées à zéro.

3.4 MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

L'écoulement à contre-courant gaz-liquide dans un réacteur à colonnes à lit fixe aléatoire (Fig 22) a été modélisé via un modèle dynamique 3D eulérien gaz-liquide. Le liquide incompressible et le gaz parfait étaient newtoniens visqueux. La surface des garnissages a été supposée partiellement mouillée par la phase liquide.

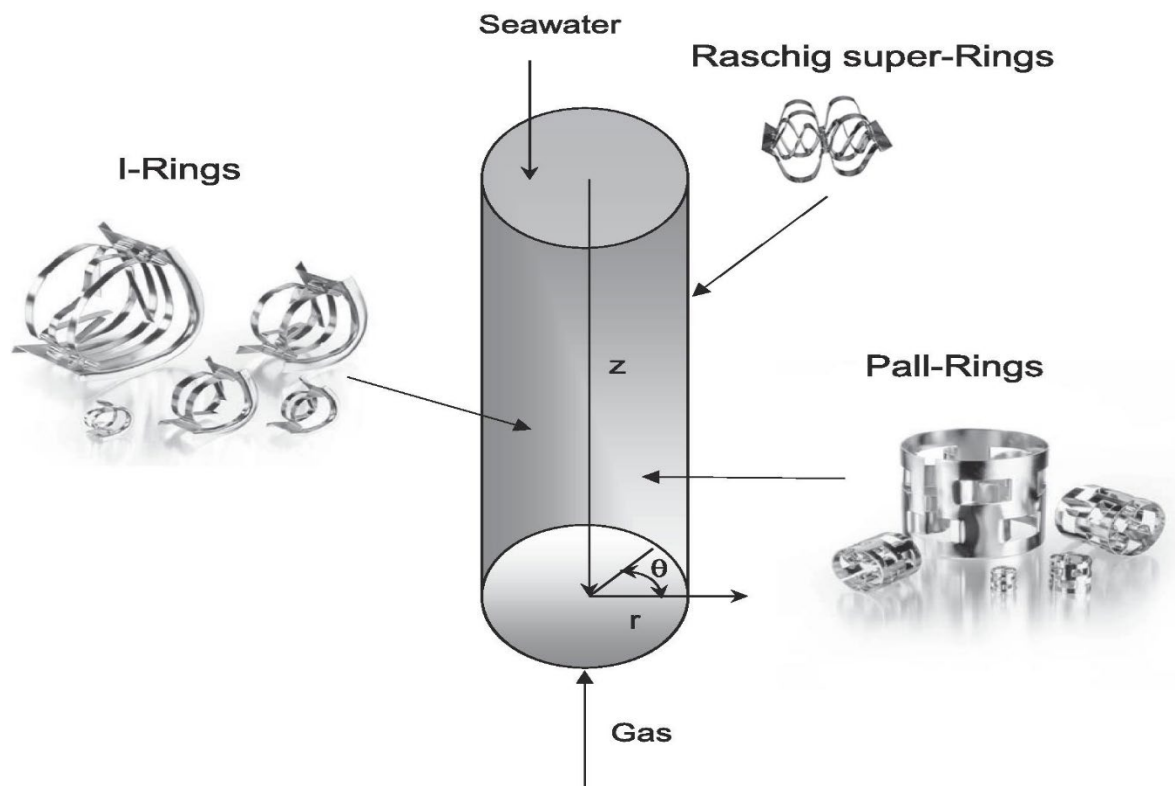


Figure 22 . Configuration du lit garni.

Le modèle dynamique 3-D eulérien à deux phases implique les équations de continuité et d'équilibre de quantité de mouvement moyennées en volume dans un lit tassé uniformément aléatoire.

Les forces de traînée interphase ont été évaluées via le modèle d'écoulement à double fente qui représente la configuration réelle de l'écoulement à contre-courant gaz-liquide dans un lit à garnissage via deux fentes sèches et humides. La dispersion des phases liquide et gazeuse se reflète dans les forces mécaniques de dispersion.

Les équations de continuité et d'équilibre de quantité de mouvement en 3D sont :

- Équations de continuité et d'équilibre de quantité de mouvement pour le liquide:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\ell \varepsilon_\ell) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell \theta}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell z}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell z}) + \frac{u_{\ell \theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell z}) + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell z}) = -\varepsilon_\ell \frac{\partial P_\ell}{\partial z} \\ + \mu_\ell^{ef} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^* \frac{\partial(\varepsilon_\ell u_{\ell z})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell z})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell z})}{\partial z^2} \right] + \varepsilon_\ell \rho_\ell g + f_{\text{int},\ell z} + F_{d,\ell z}^m \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell r}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell r}) + \frac{u_{\ell \theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell r}) - \rho_\ell \frac{u_{\ell \theta}^2 \varepsilon_\ell}{r} + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell r}) = -\varepsilon_\ell \frac{\partial P_\ell}{\partial r} \\ + \mu_\ell^{ef} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \varepsilon_\ell u_{\ell r})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell r})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell r})}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial(\varepsilon_\ell u_{\ell \theta})}{\partial \theta} \right] + f_{\text{int},\varepsilon r} + F_{d,\ell r}^m \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell \theta}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell \theta}) + \frac{u_{\ell \theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell \theta}) + \rho_\ell \frac{u_{\ell \theta} u_{\ell r} \varepsilon_\ell}{r} + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z}(\rho_\ell \varepsilon_\ell u_{\ell \theta}) = \\ -\frac{\varepsilon_\ell}{r} \frac{\partial P_\ell}{\partial \theta} + \mu_\ell^{ef} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \varepsilon_\ell u_{\ell \theta})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell \theta})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(\varepsilon_\ell u_{\ell \theta})}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial(\varepsilon_\ell u_{\ell r})}{\partial \theta} \right] + f_{\text{int},\ell \theta} + F_{d,\ell \theta}^m \end{aligned} \quad (3.4)$$

- Équations de continuité et d'équilibre de quantité de mouvement pour le gaz :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g \varepsilon_g u_{gz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g \varepsilon_g u_{gr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_g \varepsilon_g u_{g\theta}) = 0 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon_g u_{gz}) + u_{gr} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g \varepsilon_g u_{gz}) + \frac{u_{g\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho_g \varepsilon_g u_{gz}) + u_{gz} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g \varepsilon_g u_{gz}) = -\varepsilon_g \frac{\partial P_g}{\partial z} \\ + \mu_g^{ef} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial (\varepsilon_g u_{gz})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{gz})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{gz})}{\partial z^2} \right] + \varepsilon_g \rho_g g + f_{ini,g,z} + F_{d,g,z}^m \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon_g u_{gr}) + u_{gr} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g \varepsilon_g u_{gr}) + \frac{u_{g\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho_g \varepsilon_g u_{gr}) - \rho_g \frac{u_{g\theta}^2 \varepsilon_g}{r} + u_{gz} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g \varepsilon_g u_{gr}) = \\ -\varepsilon_g \frac{\partial P_g}{\partial r} + \mu_g^{ef} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \varepsilon_g u_{gr})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{gr})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{gr})}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial (\varepsilon_g u_{g\theta})}{\partial \theta} \right] + f_{int,g,r} + F_{d,g,r}^m \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon_g u_{g\theta}) + u_{gr} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g \varepsilon_g u_{g\theta}) + \frac{u_{g\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho_g \varepsilon_g u_{g\theta}) + \rho_g \frac{u_{g\theta} u_{gr} \varepsilon_g}{r} + u_{gz} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g \varepsilon_g u_{g\theta}) = \\ -\frac{\varepsilon_g}{r} \frac{\partial P_g}{\partial \theta} + \mu_g^{ef} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \varepsilon_g u_{g\theta})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{g\theta})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 (\varepsilon_g u_{g\theta})}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial (\varepsilon_g u_{gr})}{\partial \theta} \right] + f_{int,g,\theta} + F_{d,g,\theta}^m \end{aligned} \quad (3.8)$$

- Équation de conservation du volume :

$$\varepsilon_\ell + \varepsilon_g = \varepsilon \quad (3.9)$$

Des conditions de Dirichlet ont été appliquées à l'entrée et à la sortie du lit tassé. Des conditions aux limites sans glissement ont été utilisées au mur. Les vitesses radiales à l'axe de la colonne ont été approximées avec la méthode de la moyenne diamétrale d'Eggels basé sur le champ d'écoulement gaz-liquide adjacent. La condition aux limites de glissement libre a été utilisée pour l'évaluation des variables supplémentaires de la ligne centrale.

Les forces d'interaction exercées sur les deux phases dans des conditions de garnissage partiellement mouillées ont été générées à l'aide du modèle hydrodynamique à deux zones et à deux fluides.

Les forces de traînée moyennées en volume sont:

$$F_{\ell_s z}(r, \theta) = \left\{ \frac{E_1}{36} \frac{a_s^2 \mu_\ell f_e}{\varepsilon_\ell^2} + \frac{E_2}{6} \frac{a_s}{\varepsilon_\ell} \rho_\ell \sqrt{u_{\ell z}^2 + u_{\ell r}^2 + u_{\ell \theta}^2} \right\} u_{\ell z}(r, \theta) \varepsilon_\ell \quad (3.10)$$

$$F_{g_s z}(r, \theta) = \left\{ \frac{E_1}{36} \frac{a_s^2 \mu_g \varepsilon_g}{\varepsilon^3} + \frac{E_2}{6} a_s \frac{\varepsilon_g^2}{\varepsilon^2} \rho_g \sqrt{u_{gz}^2 + u_{gr}^2 + u_{g\theta}^2} \right\} u_{gz}(r, \theta) \varepsilon \quad (3.11)$$

$$F_{g\ell, z}(r, \theta) = \left\{ \frac{E_1}{36} \frac{a_s^2 \mu_g}{\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon_\ell}{f_e}\right)^2} + \frac{E_2}{6} a_s \frac{\varepsilon_g}{\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon_\ell}{f_e}\right)^2} \rho_g \sqrt{j_{rz}^2 + j_{rr}^2 + j_{r\theta}^2} \right\} j_{rz}(r, \theta) \varepsilon_g \quad (3.12)$$

$$j_{rz}(r, \theta) = u_{gz}(r, \theta) - \frac{\varepsilon - \frac{\varepsilon_\ell}{f_e}}{\varepsilon_g} u_{\ell z}(r, \theta) \quad (3.13)$$

Les forces de traînée sont indiquées pour une vitesse axiale positive exprimée dans la direction de la gravité et, par conséquent, la vitesse axiale du gaz est négative dans la continuité, les équations d'équilibre de quantité de mouvement et les forces de traînée.

La dispersion mécanique est la conséquence des fluctuations de vitesse du gaz et du liquide dans la structure tortueuse du lit tassé.

Les forces mécaniques de dispersion ont été approchées comme :

$$F_{d, \ell, z}^m(r, \theta) = f_e K_{\ell s} u_{d\ell, z}(r, \theta) - \varepsilon f_e K_{ig} (u_{dg, z}(r, \theta) - u_{d\ell, z}(r, \theta)) \quad (3.14)$$

$$F_{d, g, z}^m(r, \theta) = (1 - f_e) K_{gs} u_{dg, z}(r, \theta) + \varepsilon f_e K_{ig} (u_{dg, z}(r, \theta) - u_{d\ell, z}(r, \theta)) \quad (3.15)$$

Les vitesses de dérive de dispersion des liquides et des gaz ont été évaluées via la théorie de Fickian :

$$u_{d\alpha, z}(r, \theta) = - \frac{S_s(r, \theta) |u_{\alpha, z}|}{\varepsilon_\alpha} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial z(r, \theta)} \quad (3.16)$$

Les coefficients d'échange de quantité de mouvement sont :

$$K_{\ell s} = \left\{ \frac{E_1 a_{\ell}^2 \mu_{\ell} f_{\theta}}{36 \varepsilon_{\ell}} + \frac{E_2}{6} a_s \rho_{\ell} \sqrt{u_{\ell z}^2 + u_{\ell r}^2 + u_{\ell \theta}^2} \right\} \quad (3.17)$$

$$K_{gs} = \left\{ \frac{E_1 a^2 \mu_g \varepsilon_g}{36 \varepsilon^3} + \frac{E_2}{6} a_s \left(\frac{\varepsilon_g}{\varepsilon} \right)^3 \rho_g \sqrt{u_{gz}^2 + u_{gr}^2 + u_{g\theta}^2} \right\} \quad (3.18)$$

$$K_{ig} \cong \left\{ \frac{E_1 a_s^2 \mu_g \varepsilon_g}{36 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_t}{f_e} \right)^2} + \frac{E_2}{6} a_s \rho_g \frac{\varepsilon_g^2}{\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\ell}}{f_e} \right)^2} \sqrt{j_{rz}^2 + j_{rr}^2 + j_{r\theta}^2} \right\} \quad (3.19)$$

La fraction mouillée du garnissage a été approximée comme le rapport entre la surface inter faciale gaz-liquide et la surface spécifique du garnissage car dans la zone d'écoulement de pré chargement, la texture liquide est donnée par les films et les ruisselets. La discontinuité de la pression à l'interface gaz-liquide a été estimée avec la corrélation de pression capillaire d'Attou et Ferschneider :

$$P_g - P_{\ell} = 2\sigma_{\ell} \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_g} \right)^{0.33} \left(\frac{1}{d_p} + \frac{1}{d_{min}} \right) \quad (3.20)$$

3.5 MODELE DE TRANSPORT DE MASSE ET D'ENERGIE

3.5.1 Mécanisme d'absorption du SO₂

La réaction d'hydrolyse suivante a lieu en phase liquide lorsque le SO₂ est absorbé dans de l'eau pure :



La constante de vitesse de réaction directe à 20 °C a été estimée élevée (>10⁶ s⁻¹) et le processus d'absorption peut être supposé une réaction instantanée par rapport au transfert de masse. Le taux de processus d'absorption du SO₂ peut être énoncé comme:

$$N_{\text{SO}_2} = k_{\ell} a (C_{\text{SO}_2, i} - C_{\text{SO}_2, \ell}) E \quad (3.22)$$

La solution du modèle de renouvellement de surface se rapproche du facteur d'amélioration du transfert de masse :

$$E = 1 + \sqrt{\frac{D_B}{D_A}} \frac{\sqrt{K_C}}{\sqrt{C_{A,i} + \sqrt{C_{A,t}}}} \quad (3.23)$$

Si le SO₂ est absorbé dans l'eau de mer, la neutralité électrique ne contraint plus la distribution de concentration et la diffusivité de H⁺ et de ASS₃⁻, et le processus d'élimination devient un processus d'absorption de gaz accompagné d'une réaction réversible de la forme A(SO₂) ↔ B(HSO₃⁻) + C(H⁺).

