

**UNIVERSITÉ MARITIME DE CONSTANTA  
FACULTÉ D'ÉLECTROMÉCANIQUE NAVALE  
DÉPARTEMENT D'INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**THÈSE DE DOCTORAT**

**RECHERCHES CONCERNANT LA RÉDUCTION  
DES EMISSIONS POLLUANTES PAR  
L'UTILISATION DES SYSTÈMES INNOVANTS DE  
PROPULSION NAVALE**

**-RÉSUMÉ-**

**DIRECTEUR SCIENTIFIQUE**

**Prof. univ. dr. ing. Nicolae BUZBUCHI**

**Doctorant  
Ing. Andreea ARSENIE**

**- CONSTANȚA –  
2015**

## ABRÉGÉ

La protection de l'environnement est devenue, surtout dans les dernières années, un problème visé constamment par l'attention des états et des gouvernements du monde, qui sont plus et plus concernés par les graves problèmes que pose la continuelle détérioration de l'environnement. Les effets à long terme de la pollution sur l'environnement, générés par le manque des réglementations à caractère sanctionnateur dans ce domaine, ont attiré l'attention des hommes d'état sur la nécessité d'élaborer des actes normatifs efficaces pour la lutte continuelle contre la pollution.

Le transport maritime génère environ 4% du total des émissions de CO<sub>2</sub> produites par les activités humaines, ce qui signifie que son empreinte de carbone est presque aussi grande que celle de l'Allemagne.

Les émissions générées par ce secteur ne sont pas encore réglementées au niveau international, mais ce problème est en cours de débat, à présent, dans le cadre de l'Organisation Maritime Internationale (IMO) et de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCONUSC).

En ce qui concerne les émissions des gazes à effet de serre (GES ou GHG – GreenHouse Gases), le transport maritime est le mode de transport le plus écologique. On estime cependant que, si on ne prend pas des mesures, les émissions générées par les navires augmenteront de 150-200% jusqu'en 2050. 50 000 navires commerciaux sont actifs à présent et ils transportent 90 % des cargos internationaux, ce qui signifie que le transport maritime est devenu indispensable pour l'économie mondiale [9].

Un rapport publié par le Centre Commun de Recherche (JRC) de la Commission Européenne offre une première appréciation d'ensemble concernant les méthodes d'estimation de la quantité des émissions atmosphériques générées par le transport maritime; il présente des solutions technologiques et analyse les options stratégiques de réduction des émissions de dioxyde de carbone et de la pollution atmosphérique dans ce secteur.

Le secteur des transports maritimes constitue une source de pollution atmosphérique. Si on ne prend pas des mesures, la pollution atmosphérique au long des principales artères maritimes s'aggraverà à cause d'une augmentation des émissions de dioxyde de soufre, estimée entre 10-20% dans les deux années suivantes. Le fioul utilisé comme carburant pour les navires a un contenu de soufre très élevé, qui varie entre la moyenne globale de 27,000 ppm (parts per million) et 10,000 ppm dans les zones de contrôle des émissions de soufre.

La présente thèse de doctorat, intitulée "RECHERCHES CONCERNANT LA RÉDUCTION DES EMISSIONS POLLUANTES PAR L'UTILISATION DES SYSTÈMES INNOVANTS DE PROPULSION NAVALE" est un œuvre complexe qui traite le sujet de recherche d'une manière holistique et qui réussit à viser tous les aspects liés à la réduction des émissions polluantes concernant un navire.