La solution du modèle de renouvellement de surface se rapproche du facteur d'amélioration du transfert de masse :

$$E = 1 + \sqrt{\frac{D_C}{D_A}} \frac{C_{C,\ell} - C_{C,t}}{C_{A,i} - C_{A,t}}; C_{C,i} = \frac{C_{C,\ell} - \sqrt{\frac{D_B}{D_C}} C_{B,\ell} + \sqrt{\left(C_{C,\ell} - \sqrt{\frac{D_B}{D_C}} C_{B,t}\right)^2 + 4 \sqrt{\frac{D_B}{D_C}} C_{A,i} K_C}}{2} \quad (3.24)$$

3.5.2 Mécanisme d'absorption du CO₂

La réaction d'hydrolyse suivante a lieu lorsque le CO₂ (gaz coexistant) est absorbé dans l'eau :



Le taux de processus d'absorption a été estimé avec l'Eq. (3.22) avec E = 1.

3.5.3 Équations d'équilibre des espèces en phase liquide

Le modèle de transport de masse couplé aux réactions d'hydrolyse comprend les équations de bilan d'espèces pour H⁺, HSO₃⁻ et CO₂ en phase liquide et SO₂ et CO₂ en phase gazeuse. Les équations de transport de masse/réaction 3D à l'état instable dans les phases gazeuses et liquide, tenant compte des profils de vitesse non uniformes, et les conditions aux limites correspondantes sont :

- Équations d'équilibre des espèces en phase gazeuse

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g P_{SO_2,g}) + u_{gr} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_g P_{SO_2,g}) + \frac{u_{g\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_g P_{SO_2,g}) + u_{gz} \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_g P_{SO_2,g}) \\ & = \frac{D_{gr}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon_g \frac{\partial P_{SO_3,g}}{\partial r} \right) + \frac{D_{g\theta}}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}(\varepsilon_g P_{SO_3,g}) + D_{gz} \frac{\partial^2}{\partial z^2}(\varepsilon_g P_{SO_2,g}) - (N_{SO_3} a) RT_g \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) + u_{gr} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) + \frac{u_{g\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) + u_{gz} \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) \\ & = \frac{D_{gr}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon_g \frac{\partial P_{CO_2,g}}{\partial r} \right) + \frac{D_{g\theta}}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) + D_{gz} \frac{\partial^2}{\partial z^2}(\varepsilon_g P_{CO_2,g}) - (N_{CO_2} a) RT_g \end{aligned} \quad (3.27)$$

Avec :

ε_g : Rétention de phase gazeuse

$P_{SO_2,g}$: Pression du dioxyde de soufre, Pa

$P_{CO_2,g}$: Dioxyde de carbone Pression du dioxyde de carbone, Pa

u_{gr} : Vitesse de dérive pour la phase gazeuse m/s

θ : Coordonnée azimutale, m

r : Coordonnée radiale, m

D_{gr} : Coefficients de dispersion de gaz, m²/s

R : constante des gaz parfaits ou rayon du réacteur, m

T : Température absolue en K

- Équations d'équilibre des espèces en phase liquide

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) + \frac{u_{\ell\theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) \\ & = \frac{D_{\ell r}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon_\ell \frac{\partial C_{H^+,\ell}}{\partial r} \right) + \frac{D_{\ell\theta}}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) + D_{\ell z} \frac{\partial^2}{\partial z^2}(\varepsilon_\ell C_{H^+,\ell}) + N_{SO_2} a \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) + \frac{u_{\ell \theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) \\
& = \frac{D_{\ell r}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon_\ell \frac{\partial C_{HSO_3^-, \ell}}{\partial r} \right) + \frac{D_{\ell \theta}}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) + D_{\ell z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\varepsilon_\ell C_{HSO_3^-, \ell}) + N_{SO_2} a
\end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) + u_{\ell r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) + \frac{u_{\ell \theta}}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) + u_{\ell z} \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) \\
& = \frac{D_{\ell r}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon_\ell \frac{\partial C_{CO_2, \ell}}{\partial r} \right) + \frac{D_{\ell \theta}}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) + D_{\ell z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\varepsilon_\ell C_{CO_2, \ell}) + N_{CO_2} a
\end{aligned} \quad (3.30)$$

Avec :

ε_ℓ : Rétention de phase liquide

C : Concentration, kmol/m³

N : flux molaire interfacial, kmol/m² s,

$u_{\ell r}$: vitesse de dérive pour la phase liquide, m/s

$D_{\ell r}$: Coefficients de dispersion de liquide, m² /s

θ : Coordonnée azimutale, m

r : Coordonnée radiale, m

- Conditions aux limites ($z = 0$: haut de la colonne)

$$z = 0 \quad u_{\ell z} \varepsilon_\ell C_{j, \ell}^{in} = u_{\ell z} \varepsilon_\ell C_{j, \ell} \Big|_{z=0^+} - \varepsilon_\ell D_{\ell z} \frac{\partial C_{j, \ell}}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \frac{\partial P_{j, s}}{\partial z} = 0 \quad (3.31)$$

$$z = H \quad \frac{\partial C_{j, \ell}}{\partial z} = 0 \quad u_{gz} \varepsilon_g P_{j, g}^{in} = u_{gz} \varepsilon_g P_{j, g} \Big|_{z=H^-} - \varepsilon_g D_{gz} \frac{\partial P_{j, g}}{\partial z} \Big|_{z=H} \quad (3.32)$$

$$r = 0 \quad \frac{\partial C_{j, \ell}}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial P_{j, g}}{\partial r} = 0 \quad (3.33)$$

$$r = R \quad \frac{\partial C_{j, \ell}}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial P_{j, g}}{\partial r} = 0 \quad (3.34)$$

$$\theta = 0,2\pi \frac{\partial c_{j,\ell}}{\partial \theta} = 0 \frac{\partial P_{j,g}}{\partial \theta} = 0 \quad (3.35)$$

3.5.4 Équations du bilan énergétique

Les équations du bilan thermique contiennent la convection, la conduction radiale et azimutale, la chaleur de réaction d'absorption du SO₂ et le transfert de chaleur interfacial gaz-liquide. La température à la frontière gaz-liquide a été estimée via la continuité du flux d'énergie à travers l'interface. La chaleur d'absorption physique du CO₂ et les pertes de chaleur vers l'environnement ont été négligées.

- Équations du bilan thermique en phase liquide et gazeuse

$$\begin{aligned} \rho_\ell c_{p\ell} \varepsilon_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial t} + \rho_\ell c_{p\ell} \varepsilon_\ell u_{\ell r} \frac{\partial T_\ell}{\partial r} + \rho_\ell c_{p\ell} \varepsilon_\ell u_{\ell \theta} \frac{1}{r} \frac{\partial T_\ell}{\partial \theta} + \rho_\ell c_{p\ell} \varepsilon_\ell u_{\ell z} \frac{\partial T_\ell}{\partial z} = \frac{\lambda_{\ell r}^{ef}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_\ell}{\partial r} \right) \\ + \frac{\lambda_{\ell \theta}^{ef}}{r^2} \frac{\partial^2 T_\ell}{\partial \theta^2} + (-\Delta H_{r,SO_2}) N_{SO_2} a - \alpha_{g\ell}^\ell a (T_\ell - T_i) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \rho_g c_{pg} \varepsilon_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g c_{pg} \varepsilon_g u_{gr} \frac{\partial T_g}{\partial r} + \rho_g c_{pg} \varepsilon_g u_{g\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial T_g}{\partial \theta} + \rho_g c_{pg} \varepsilon_g u_{gz} \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{\lambda_{gr}^{ef}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \\ + \frac{\lambda_{g\theta}^{ef}}{r^2} \frac{\partial^2 T_g}{\partial \theta^2} + \alpha_{g\ell}^g a (T_\ell - T_i) \end{aligned} \quad (3.37)$$

- Bilan thermique à travers l'interface gaz-liquide

$$-\sum_j N_j^{\text{truns}} a H_j^g + \sum_j N_j^{\text{trans}} a H_j^\ell = \alpha_{g\ell}^\ell a (T_\ell - T_i) - \alpha_{g\ell}^g a (T_i - T_g) \quad (3.38)$$

$$z = 0 T_\ell|_{z=0} = T_\ell^{\text{in}} \frac{\partial T_g}{\partial z} = 0 \quad (3.39)$$

$$z = H \frac{\partial T_\ell}{\partial z} = 0 T_g|_{z=H} = T_g^{\text{in}} \quad (3.40)$$

$$r = 0 \frac{\partial T_{\ell(g)}}{\partial r} = 0 \quad (3.41)$$

$$r = R \frac{\partial T_{\ell(g)}}{\partial r} = 0 \quad (3.42)$$

$$\theta = 0,2\pi \frac{\partial T_{(g)}}{\partial \theta} = 0 \quad (3.43)$$

3.6 PARAMÈTRES DU MODÈLE

Les coefficients de diffusion moléculaire en phase liquide et Les coefficients de diffusion moléculaire de HSO_3^- et H^+ ont été évalués par la méthode de Wilke-Chang.

La solubilité du SO_2 et du CO_2 dans l'eau de mer a été estimée via la corrélation :

$$m_j = \frac{P_j \phi_j}{H_{j,m}^0 \gamma_j} \quad (3.44)$$

Les coefficients d'activité du SO_2 et du CO_2 dans l'eau de mer ont été évalués avec la corrélation :

$$\log \gamma_j = \sum_i (h_{i,j} + h_j) C_i \quad (3.45)$$

$h_{i,j}$ est le paramètre spécifique du ion i , h_j est le paramètre spécifique du gaz et C_i est la concentration molaire du ion i .

3.7 IMPLÉMENTATION NUMÉRIQUE

La discrétisation dans les directions axiale, radiale et azimutale a été réalisée avec la méthode de collocation orthogonale de deuxième et troisième ordre sur les éléments finis. La méthode d'intégration de Newton et Gear a été utilisée pour résoudre les alternatives à l'état stable et à l'état instable du modèle qui est représenté dans la Figure 23.

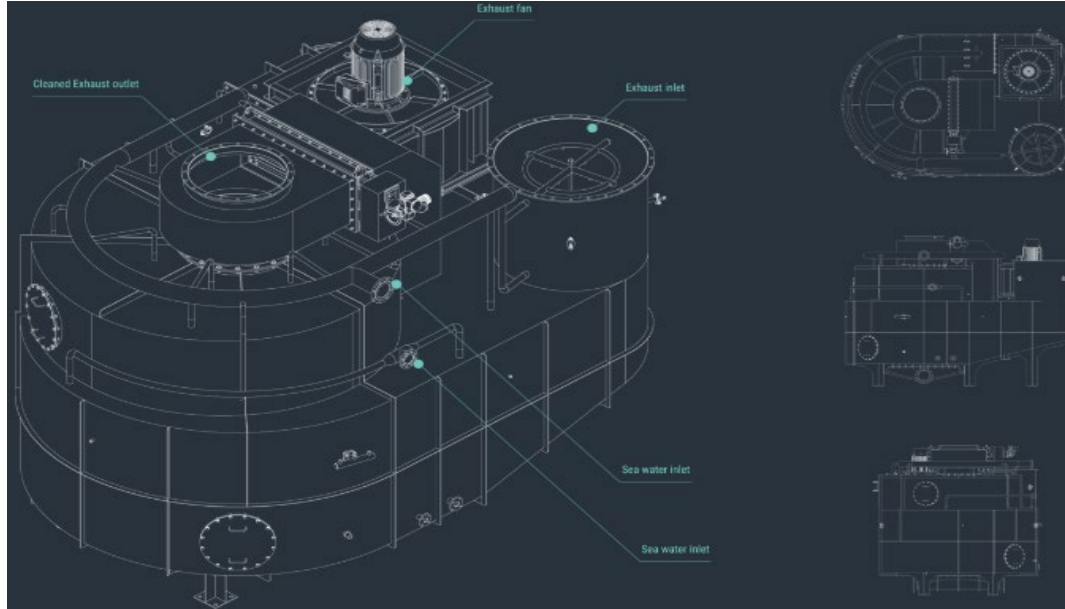


Figure 23 . Modèle mathématique 3D de l'épuration de l'eau de mer au SO₂ dans des colonnes à garnissage à contre-courant.

La Figure 24 compare les estimations du modèle et les données expérimentales d'épuration de l'eau de mer au SO₂ rapportées par Flagiello et al. [20] pour une colonne à lit fixe structuré à contre-courant de 10 cm de diamètre garnie de Sulzer Mellapak 250X jusqu'à une hauteur totale de garnissage de 89,2 cm et opérée à 25 °C et 0,1 MPa. L'efficacité théorique d'élimination du SO₂ est suffisamment proche des données expérimentales obtenues à différentes valeurs de concentration de SO₂ et de débits de liquide et de gaz.

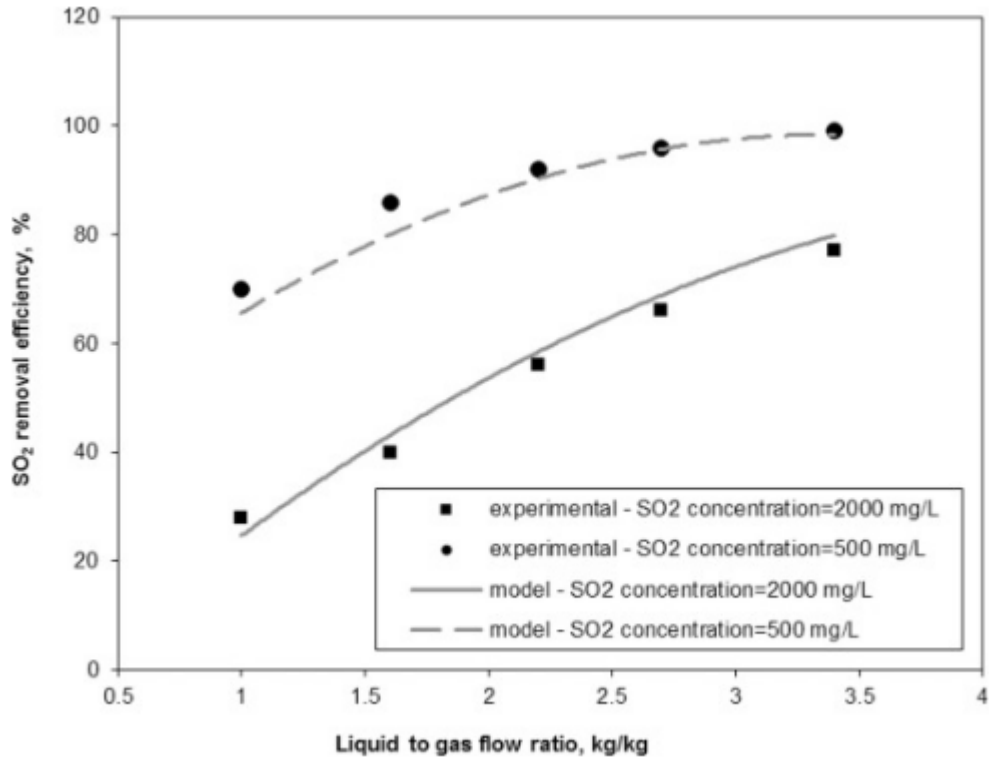


Figure 24 . Efficacité expérimentale et théorique d'épuration de l'eau de mer au SO₂ dans un réacteur à colonnes à lit structuré garni de Sulzer Mellapak 250X (diamètre de la colonne = 0, 1 m; hauteur du lit à garnissage = 0,892 m).

Le facteur d'amélioration du transfert de masse a été comparé aux valeurs expérimentales obtenues pour l'absorption de SO₂ dans de l'eau pure à 25°C dans une cuve agitée en continu avec une interface gaz-liquide ininterrompue et dans un absorbeur à jet laminaire. Le facteur théorique d'amélioration du transfert de masse est suffisamment proche des données expérimentales, qui varient entre 4 et 10, obtenues à différentes valeurs de concentration à l'équilibre de l'interface SO₂.

De plus, le [Tableau 6](#) montre une comparaison impliquant les données expérimentales d'élimination enzymatique du CO₂ dans une colonne à lit fixe structuré et les estimations d'un modèle 3D dynamique équivalent qui couple les équations macroscopiques de masse, de quantité de mouvement et d'équilibre d'espèce moyennées en volume dans les phases gaz/liquide avec réaction et diffusion simultanées à l'intérieur de l'enzyme.

Les résultats théoriques d'élimination sont proches des données expérimentales obtenues à différentes valeurs dans une colonne à lit fixe vertical de 5 cm de diamètre garnie de Sulzer Mellapak 500X enrobé de silice-enzyme jusqu'à une hauteur totale de garnissage de 106 cm. Une solution tampon 0,8 M/1,2 $\text{MK}_2\text{C}_03 / \text{KHCO}_3$ à $\text{pH} = 10$ a été utilisée comme phase liquide absorbante et un gaz ayant 15 % de CO_2 a été déplacé vers le haut dans le lit tassé. La conversion du CO_2 à différentes valeurs de charge enzymatique est comparable car le processus d'élimination du CO_2 à base d'enzymes est contrôlé par la diffusion interne de la couche de lavage. Même si ces conditions sont différentes de celles simulées avec le modèle actuel, la concordance entre les données théoriques et expérimentales d'élimination enzymatique du CO_2 montre la capacité d'un modèle équivalent à simuler un processus d'absorption complexe.

Tableau 5 . Comparaison entre la conversion expérimentale et théorique du CO_2 pour l'élimination enzymatique du CO_2 dans une colonne à lit fixe structuré.

Chargement hCA II g/l3	Modèle conversion CO_2	Conversion expérimentale CO_2
1,9	0,752	0,74
1,8	0,7585	0,73
4,93	0,753	0,73
5	0,7533	0,72
5,7	0,753	0,68
6,15	0,753	0,72

CHAPITRE 4

SIMULATION ET DISCUSSION

4.1 INTRODUCTION

Une série de simulations a été réalisée sur le modèle eulérien 3-D basé sur les équations macroscopiques de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et d'équilibre des espèces moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse, pour étudier les performances du processus de lavage à l'eau de mer dans des colonnes à lit garni à contre-courant avec des garnissages aléatoires de quatrième génération, de troisième génération et de deuxième génération standard. Ensuite, nous avons entrepris une analyse de l'impact de la concentration de SO₂ sur les performances du procédé d'épuration de l'eau de mer. Enfin, l'impact des conditions de fonctionnement sur les performances du réacteur à colonnes à lit fixe a été examiné. Tout au long, des approches à effet de levier ont été testées pour améliorer les performances d'épuration de l'eau de mer.

4.2 SIMULATION

Les conditions de fonctionnement des réacteurs à colonnes à lit fixe aléatoire exploités dans la région de pré chargement sont données dans le Tableau 7 .

Tableau 6 . Paramètres du modèle pour les simulations de cas de base.

Des conditions de fonctionnement	Données
Hauteur du réacteur	1,85 m
Diamètre du réacteur	0,3 m
Zone spécifique à l'emballage (Raschig super-Rings No. 0.3)	315 m ² / m ³
Zone spécifique de garnissage (I-Rings)	305 m ² / m ³
Zone spécifique de conditionnement (Pall-Rings)	350 m ² / m ³
Porosité du lit (Raschig super-Rings No. 0.3)	0,96
Porosité du lit (I-Rings)	0,97
Porosité du lit (Pall-Rings)	0,94
Pression du réacteur	0,1 MPa
Température	298 K
Vitesse superficielle des gaz	1,5 m/s
Vitesse superficielle du liquide	0,01 et 0,015 m/s
Gaz d'admission Fraction molaire SO₂	0,001 et 0,002
Fraction molaire CO₂ du gaz d'admission	0,05
Densité liquide	1027 g/L
Viscosité liquide	0,001 kg/ms
Facteur d'étalement	0,0074

La Figure 25 montre des profils typiques d'efficacité d'élimination du SO₂ à la température des océans équatoriaux résultant de l'augmentation progressive de la vitesse

superficielle des gaz dans les réacteurs à colonnes à lit fixe à contre-courant de deuxième génération, de troisième génération et de quatrième génération (Raschig super-Rings No. 0.3).

Comme prévu, l'efficacité d'absorption du SO₂ est plus grande à des débits de liquide accrus et devient supérieure à 98 % à des débits de gaz plus faibles. Dans des conditions de fonctionnement similaires, l'hydrodynamique comparable (Fig.26, Fig.27, Fig.28), induite par les zones spécifiques de compactage serré et les porosités du lit, génère un SO₂ similaire en efficacité d'élimination lors d'un fonctionnement avec des garnitures aléatoires de troisième génération ou de quatrième génération (Raschig super-Rings No. 0.3) (Fig. 25).

La colonne à lit garni avec Pall-Rings surpasse légèrement les colonnes de lavage remplies de super-anneaux Raschig et d'anneaux en I en raison de la plus grande surface spécifique de garnissage. Malgré cela, le gain des garnissages aléatoires de quatrième génération, à moindre perte de charge, est évident par rapport au garnissage de deuxième génération (Fig. 29), tout en offrant une efficacité d'absorption du SO₂ comparable (Fig. 25). L'efficacité d'absorption physique du CO₂ est réduite pour les garnitures aléatoires de troisième et de quatrième génération (Fig. 30) en raison de la faible pression du processus de lavage. La Figure 30 montre que l'augmentation du débit de gaz réduit l'efficacité d'élimination du SO₂.

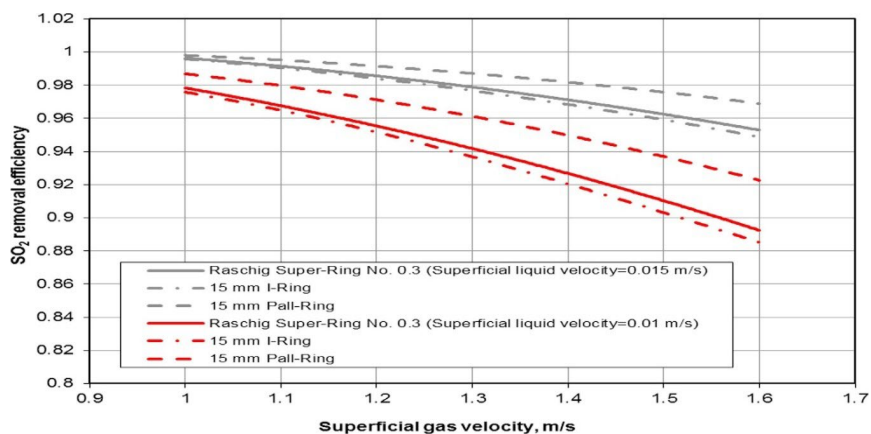


Figure 25 . Effet de la vitesse superficielle du gaz sur les performances d'absorption d'eau de mer de SO₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant.

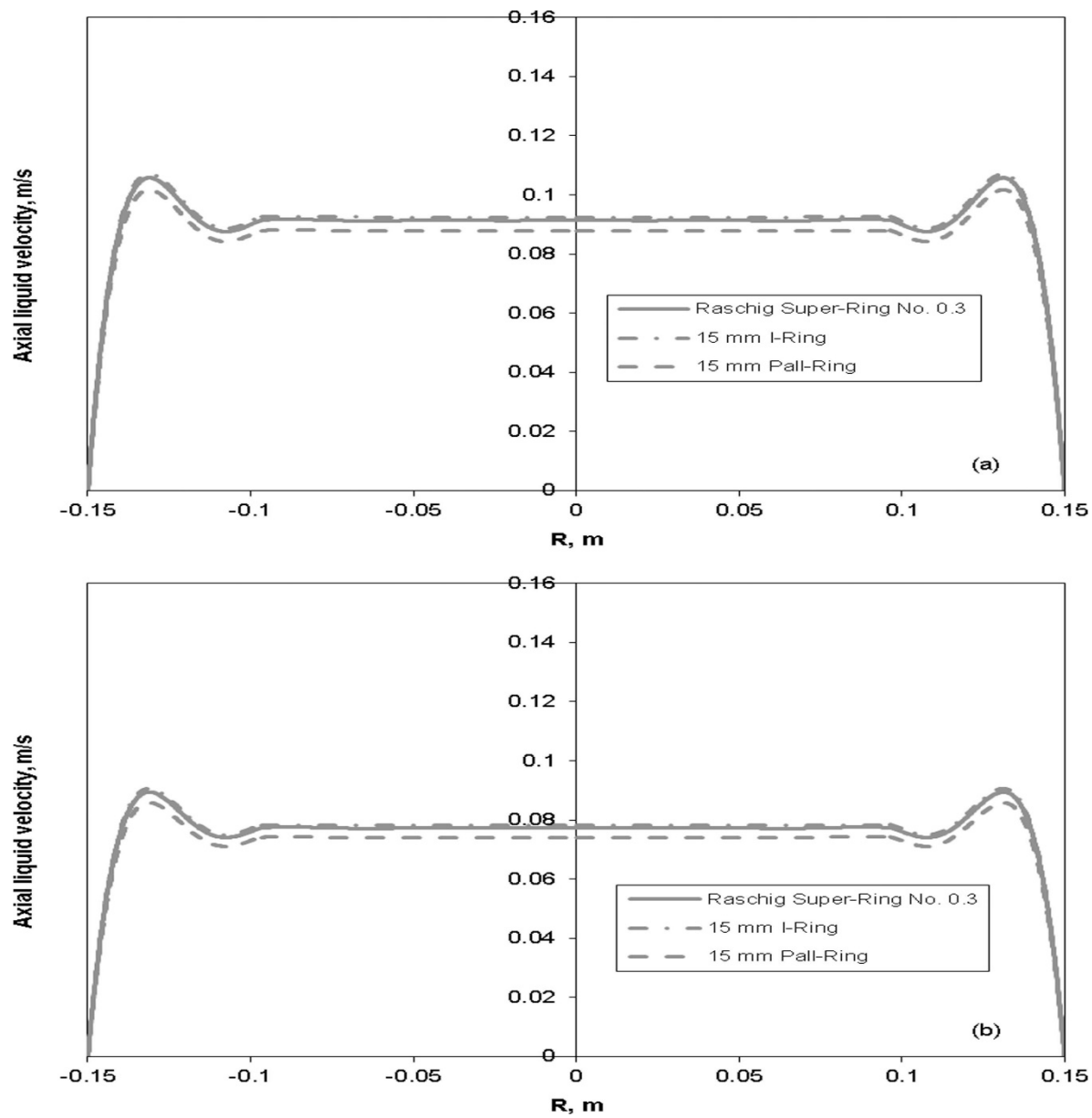


Figure 26 . Profils radiaux à l'état d'équilibre de la vitesse axiale du liquide dans des colonnes à lit fixe aléatoire.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz à l'entrée = 303 K, concentration en SO_2 à l'entrée = 2 000 ppm v (a) $v_{s\ell}=0,015 \text{ ms}^{-1}$; (b) $v_{s\ell}=0,01 \text{ ms}^{-1}$.