Mots clés: émissions nocives, mesures opérationnelles, techniques innovantes, recherches expérimentales

La table de matières de la thèse de doctorat est la suivante:

	<b>Pag.</b>
<b>Index de notations, symboles et abréviations</b>	<b>5</b>
<b>Index des notations</b>	<b>5</b>
<b>Index des symboles</b>	<b>7</b>
<b>Index des abréviations</b>	<b>8</b>
<b>La liste des tables</b>	<b>11</b>
<b>La liste des figures</b>	<b>13</b>
<b>Introduction</b>	<b>19</b>
1. La nécessité et l'opportunité du sujet proposé	<b>19</b>
2. Les objectifs de la thèse	<b>21</b>
3. L'organisation de la thèse	<b>22</b>
<b>Chapitre 1. Généralités</b>	<b>23</b>
1.1. Éléments généraux concernant le cadre législatif qui vise les émissions nocives dans l'industrie maritime	<b>23</b>
1.2. Tendances d'avenir concernant les émissions générées par le transport maritime	<b>24</b>
1.3. Les installations énergétiques utilisées au bord du navire	<b>26</b>
1.3.1. La classification des installations énergétiques	<b>26</b>
1.3.2. La structure du système énergétique du navire	<b>26</b>
1.4. L'utilisation des moteurs à combustion interne dans le système de propulsion du navire	<b>27</b>
1.4.1. Le rôle de l'installation de propulsion	<b>27</b>
1.4.2. La classification générale des installations de propulsion	<b>28</b>
1.4.3. Types d'installations de propulsion avec des moteurs à combustion interne	<b>28</b>
1.5. L'utilisation des moteurs à combustion interne dans le système électroénergétique du navire	<b>35</b>
1.5.1. La classification des systèmes électroénergétiques navals	<b>36</b>
<b>Chapitre 2. L'état actuel dans le domaine de la réduction des émissions nocives et de l'augmentation de l'efficacité des installations au bord des navires</b>	<b>41</b>
2.1. Stratégies technologiques implementées au bord des navires	<b>42</b>
2.1.1. Méthodes techniques de pré-traitement	<b>42</b>
2.1.2. Méthodes techniques primaires	<b>49</b>
2.1.3. Méthodes de reduction de post-traitement des émissions nocives	<b>55</b>
2.1.4. Technologies d'optimisation du système de propulsion du navire	<b>62</b>
2.1.5. Technologies d'optimisation du profil du corp du navire	<b>64</b>
2.1.6. La modification de la texture de la carène du navire	<b>65</b>
2.2. Mesures opérationnelles	<b>66</b>
2.3. Technologies et modes d'agir pour la réduction des emissions de gazes	<b>67</b>
2.4. La gestion de l'implémentation des technologies de réduction des émissions	<b>68</b>

	Pag.
nocives au bord des navires	
2.5. Techniques innovantes pour un transport maritime plus sûr et plus durable	70
2.5.1. Le système de propulsion hybride, diesel – électrique	70
2.5.2. Le système de propulsion alimenté par des sources régénérables	72
<b>Chapitre 3. Éléments de modélisation numérique des phénomènes et des processus générateurs d'émissions nocives</b>	<b>75</b>
3.1. Les combustibles utilisés pour les installations énergétiques navales	75
3.2. Le processus de combustion	77
3.2.1. Le calcul de la combustion complète	78
3.2.2. Le calcul de la combustion incomplète	83
3.3. La détermination de la température de combustion	86
3.4. La formation des émissions polluantes	87
3.4.1. La formation des oxydes d'azote	89
3.4.2. La formation des oxydes de soufre	94
3.4.3. La formation des particules mécaniques (PM) et des hydrocarbures non brûlés (HC)	97
3.5. Computational Fluid Dynamics (CFD)	98
3.6. Le modèle mathématique utilisé pour réaliser la simulation	100
3.6.1. Équations de transport utilisées dans CFD	100
3.6.2. Le taux de développement des processus chimiques dans le cadre des méthodes CFD	101
3.6.3. L'échelle de temps du fluide pour le modèle d'extinction	101
3.6.4. Le modèle de dissipation dans le tourbillon	102
3.6.5. Le modèle chimique du taux fini	103
3.6.6. Le modèle combiné EDM / FRCM	104
3.6.7. La linéarisation du terme de la source de combustion	104
3.6.8. Le modèle de l'élément de flamme	105
3.6.9. Le modèle de l'élément de flamme laminaire pour des processus de combustion sans pré-mélange des composants	106
3.6.10. Le couplage du modèle de l'élément de flamme laminaire avec un champ d'écoulements turbulents	108
3.6.11. Le modèle de la vitesse de combustion (pour le prémélange ou le prémélange partiel)	109
3.6.12. Le progrès de la réaction d'oxydation	109
3.6.13. Le progrès pondéré de la réaction d'oxydation	113
3.6.14. Le modèle de la vitesse de combustion	111
3.6.15. Proportions d'équivalence et la concentration du mélange stoechiométrique	111
3.6.16. La vitesse de la combustion laminaire	112
3.6.17. La corrélation de la proportion d'équivalence	112
3.6.18. L'équation polynomiale d'ordre cinq	113
3.6.19. L'équation second degré de désintégration	113
3.6.20. La fonction beta	113
3.6.21. La corrélation <i>Metghalchi et Keck</i>	113
3.6.22. La vitesse de la combustion turbulente	114
3.6.23. La correction <i>Zimont</i>	114