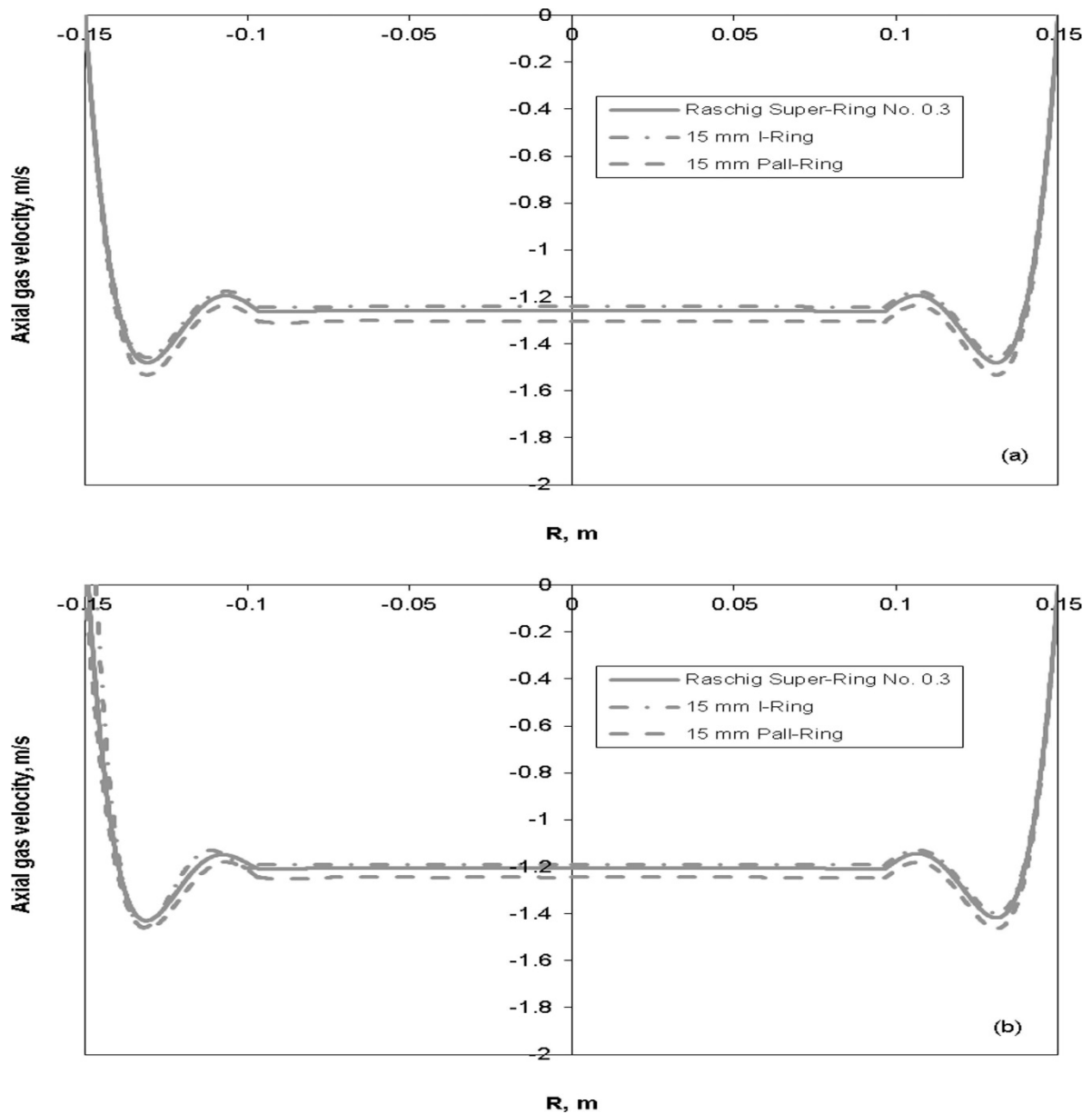


Figure 27 . Profils radiaux à l'état stationnaire de la vitesse axiale du gaz dans des colonnes à lit garni aléatoire.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz à l'entrée = 303 K, concentration en SO_2 à l'entrée = 2 000 ppm v (a) $v_{s\ell}=0,015 \text{ ms}^{-1}$; (b) $v_{s\ell}=0,01 \text{ ms}^{-1}$.

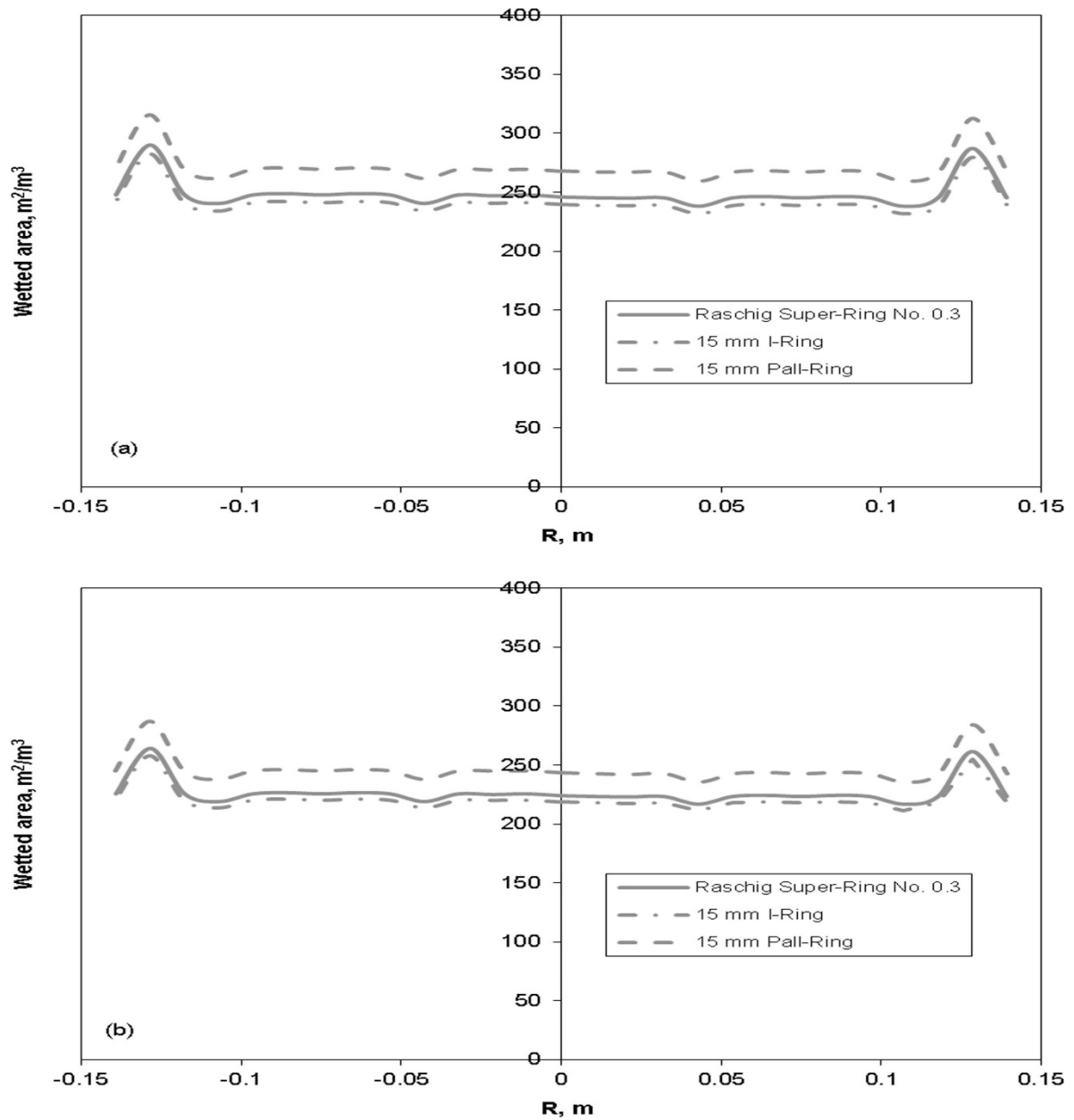


Figure 28 . Profils radiaux à l'état stable de la zone mouillée spécifique dans des colonnes à lit garni aléatoires.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz à l'entrée = 303 K, concentration en SO₂ à l'entrée = 2 000 ppm v (a) $v_{s\ell} = 0,015 \text{ ms}^{-1}$; (b) $v_{s\ell} = 0,01 \text{ ms}^{-1}$.

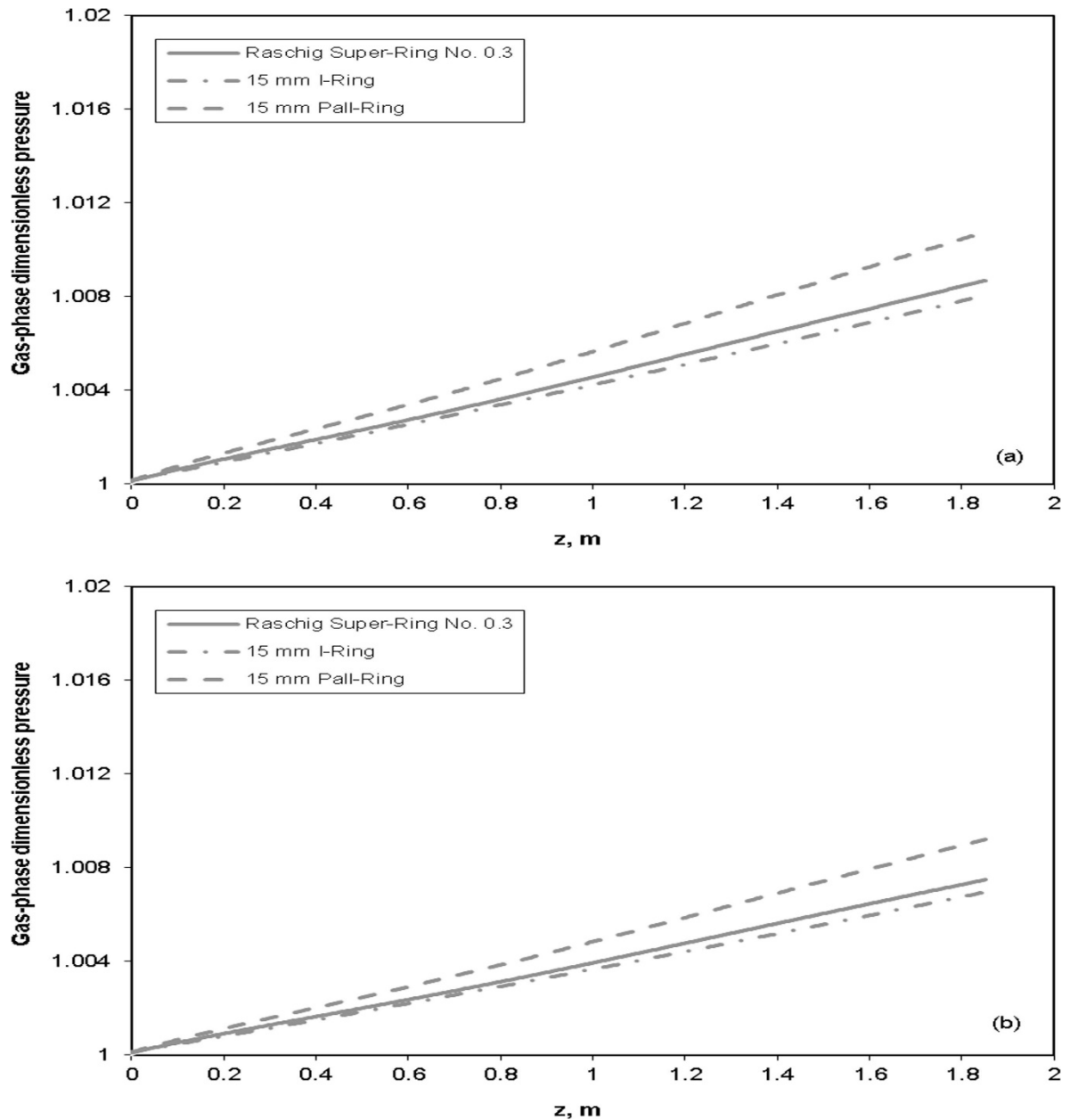


Figure 29 . Effet de la concentration de SO_2 à l'entrée dans la phase gazeuse sur l'efficacité d'élimination du SO_2 (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz à l'entrée = 303 K, concentration en SO_2 à l'entrée = 2 000 ppm v (a) $v_s \ell = 0,015 \text{ ms}^{-1}$; (b) $v_s \ell = 0,01 \text{ ms}^{-1}$.