	<b>Pag.</b>
3.6.24. La corrélation <i>Peters</i>	114
3.6.25. La corrélation <i>Mueller</i>	116
3.7. L'effet de la turbulence sur la formation du NO	117
3.8. L'équation de variation du taux de formation du NO avec la température	153
3.9. La modélisation du processus de combustion dans le tube de flamme d'une turbine à gaz	117
3.9.1. La présentation du problème et de l'étape de prétraitement	117
3.9.2. Le traitement et le posttraitement	118
<b>Chapitre 4. L'estimation des émissions polluantes au bord du navire à l'aide des méthodes numériques</b>	<b>127</b>
4.1. La description des installations sur lesquelles on a effectué les déterminations	127
4.1.1. Les principales caractéristiques du navire	128
4.1.2. Le moteur principal	129
4.1.3. Les générateurs diesel	130
4.1.4. Les moteurs pour l'entraînement des pompes à cargaison	131
4.2. Précisions concernant le mode de détermination des données	132
4.3. L'interprétation des résultats obtenues aux épreuves effectués lors de la sortie du navire du chantier de construction navale	132
4.3.1. La description du modèle mathématique utilisé pour réaliser les diagrammes de variation des paramètres dans le programme MATHCAD	132
4.3.2. L'interprétation des résultats	134
4.4. La détermination de la concentration des émissions	149
4.4.1. La méthode analytique de détermination des concentrations	149
4.4.2. La méthode graphique de détermination des concentrations	151
<b>Chapitre 5. Validations et recherches expérimentales concernant l'influence de l'amélioration de la combustion dans les moteurs à combustion interne sur les émissions de gazes</b>	<b>163</b>
5.1 La validation des méthodes de contrôle des émissions polluantes par des déterminations	163
5.1.1 Cycles d'exécution des tests et facteurs de correction massique	163
5.1.2. La détermination du nécessaire d'aire stœchiométrique	164
5.1.3. La détermination du coefficient d'excès d'air	165
5.1.4. La détermination du rapport hydrogène – carbone	166
5.1.5 La détermination de l'humidité absolue de l'air d'alimentation	167
5.1.6. La détermination de la pression de saturation des vapeurs d'eau de l'air d'alimentation	167
5.1.7. La détermination de l'humidité absolue de l'air de balayage	168
5.1.8. La détermination de la pression à saturation des vapeurs d'eau dans l'air de balayage	168
5.1.9. La détermination des facteurs de correction sec/humide	168
5.1.10. La correction NO <sub>x</sub> pour humidité et température	171
5.1.11. La détermination du débit massique de gazes d'évacuation	172
5.1.12. La détermination des concentrations humides des composants des gazes d'évacuation	174

	<b>Pag.</b>
5.1.13. La détermination du rapport entre les densités des composants des gazes d'évacuation et la densité des gazes d'évacuation	<b>175</b>
5.1.14. La détermination du débit massique des composants appartenant aux gazes d'évacuation	<b>175</b>
5.1.15. La détermination des émissions spécifiques	<b>176</b>
5.1.16. La détermination de la valeur maximale admissible des émissions de NO <sub>x</sub>	<b>177</b>
5.1.17. La validation de la méthode et des résultats	<b>178</b>
5.2. L'impact sur l'environnement des systèmes modernes de propulsion du point de vue de l'augmentation de l'efficacité de la combustion	<b>181</b>
5.2.1 La description des équipements utilisés	<b>181</b>
5.2.2. Les caractéristiques du combustible utilisé et les stands expérimentales	<b>193</b>
5.2.3. La détermination expérimentale en conditions de laboratoire des émissions générées par le fonctionnement des moteurs à allumage à l'étincelle	<b>196</b>
5.2.4. L'interprétation des résultats en considérant la variation des émissions sur les 6 épreuves	<b>203</b>
5.2.5. La détermination expérimentale en conditions de laboratoire des émissions générées par le fonctionnement des moteurs Diesel	<b>207</b>
<b>Chapitre 6. Méthodes opérationnelles de réduction des émissions polluantes</b>	<b>209</b>
 <b>Conclusions</b>	 <b>221</b>
C1. Conclusions générales	<b>221</b>
C2. Contributions originales	<b>222</b>
 <b>BIBLIOGRAPHIE</b>	 <b>225</b>

Dans le texte suivant on présentera de manière succincte les éléments étudiés.

**Ainsi, le premier chapitre** traite de questions qui visent la législation nationale et internationale du domaine, avec un accent particulier sur les tendances d'avenir concernant les émissions générées par les transports maritimes.

S'y ajoutent une présentation complexe concernant les installations énergétiques utilisées au bord du navire et une description des systèmes de propulsion navale les plus utilisés.

**Le second chapitre**, intitulé „L'état actuel dans le domaine de la réduction des émissions nocives et de l'augmentation de l'efficacité des installations au bord des navires” présente les principales technologies de réduction des émissions dans le cas des navires, surtout celles qui se concentrent sur les émissions de NO<sub>x</sub> et de SO<sub>x</sub> et qui sont réglementées au niveau international.

L'utilisation de ces solutions techniques de réduction de NO<sub>x</sub> et de SO<sub>x</sub> a aussi comme résultat de réduire la consommation de combustible des moteurs; ont aussi comme effet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans les gazes d'évacuation des moteurs, parce que le pourcentage d'émissions de CO<sub>2</sub> est directement proportionnel avec le contenu de carbone dans le combustible.

Ces méthodes sont groupées dans trois grandes méthodes: prétraitement, méthodes primaires (ou méthodes internes) et méthodes secondaires (ou méthodes de post-traitement).

Toutes ces méthodes sont présentées en détail, avec des exemples concernant les stratégies technologiques d'implémentation au bord des navires.

On y présente également les technologies de réduction des émissions polluantes par l'optimisation du système de propulsion du navire, par l'optimisation du profil du corps du navire et par la modification de la texture de la carène.

On n'a pas oublié, dans cette étude complexe, le facteur humain; on y présente le mode de réduction des émissions polluantes par l'utilisation des mesures opérationnelles.

Sont décrites en fin de ce chapitre les systèmes modernes de propulsion, aussi bien que ceux hybrides (diesel – électrique) et ceux qui utilisent des ressources renouvelables.

**Le troisième chapitre**, intitulé „Éléments de modélisation numérique des phénomènes et des processus générateurs d'émissions nocives” présente les bases théoriques de la modélisation des phénomènes et des processus générateurs d'émissions nocives.

Cette étude commence par des notions de base: ce sont la présentation des éléments chimiques dont sont composés les combustibles liquides et gazeux et les équations de la combustion complète et incomplète.