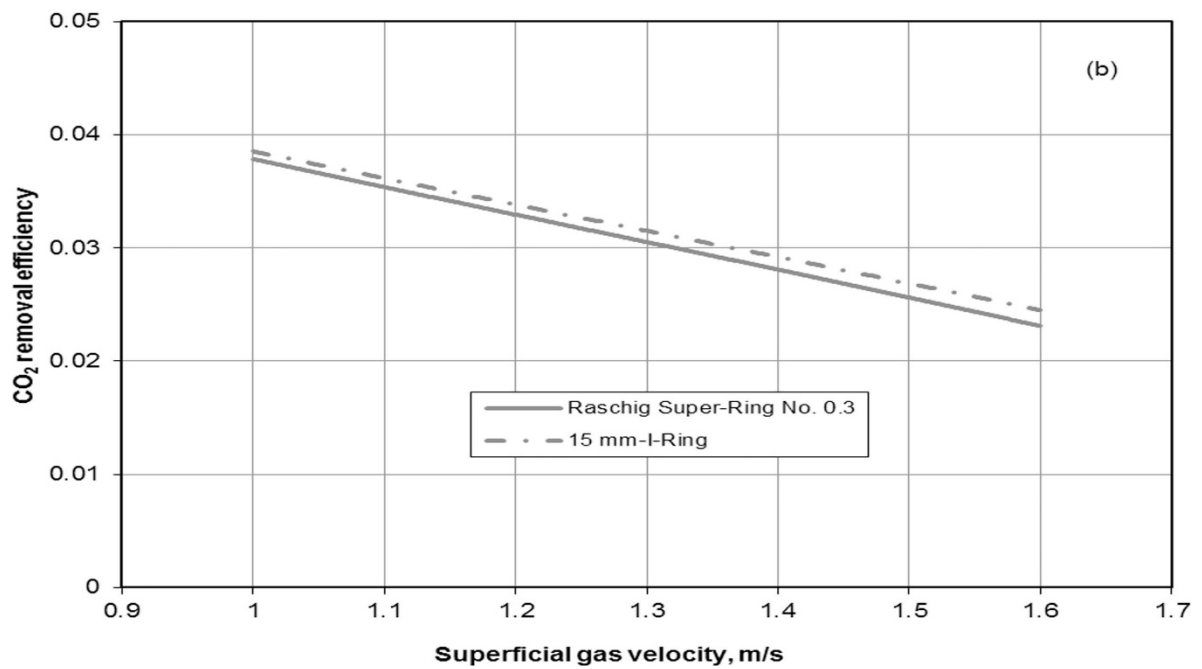
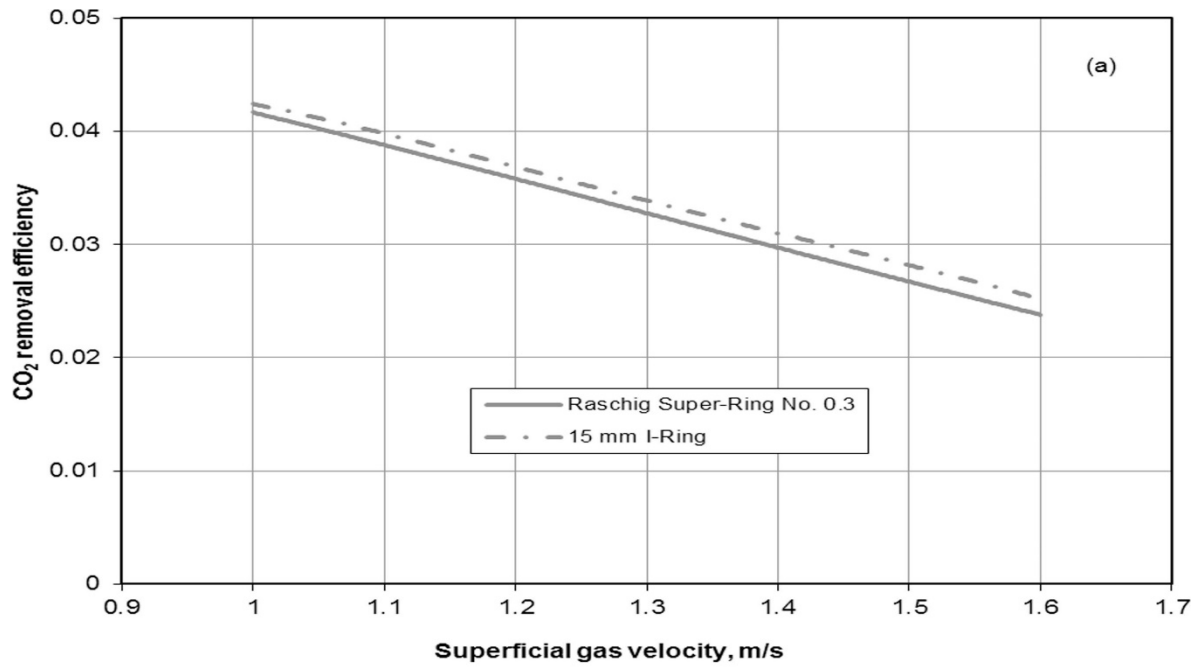


Figure 30 . Effet de la vitesse superficielle du gaz sur le processus d'absorption physique du CO₂.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz à l'entrée = 303 K, (a) $v_{sl}=0,015 \text{ ms}^{-1}$; (b) $v_{sl}=0,01 \text{ ms}^{-1}$.

L'impact de la concentration de SO_2 à l'entrée dans la phase gazeuse sur l'efficacité d'élimination du SO_2 et le facteur d'amélioration du transfert de masse dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig est présenté à la Fig. 31.

L'efficacité d'absorption diminue avec l'augmentation de la concentration de SO_2 à l'entrée et la diminution devient plus importante à des débits de liquide plus faibles. La Figure 31 met en évidence qu'à de grandes concentrations de SO_2 à l'entrée, le processus d'absorption est sensiblement limité par l'amélioration du transfert de masse due à la réaction d'hydrolyse du SO_2 .

Les tests de simulation indiquent que pour 1000 ppm v SO_2 concentration, l'efficacité d'absorption est maintenue au-dessus de 98 % aux deux vitesses de liquide. La grande vitesse du liquide permet d'obtenir une meilleure performance d'élimination du SO_2 sur toute la plage de concentration en SO_2 .

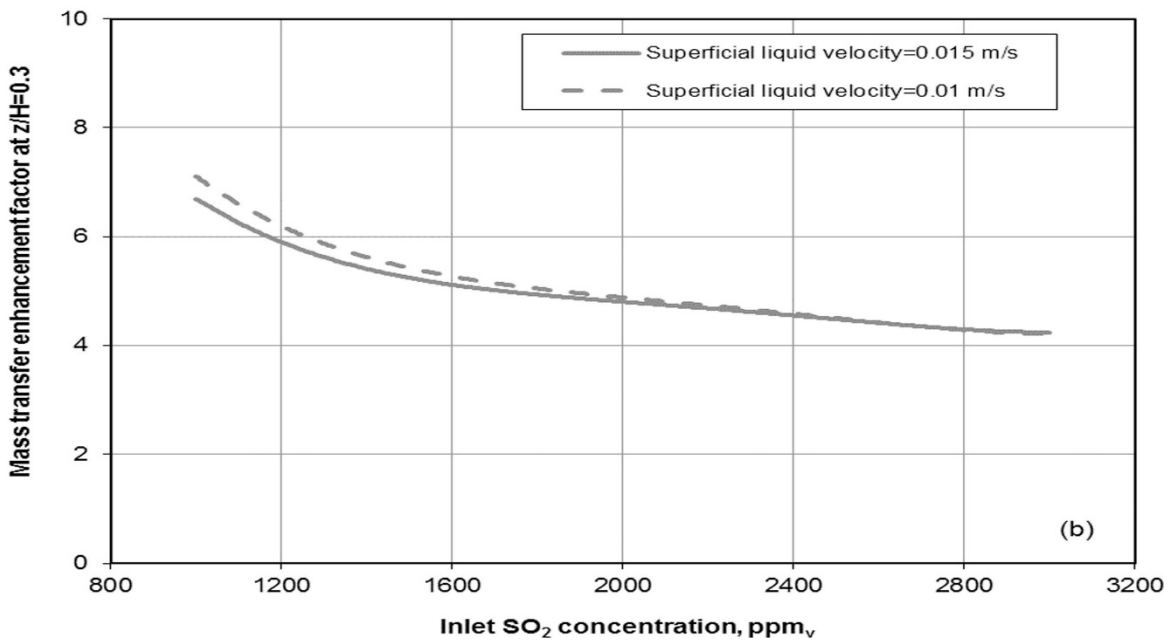
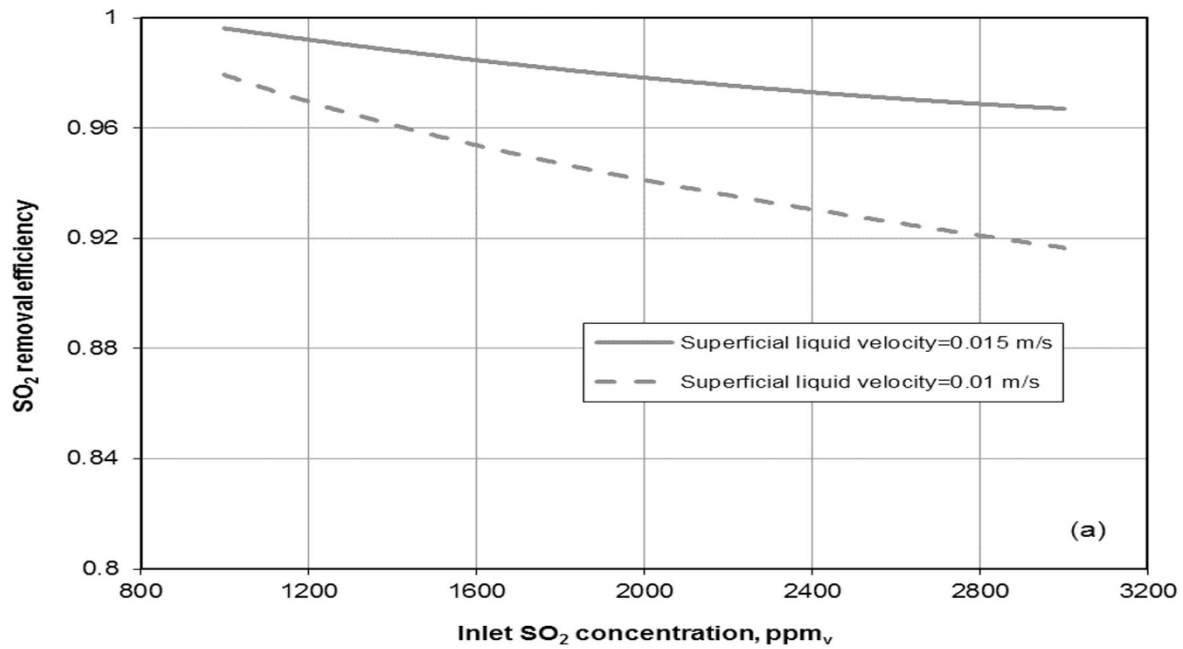


Figure 31 . Effet de la concentration de SO₂ à l'entrée dans la phase gazeuse sur l'efficacité d'élimination du SO₂ (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : Liquide d'entrée et température des gaz = 298 K.

Le processus d'élimination du SO₂ est considérablement amplifié par l'augmentation de la pression en raison de l'amplification de la force motrice du transfert de masse gaz-liquide (Fig. 32). Une pression accrue modifie le processus d'élimination du SO₂ qui devient complètement à des valeurs inférieures du rapport liquide/gaz (L/G). De plus, l'absorption physique du CO₂ dans l'eau de mer est considérablement amplifiée à haute pression (non illustré). L'épuration à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins à bord des grands navires exploités à une pression accrue augmente le coût en capital et les besoins en énergie, mais offre des avantages majeurs, tels que l'élimination totale du SO₂ même si la teneur en soufre dans le carburant est supérieure à 3,5 % et prévention de la perte de puissance du moteur en raison de la forte contre-pression à l'échappement entrant (rencontrée dans les épurateurs fonctionnant à la pression atmosphérique en raison de la perte de charge).