Dans le cadre de ces études on présente le mode de formation des principaux composants des gazes de combustion:

- H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>;
- hydrates de carbones (comme par exemple: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>2</sub>, CHO etc.);
- monoxyde de carbone (CO);
- oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>);
- composés de l'azote comme NH<sub>3</sub> et HCN;
- des gazes sulfureux (SO<sub>2</sub>, OCS, CS<sub>2</sub>);
- halo-carbonates (CHCl et CH<sub>3</sub>Br);
- particules de matériel.

À la fin de ce chapitre on présente succinctement les méthodes numériques de modélisation de la combustion, ainsi qu'un exemple de modélisation de la combustion et

de l'écoulement des gazes combustionelles dans une chambre de combustion d'une turbine aux gazes.

Le quatrième chapitre est intitulé „**L'estimation des émissions polluantes au bord du navire à l'aide des méthodes numériques**”. À partir de ce chapitre, on commence de présenter les contributions personnelles au travail de doctorat.

Dans ce chapitre on propose deux méthodes d'estimation des émissions de gazes dans le cas d'un navire, d'une grande utilité aux équipages qui les emploient.

Afin de déterminer et de valider cette méthode on a utilisé les déterminations du navire M/T Aristidis de type pétrolier.

Ce navire a comme moteur de propulsion principal un moteur Wärtsilä DU Sulzer RT Flex 50 – 6 cylindres qui développe un pouvoir maximum de 9720kW et a un système permanent de surveillance des émissions polluantes.

Les méthodes qu'on a développées prennent comme point de départ les valeurs des éléments polluants dans les gazes d'évacuation qui sont déterminées lors de la sortie du navire du chantier, dans le cadre des tests d'acceptance.

Ces valeurs ont été introduites dans le cadre d'une matrice dans le programme MATHCAD. Cette matrice représente le point de départ de deux méthodes:

- **La méthode analytique** de déterminer les concentrations des composantes des gazes d'évacuation, en utilisant un programme de calcul réalisé dans MathCAD, et ayant comme données d'entrée les résultats obtenues par les mesurages effectués à la sortie du navire du chantier, après leur avoir appliqué des facteurs de correction
- **La méthode graphique** de déterminer les concentrations des composantes des gazes d'évacuation, en utilisant des diagrammes de variation des paramètres, dans lesquelles on introduit les résultats des mesurages effectués à la sortie du navire du chantier après leur avoir appliqué des facteurs de correction

**Le cinquième chapitre**, ayant comme titre „Validations et recherches expérimentales concernant l'influence de l'amélioration de la combustion dans les moteurs à combustion interne sur les émissions de gazes” comprend deux étapes principales de l'étude de doctorat.

Dans une première étape on valide les méthodes de détermination proposées dans le chapitre antérieur.

Ainsi, on a utilisé les déterminations enregistrées sur le même navire M/T Aristidis, dans la période 01.10.20013 – 27.03.2014.

En appliquant les deux méthodes exposées dans le chapitre antérieur et en comparant les résultats avec les mesurages enregistrés dans la période mentionnée plus haut, on a obtenu des erreurs sous 1,5%, ce qui valide ces méthodes.