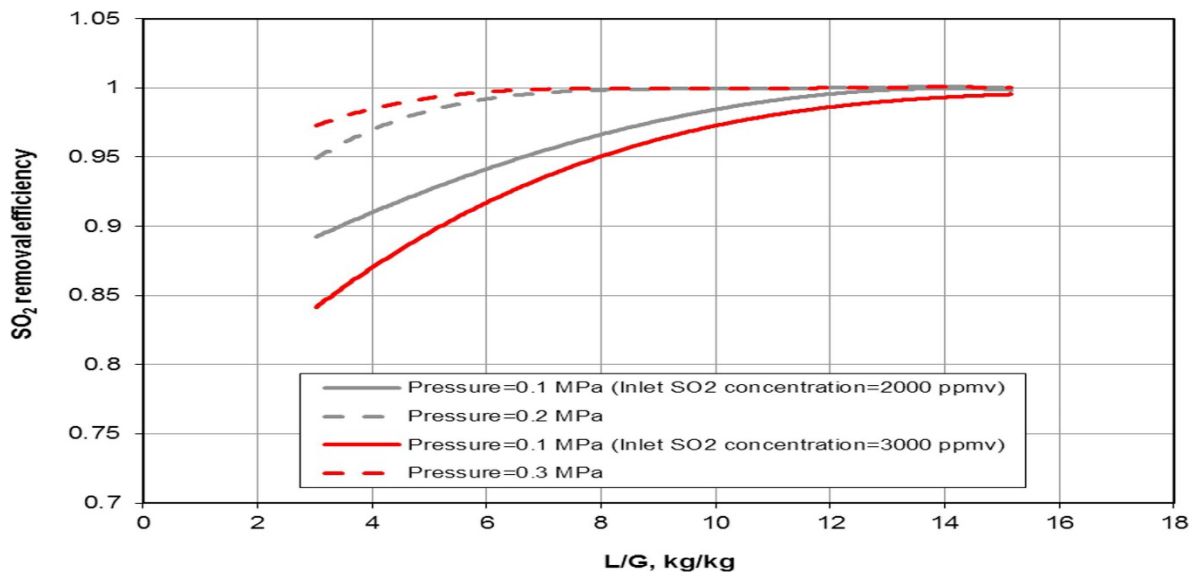


Figure 32 . Impact de la pression à différentes valeurs du rapport liquide/gaz sur l'efficacité d'élimination du SO₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz d'entrée = 298 K.

La vitesse du liquide est le paramètre le plus important dans l'épuration de l'eau de mer au SO₂. L'impact de la vitesse superficielle du liquide et du rapport liquide/gaz sur l'efficacité

d'élimination pour différentes valeurs de concentration de SO_2 à l'entrée est illustré à la Fig. 33.

L'efficacité d'élimination augmente fortement avec une augmentation de la vitesse du liquide. Avec l'augmentation de la vitesse du liquide, la surface de garnissage mouillé augmente et, par conséquent, la surface de transfert de masse gaz-liquide augmente (Fig. 28).

De plus, avec l'augmentation de la vitesse du liquide, l'épaisseur du liquide entourant le garnissage diminue et par conséquent la résistance au transfert de masse dans la couche limite liquide diminue.

En conséquence, la vitesse du processus gaz-liquide, qui est déterminée par la surface de contact entre les deux phases, les coefficients de transfert de masse dans le gaz et le liquide, la constante de vitesse de réaction, les coefficients de diffusion et les concentrations des deux composants devient plus élevé.

La Figure 34 montre que l'impact de la vitesse du liquide est plus important dans la région supérieure de la colonne à lit fixe où la force motrice du transfert de masse gaz-liquide est plus faible et l'augmentation du débit de liquide compense la diminution de l'absorption taux.

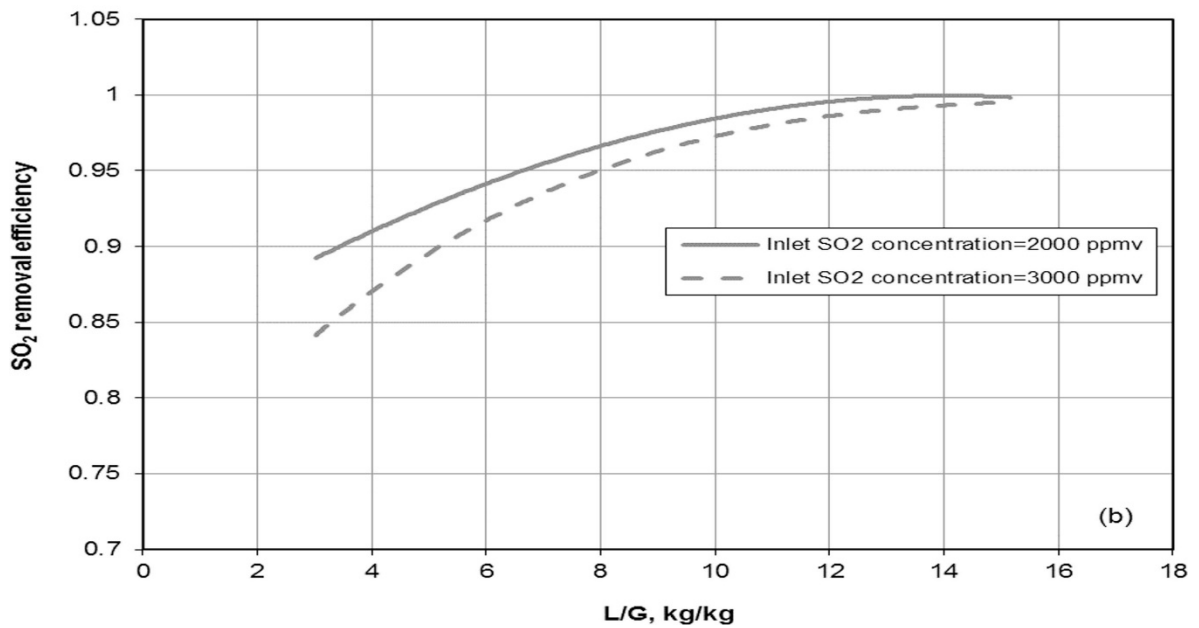
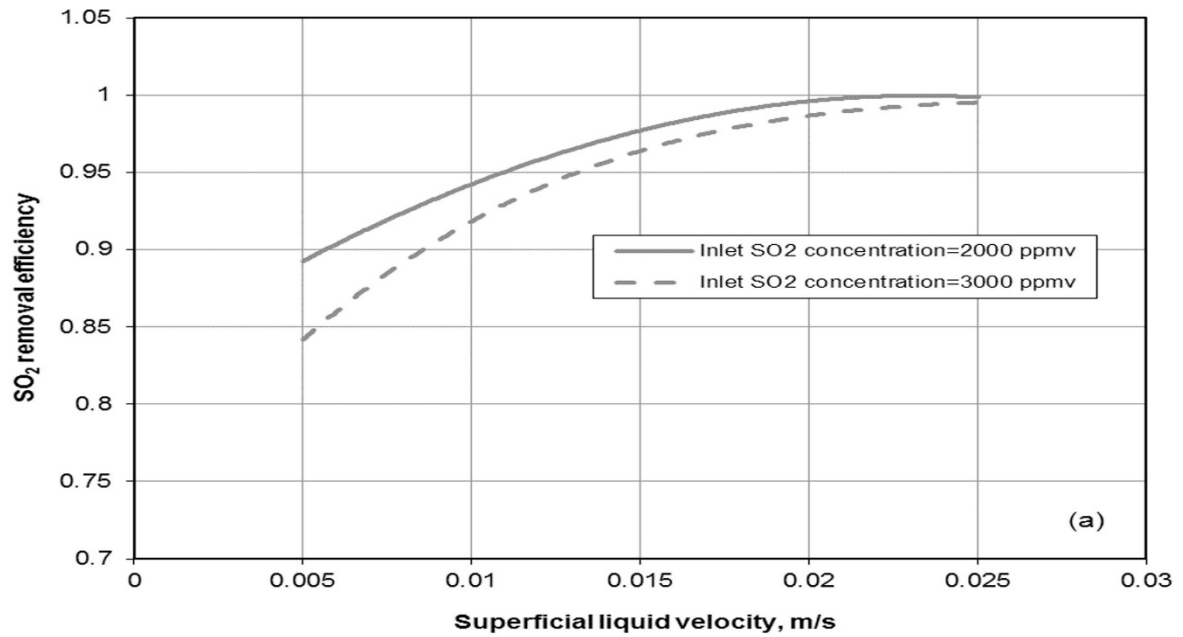


Figure 33 . Impact de la vitesse superficielle du liquide (a) et du rapport liquide/gaz (b) sur l'efficacité d'élimination du SO₂ dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des superanneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : Température du liquide et du gaz à l'entrée = 298K; $v_{qc}=1.5\text{ms}^{-1}$.

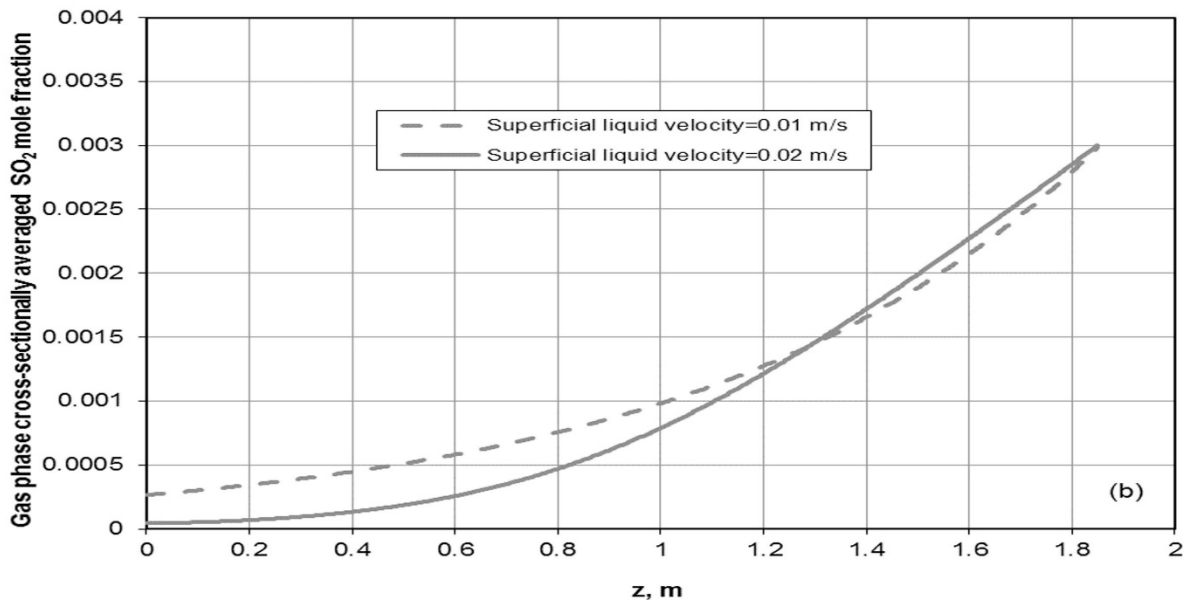
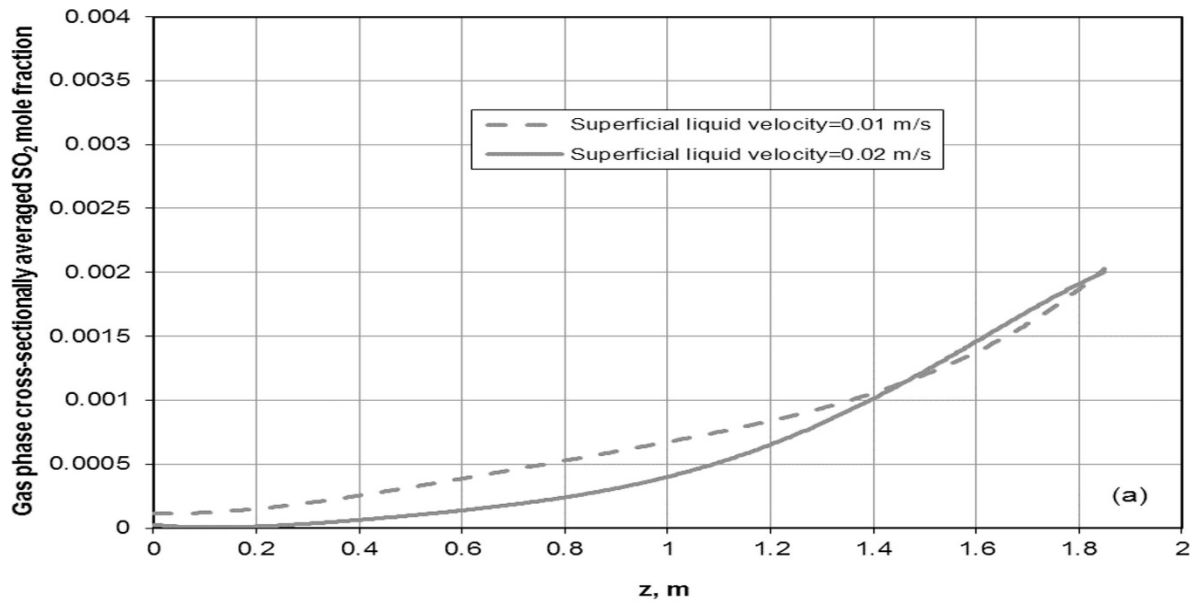


Figure 34 . Profils axiaux de la fraction molaire de SO_2 en phase gazeuse à différentes valeurs de vitesse superficielle du liquide dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : Température du liquide et du gaz d'entrée = 298 K ; $v_{qc}=1.5 \text{ ms}^{-1}$, (a) Concentration de SO_2 à l'entrée = 2000 ppm v ; (b) Concentration de SO_2 à l'entrée = 3000 ppm v.

La température est importante dans l'épuration de l'eau de mer au SO₂ car elle affecte plusieurs paramètres dont la solubilité, la diffusivité, la viscosité et la constante de dissociation.

La Figure 35 présente l'impact de la température du liquide d'entrée sur l'efficacité d'absorption du SO₂. L'efficacité d'absorption du SO₂ diminue avec l'augmentation de la température du liquide d'entrée car la solubilité du SO₂ et la constante d'équilibre de la réaction diminuent avec l'amplification de la température.

Une solubilité réduite signifie que le SO₂ devient plus difficile à absorber par l'eau de mer et la réduction de la constante d'équilibre de la réaction génère un facteur d'amélioration inférieur qui détériore le SO₂ performances d'élimination (Fig. 36).