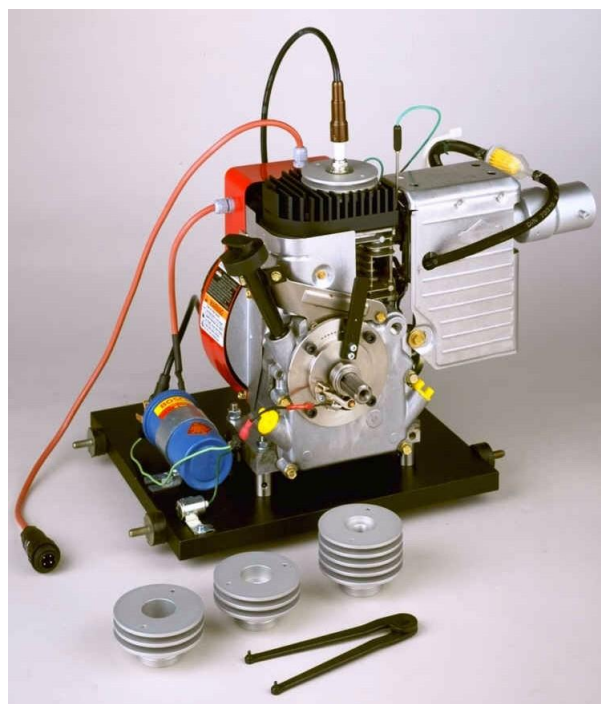


Dans la seconde partie du chapitre, on présente les résultats des études expérimentales concernant l'effet de l'amélioration de la combustion du combustible dans les moteurs à combustion interne sur les émissions de gazes.

Pour les déterminations expérimentales on a utilisé deux moteurs à combustion interne de petit pouvoir: CT 151 (moteur à quatre temps, qui fonctionne à gas-oil, de 1,5KW) et CT152 (moteur à quatre temps, qui fonctionne à l'essence, de 1,5KW).



Moteur CT 151



Moteur CT 152

Pour les déterminations expérimentales avec le moteur CT 152 on a utilisé 6 échantillons de combustible. En partant de l'essence standard de 95, d'une concentration de 5% bioéthanol, on a ajouté graduellement une dose de 2% bioéthanol et on a effectué les déterminations. Au total il y a eu 6 types de combustible. On a déterminé les concentrations de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub> et NO.

Pour les déterminations expérimentales avec le moteur CT 151 on a utilisé du gas-oil standard, mélangé de biodiesel (huile de colza) et on a pris 5 épreuves : la première a eu 0% supplément de biodiesel, la seconde a eu 15% de supplément, la troisième - 25%, la quatrième - 50% et la cinquième a été constituée de 100% de biodiesel. Dans le cadre de ces mesurages on a déterminé les concentrations de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub> et NO.

À la suite de ces résultats expérimentaux on a tiré les conclusions suivantes:

- D'après ce qu'on a observé dans le cadre de l'expériment, on peut affirmer qu'en améliorant la combustion des combustibles dans les moteurs à combustion interne, par une approche similaire à celle présentée plus haut, on arrive à réduire le niveau des émissions de certains catégories de polluants (hydrocarbures et

monoxydes de carbone), d'une part, et d'accroître le niveau des émissions d'autres catégories de polluants qui, semble-t-il, sont même plus nocifs que la première catégorie (oxydes d'azote).

- La seconde conclusion, détachée des variations du rendement du cycle moteur qui sont déterminées par les variations des paramètres caractéristiques aux combustibles, est que l'amélioration de l'efficacité de la combustion et implicitement l'amélioration du rendement du moteur (le développement d'un pouvoir plus grand avec la même consommation de combustible) conduit à une augmentation de l'efficacité économique de celui-là, ayant quand même, comme effet indirect l'augmentation de la pollution avec NO<sub>x</sub>.

**Le chapitre 6**, intitulé „Directions ultérieures de recherche – méthodes opérationnelles de réduction des émissions polluantes” présente une alternative viable face aux solutions techniques de réduction des émissions polluantes: les méthodes opérationnelles de réduction des émissions polluantes.

Ces méthodes sont prises en considération dans le cadre de l'Annexe VI a MARPOL qui introduit le concept d'efficacité énergétique d'un navire. Cette efficacité énergétique est obtenue principalement par des méthodes opérationnelles.

Ainsi, la tendance de variation des émissions de CO<sub>2</sub> doit être réduite par ces méthodes et le niveau estimé de ces émissions est le suivant:

<b>Anné</b>	<b>Émissions actuelles (mil. tonnes)</b>	<b>Réduction (mil. tonnes)</b>	<b>Niveau estimée (mil. tonnes)</b>
<b>2020</b>	1103	152	951
<b>2030</b>	1435	330	1105
<b>2040</b>	1913	615	1299
<b>2050</b>	2615	1013	1602

À la fin du chapitre on présente un plan opérationnel d'augmentation de l'efficacité énergétique d'un navire qui tient compte des aspects opérationnels suivants:

- L'optimisation du tirant d'eau et de l'assiette
- L'optimisation de la route navale en fonction des conditions météo
- Le réglage de la vitesse
- L'entretien du pilote automatique
- Le nettoyage de l'hélice
- Le nettoyage de la carène
- L'optimisation du fonctionnement des installations mécaniques
- L'entretien du moteur principal en fonction de son état
- L'optimisation du moteur principal en fonction des propriétés du combustible
- La ventilation des réserves et du compartement des machines

**En ce qui concerne les contributions personnelles, on peut mentionner les suivantes:**

1. On a réalisé une analyse très détaillée des normes et des réglementations internationales dans le domaine de la pollution qui provient de la zone de l'industrie maritime. Ainsi, on a mis en évidence l'importance actuelle de la protection de l'environnement marin, en soulignant les démarches législatives internationales en ce domaine.
2. On a réalisé une étude détaillée qui vise les installations énergétiques navales et leurs particularités. Ainsi, on a présenté la majorité des systèmes de propulsion utilisés au bord du navire, en partant des plus simples, comme les systèmes de propulsion avec moteur à combustion interne couplé directement avec l'axe port hélice, et finissant par les systèmes de propulsion combinés de moteur à combustion interne – la turbine qui entraîne aussi bien l'hélice que les générateurs de courant électrique.
3. On a effectué une étude détaillée concernant les méthodes de détermination des émissions résultées de l'exploitation des systèmes navales de propulsion, en partant des équations de combustion complète et incomplète en fonction de la pression de combustion et de la composition du combustible utilisé.
4. On a effectué une étude très élaborée concernant les méthodes et les méthodologies de réduction des émissions polluantes au bord du navire. Ainsi, on a présenté:
  - les technologies de réduction des émissions d'oxydes d'azote,
  - les technologies de réduction des émissions de bioxyde de carbone,
  - les technologies de réduction des émissions d'oxydes sulfureux
5. On a proposé deux méthodes d'estimation des émissions polluantes au bord du navire, une graphique et une autre analytique. Ces méthodes permettent à l'équipage de réaliser en temps réel et très rapidement le niveau de pollution du navire qu'ils exploitent.

6. On a validé les méthodes de détermination des émissions polluantes au bord du navire par la comparaison des résultats obtenus en appliquant la méthode mentionnée au point antérieur avec les indications obtenues au bord d'un navire moderne.
7. On a réalisé deux séries d'expériences, une sur un moteur à combustion à étincelle et l'autre sur un moteur diesel. Dans le cadre de ces expériences on a voulu déterminer la manière dont l'amélioration de la combustion affecte les émissions polluantes. Ainsi, on a augmenté la concentration de biocombustible en utilisant du bioéthanol et respectivement du biodiesel, ce qui a conduit à une amélioration de la combustion. En analysant les émissions polluantes on a constaté que la réduction des émissions CO et HC et l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> sont concomitantes. Ce fait s'explique par l'amélioration même de la combustion, ce qui est un phénomène bénéfique. Malheureusement la détermination des émissions d'oxydes d'azote nous indique que leurs niveaux s'élèvent. Cet effet était, lui aussi, à attendre, comme on l'explique de manière détaillée dans l'étude qui concerne les méthodes de détermination des émissions polluantes. Ce phénomène s'explique par le fait qu'avec l'amélioration de la combustion, la température et la pression dans la chambre de combustion augmentent, ce qui mène à l'apparition de composants plus complexes de l'azote avec l'oxygène et également à la croissance de leur concentration dans les gazes de combustion. Ces composants ont un effet cancérogène, comme il résulte de nombreuses études publiques. Une conclusion de la présente étude est qu'en ce moment, on a atteint du point de vue technique une limite concernant le niveau de pollution produit par un navire et les solutions de réduction des émissions polluantes doivent être cherchées dans le mode d'opérer le navire.
8. On a proposé un plan de réduction des émissions polluantes du navire par des méthodes opérationnelles.