Ainsi, le lavage à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins à bord des grands navires devient très efficace dans les océans tempérés en raison de la température plus basse de l'eau de mer (températures moyennes comprises entre 10 et 20 °C).

Les résultats indiquent qu'une température de gaz d'entrée plus élevée réduira légèrement l'efficacité d'absorption du SO₂.

Par conséquent, l'impact de la température du gaz d'admission sur l'efficacité d'absorption du SO₂ n'a pas été étudié dans ce travail. De plus, l'absorption physique de CO₂ dans l'eau de mer est considérablement réduite à une température de liquide d'entrée plus élevée (Fig. 35).

La Figure 35 indique que l'effet de la température du liquide est plus important dans la région supérieure du lit à garnissage où la force motrice du transfert de masse gaz-liquide est plus faible et la diminution de la température du liquide compense la baisse du taux de transfert de masse.

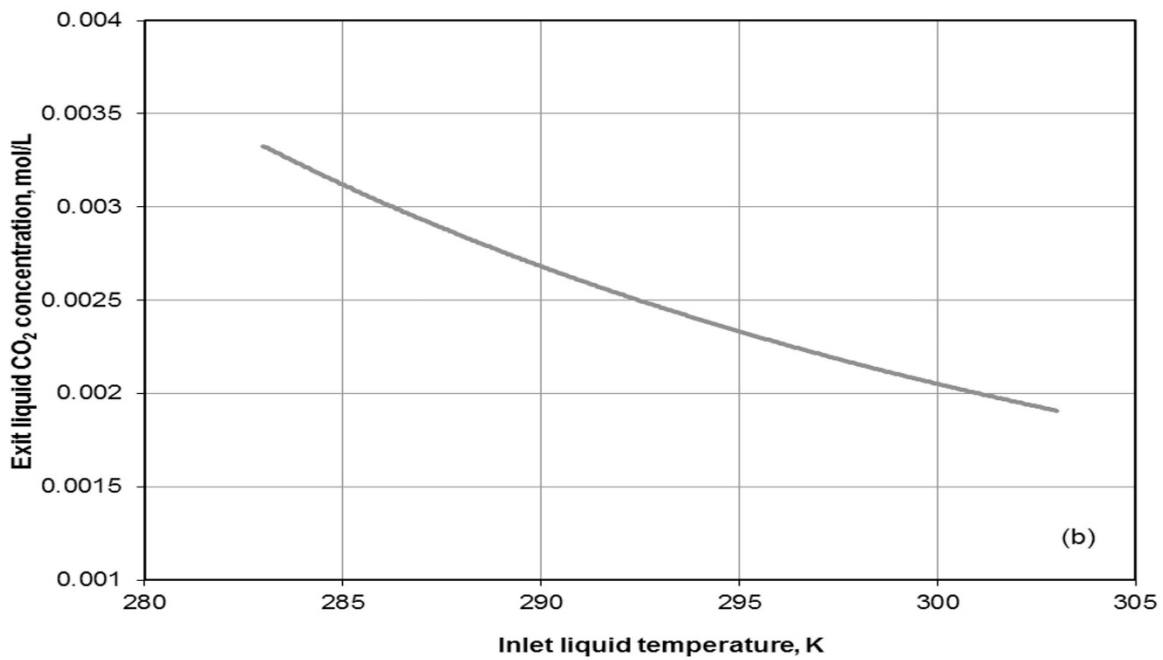
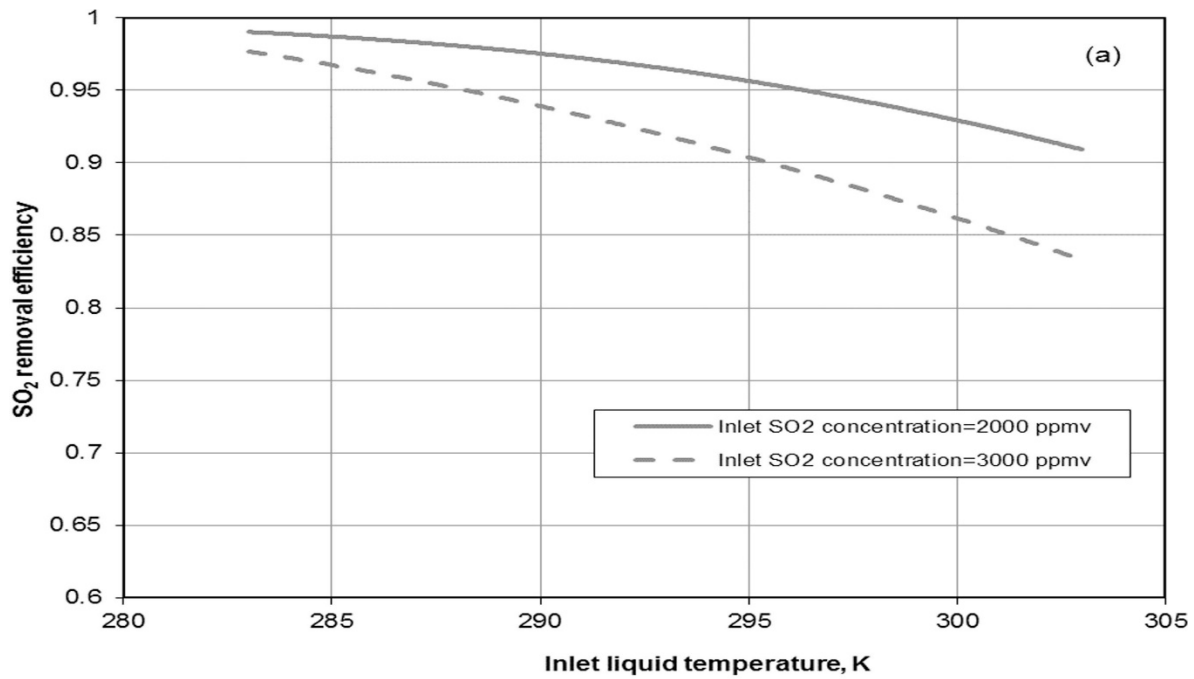


Figure 35 . Impact de la température du liquide d'entrée sur l'efficacité d'élimination du SO₂ (a) et la concentration de CO₂ du liquide de sortie (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du gaz d'entrée = 298 K ;
 $v_{sl}=0,01 \text{ ms}^{-1}$; $v_{qc}=1.5 \text{ ms}^{-1}$).

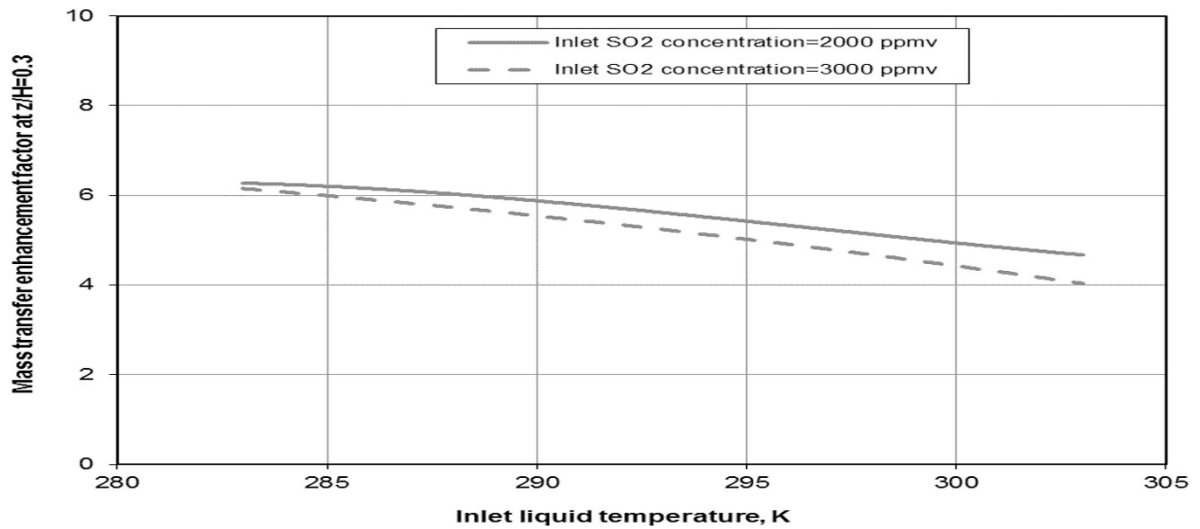


Figure 36 . Facteur d'amélioration du transfert de masse en fonction de la température du liquide d'entrée dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du gaz d'entrée = 298 K ; $v_{sl}=0,01 \text{ ms}^{-1}$; $v_{qc}=1.5 \text{ ms}^{-1}$.

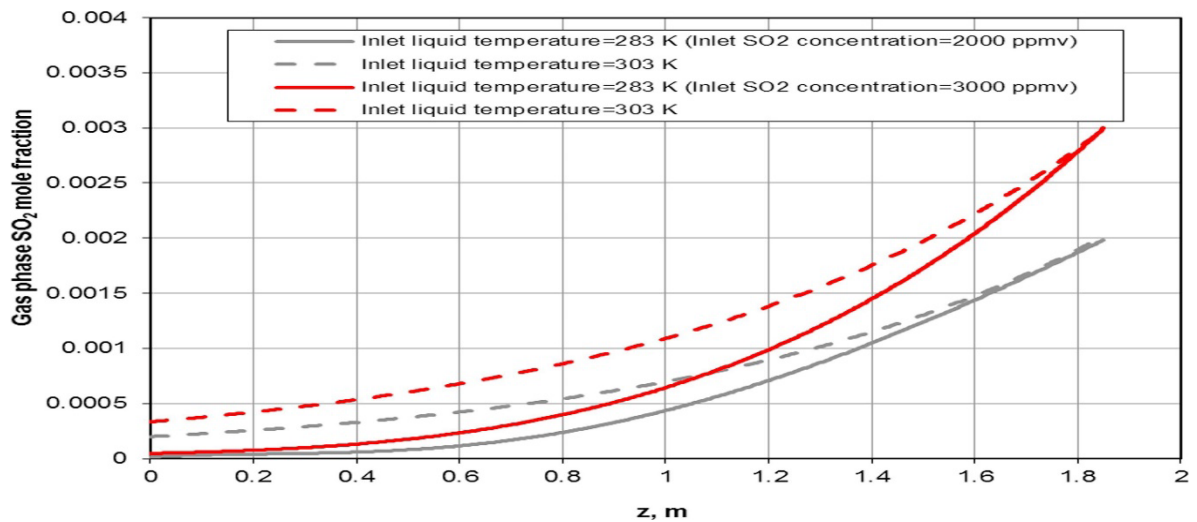


Figure 37 . Profils axiaux de la fraction molaire de SO_2 en phase gazeuse à différentes valeurs de température du liquide d'entrée dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du gaz d'entrée = 298 K ; $v_{sl}=0,01 \text{ ms}^{-1}$; $v_{qc}=1.5 \text{ ms}^{-1}$.

L'efficacité d'élimination du SO₂ augmente considérablement avec l'augmentation de la hauteur de la colonne à lit fixe à contre-courant (Fig. 38). Le processus d'absorption s'améliore avec l'augmentation de la hauteur de la colonne en raison de l'amplification du temps de contact gaz-liquide. La variation du pourcentage d'élimination de SO₂ est substantielle jusqu'à une hauteur de lit tassé d'environ 2m sous la gamme de variables étudiées dans ce travail.

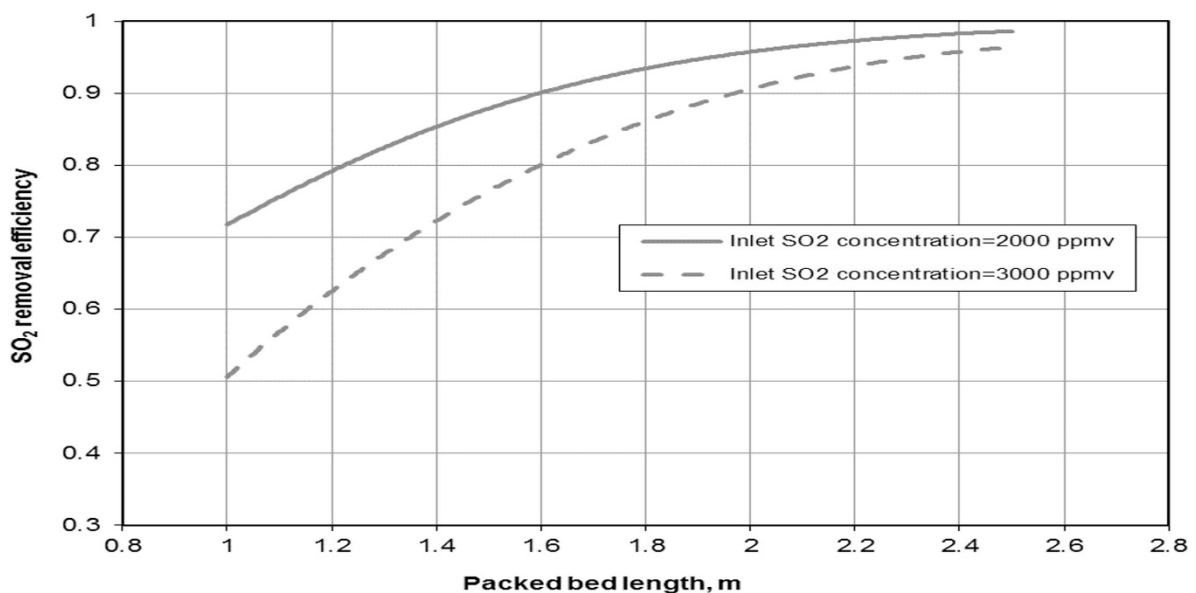


Figure 38 . Efficacité d'élimination du SO₂ par rapport à la longueur du lit garni - réacteur à colonnes à lit garni à contre-courant avec super-anneaux de Raschi.

L'impact du modèle cinétique d'absorption sur l'efficacité d'élimination du SO₂ et le facteur d'amélioration du transfert de masse est présenté à la Figure 39.

Le modèle cinétique développé pour l'absorption du SO₂ dans l'eau pure surpasse légèrement le modèle cinétique développé pour l'absorption du SO₂ dans une solution de NaCl utilisé dans ce travail pour simuler l'élimination du SO₂ dans l'eau de mer.

L'efficacité d'élimination du SO₂ est affectée négativement lors de l'utilisation du modèle cinétique développé pour l'absorption du SO₂ dans une solution de NaCl (Fig. 38)

en raison des valeurs plus faibles du facteur d'amélioration du transfert de masse dans la région supérieure du lit tassé (Fig. 39) où la force motrice du transfert de masse gaz-liquide est plus faible. Cependant, le modèle cinétique développé pour l'absorption du SO₂ dans l'eau pure peut être utilisé pour l'évaluation des performances d'épuration de l'eau de mer au SO₂ même s'il existe certaines différences dans l'évaluation du facteur d'amélioration du transfert de masse généré par la diffusivité et la constante d'équilibre.

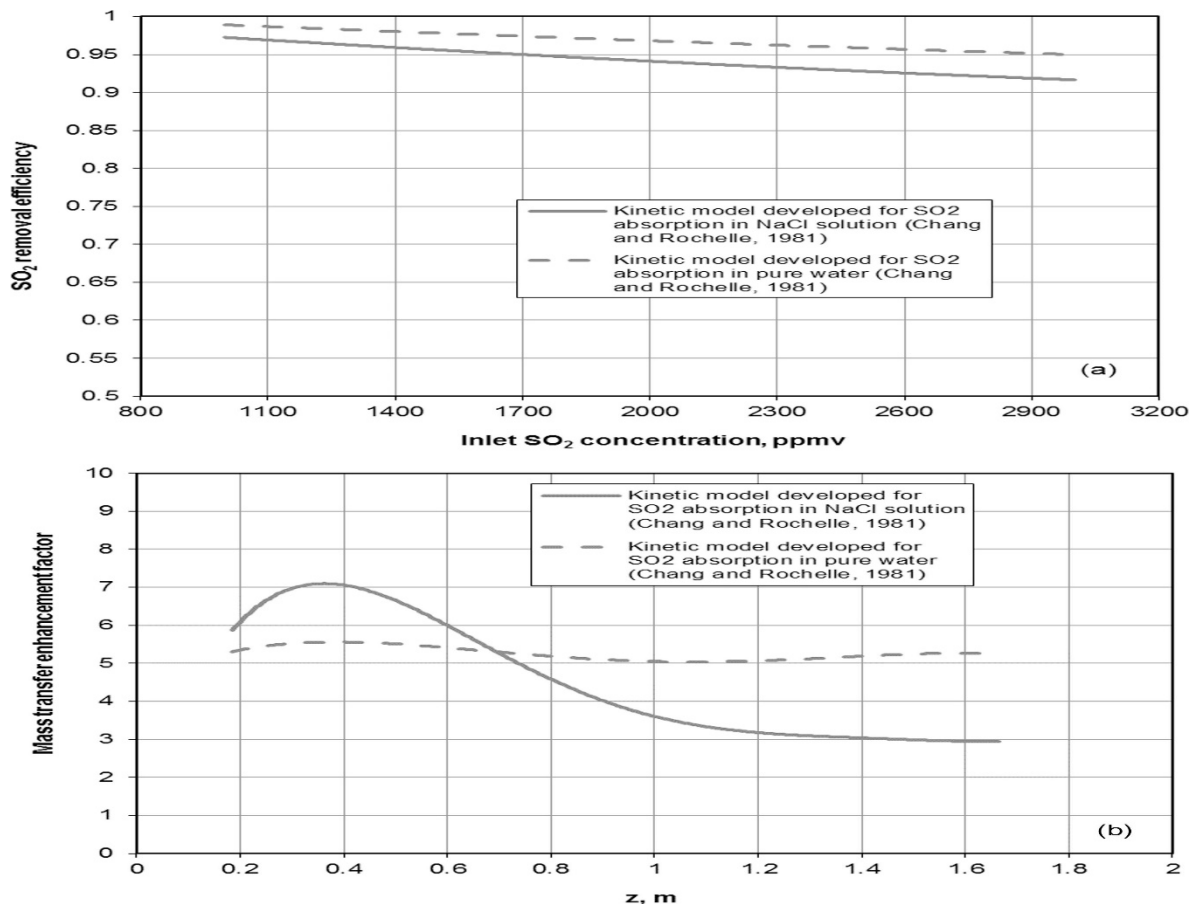


Figure 39 . L'impact du modèle cinétique d'absorption sur l'efficacité d'élimination du SO₂ (a) et le facteur d'amélioration du transfert de masse (b) dans une colonne à lit fixe à contre-courant avec des super-anneaux de Raschig.

Conditions de fonctionnement du cas de base : température du liquide et du gaz d'entrée = 298 K; $v_{sl}=0,01 \text{ ms}^{-1}$; $v_{qc}=1.5 \text{ ms}^{-1}$; Concentration de SO₂ à l'entrée = 1000 ppm v.

4.3 CONCLUSION

Les performances de l'épuration à l'eau de mer du SO_2 dans les réacteurs à colonnes à lit fixe à contre-courant ont été étudiées au moyen d'un modèle eulérien 3D basé sur les équations macroscopiques de continuité, de quantité de mouvement, d'espèces et d'équilibre énergétique moyennées en volume dans les phases liquide et gazeuse. Les principaux résultats indiquent que les colonnes à lit garni avec des garnissages de quatrième génération sont des réacteurs encourageants pour le processus d'absorption du SO_2 dans l'eau de mer à bord de grands navires marins pour le lavage à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins. L'amélioration offerte par les garnitures aléatoires de quatrième génération par rapport à la garniture standard est perceptible et représente une petite perte de charge biphasique à une efficacité d'absorption de SO_2 comparable.

Les performances du processus d'absorption de SO_2 par l'eau de mer dans les réacteurs à colonnes à lit fixe avec des garnissages aléatoires de quatrième génération peuvent être améliorées par l'augmentation du débit de liquide et la diminution de la température du liquide. Par conséquent, le lavage à l'eau de mer des gaz d'échappement des moteurs marins à bord des grands navires marins s'améliore considérablement dans les océans tempérés en raison de la température plus basse de l'eau de mer (températures moyennes comprises entre 10 et 20°C). Aux fortes concentrations de SO_2 à l'entrée, le processus d'absorption est sensiblement limité par l'amélioration du transfert de masse due à la réaction d'hydrolyse du SO_2 . Le fonctionnement avec une hauteur de lit supplémentaire permet d'amplifier le temps de contact gaz-liquide et par conséquent les performances du processus d'absorption.

L'augmentation de la pression améliore la force motrice du transfert de masse gaz-liquide et par la suite le processus d'élimination du SO_2 qui devient complètement à des valeurs inférieures du rapport liquide-gaz. L'épuration de l'eau de mer au SO_2 à une pression plus élevée augmente le coût en capital et les besoins énergétiques, mais offre des améliorations majeures : élimination totale du SO_2 à forte teneur en soufre et prévention de la perte de puissance du moteur en raison de la forte contre-pression à l'échappement entrant.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les émissions de polluants nocifs ne cessent d'augmenter avec le développement rapide de l'industrie. Les émissions des moteurs Diesel représentent la principale source de pollution. Afin de préserver l'écosystème et la biodiversité, l'OMI a imposé une réglementation assez stricte. Ces réglementations ont imposé des défis technologiques aux exploitants de navires. Depuis, on assiste à une multiplication des méthodes et des modèles appropriés qui se trouvent en concurrence. Plusieurs facteurs affectent le choix de la méthode appropriée de réduction des émissions des navires dont le type de navire, la puissance nominale, les problèmes économiques, l'adaptabilité et la conformité aux réglementations actuelles et futures sur les émissions.

Pour cela, on a examiné les technologies existantes de réduction des émissions 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%. Pour l'étude de notre cas, on a choisi la technologie post-traitement et précisément les épurateurs à gaz d'échappement.

Dans ce cadre, s'intègre notre contribution qui vise la création d'un modèle CFD pour les épurateurs à gaz en utilisant le garnissage à colonnes à lit fixe afin d'optimiser les émissions en SO_x . Ce modèle a été utile pour mener des simulations. En outre, nous avons commencé par une augmentation du débit du liquide et de la diminution de la température du liquide. Tel que cette température possède un rôle indispensable dans l'épuration de l'eau de mer au SO_2 vue qu'elle influence plusieurs paramètres dont la solubilité, la diffusivité, la viscosité et la constante de dissociation. On a observé, également, que la vitesse la plus importante est enregistrée au niveau région supérieure de la colonne à lit fixe où la force motrice du transfert de masse gaz-liquide est plus faible et l'augmentation du débit de liquide

compense la diminution de l'absorption taux. Ensuite, nous avons procédé à une variation de la concentration de SO₂ sous différentes conditions. En effet, on a observé que l'efficacité d'absorption diminue avec l'augmentation de la concentration de SO₂ à l'entrée et la diminution devient plus importante à des débits de liquide plus faibles.

Cette problématique reste encore le point d'intérêt de plusieurs chercheurs à travers le monde, où la construction des navires écologique commence dès la chaîne de production. Ceci nécessite un suivi de cette production durant différentes étapes. Alors, pour trouver des solutions il est indispensable d'imposer des réglementations plus strictes et d'encourager les innovations technologiques dans ce domaine.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.)] https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Tox_Proc_Colonne_garnissage_V0.pdf
- [2] [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- [3] <https://www.epa.gov/enforcement/marpol-annex-vi-and-act-prevent-pollution-ships-apps>
- [4] <https://doi.org/10.1051/shsconf/20185801004>
- [5] https://www.shsconferences.org/articles/shsconf/pdf/2018/19/shsconf_globmar2018_01004.pdf
- [6] <https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/securite-maritime/bulletins-securite-navires/nouveau-reglement-emissions-atmospheriques-produites-batiments-conformite-normes-relatives-emissions-atmospheriques-bsn-no-05-2013>
- [7] I. Komar and B. Lalić, "Sea Transport Air Pollution," in *Current Air Quality Issues*, 2015, ch. Chapter 8.
- [8] <https://openarchive.usn.no/usnxmlui/bitstream/handle/11250/2637942/Ashwin%20Chettri%20Master%20Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] Clarksons Research, 2019a, *Shipping Review and Outlook*, printemps.
- [10] Étude sur les transports maritimes 2019, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_fr.pdf.
- [11] <https://www.ifpenouvelles.fr/article/reduction-des-emissions-soufre-transport-maritime-defi-economique-et-technologique>
- [12] Le transport maritime, un secteur clé pour la lutte contre les émissions carbone, <https://www.sia-partners.com/fr/actualites-et-publications/de-nos-experts/la-strategie-initiale-de-lomi-comment-reduire>.
- [13] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/50/6/50_738/_article

[14] Beaudry, D. et Urli, B. (1994). Gestion de la dimension politique d'un projet de conception et d'implantation d'une méthode multicritère et d'allocation budgétaire. *Revue internationale en gestion et management de projets*, 1(3), 27-47

[15] 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/partenariats-organisations/prevention-pollution-navires.html>.

[16] 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.

[17] 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).

[18] https://www.researchgate.net/figure/IMO-emission-reduction-program-from-2000-to-2050-Reprinted-from-ref-12_fig2_353927057

[19] AirPaca, "Impact des émissions du transport maritime sur la qualité de l'air des zones portuaires," 2017.

[20] Marie-Charlotte GOURDAIN, "LE CONTROLE DES EMISSIONS D'OXYDE D'AZOTE DANS LE TRANSPORT MARITIME : ASPECTS TECHNIQUES ET JURIDIQUES," EAAM 2015.

[21] BARRELPARJOUR. "Changing marine fuel legislation – a curse or blessing for refineries?" <https://barrelperday.com/2017/06/20/changing-marine-fuel-legislation/> (accessed).

[22] ClearSeas;, "QU'EST-CE QUE L'OMI 2020?" <https://clearseas.org/fr/blogue/quest-ce-que-lomi-2020/> (accessed).

[23] 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.

[24] 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.

- [25] <https://www.scientific.net/AMM.170-173.3555>
- [26] 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).
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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).
- [30] W. Engines, "Wärtsilä 20DF," 2017.
- [31] <https://www.econology.info/forums/consume-less-car/ham-injection-and-water-man-anti-nox-in-the-engine-submarines-t14241.html>
- [32] 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-high-temperature-ammonia-powered-fuel-cell-for-shipping.html> (accessed).
- [33] 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.
- [34] 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).
- [35] A. Richel. "L'ammoniac liquide : un carburant vert pour le secteur du transport ?" <http://www.chem4us.be/energie/lammoniac/> (accessed).
- [36] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720378505>

[37] L. Goldsworthy, "Design of ship engines for reduced emissions of oxides of nitrogen," Australian Maritime College, 2002.

[38] <https://www.vroomly.com/blog/scr-selective-catalytic-reduction-fonctionnement-et-avantages/>

[39] S. Ibrahim, "Process evaluation of a SO_x and NO_x exhaust gas cleaning concept for marine application," 2016.

[40] 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.