



Hogere Zeevaartschool Antwerpen

La navigation polaire : les nouveaux enjeux de l'installation machine

Blandine Guénolé

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur: Tim Cools

année académique: 2019-2020

Avant-propos

Ce travail de fin d'étude est réalisé en vue de l'obtention du diplôme de Bachelor de l'Ecole Supérieur de Navigation d'Anvers en Mécanique Navale. Il a pour but d'étudier les différents types de navires polaires et l'installation machine associée. L'idée de ce mémoire est venue de mon stage en tant qu'élève officier mécanicien à bord du VN Sapeur en été 2019. Ce bâtiment de soutien et d'assistance affrété par l'armée est un ancien navire Norvégien qui ravitaillait les plateformes pétrolières et livrait du ciment dans des conditions climatiques souvent rudes. Le chef mécanicien du VN Sapeur, Arnaud Depoix ayant une expérience sur les navires polaires, a soumis le sujet de mémoire sur l'installation machine des navires polaires, je tenais donc à le remercier.

Grace à mon promoteur, Monsieur Tim Cools, j'ai ensuite pu cibler mon sujet sur les nouveaux enjeux énergétiques et environnementaux des navires qui sillonnent les zones polaires pour l'assistance, le transport, la recherche ou encore la croisière. Pour cela je tiens à Je tiens tout d'abord à le remercier car il s'est montré disponible pour m'aiguiller et me conseiller sur ce travail de fin d'étude. Je remercie aussi Madame Helen Verstraelen pour sa coopération sur la partie concernant l'environnement.

Ce travail a donc pour but de décrire comment un chantier va choisir un type de propulsion en fonction des attentes de l'armateur. Il explique aussi comment on peut préserver une installation machine et obtenir les meilleures performances tout en protégeant l'environnement. De plus, l'étude des textes officiels comme le Code Polaire permettra de définir un cadre à ce travail.

Je souhaitais aussi remercier aussi toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus en mécanique naval à l'Ecole Supérieur de Navigation d'Anvers. Mes pensées vont en premier lieu à mes parents et à ma sœur, à mes enseignants mais aussi à mes amis qui m'ont permis de réaliser ces études.

Résumé

Sous l'effet de l'augmentation de la fréquentation des régions polaires, les accidents et la pollution de l'air ont fortement grimper. Les assistances portées aux navires coincés dans les glaces sont aussi plus courantes. L'instauration du Code Polaire et de guides pour la construction obligent les constructeurs à innover et adapter les navires aux conditions de froid des zones polaires. L'enjeu de l'installation de la machine prend alors tout son sens au moment où le navire a besoins de sortir du pack, car la route est devenue trop encombrée, ou de lutter contre un incendie au milieu des icebergs. L'étude des différents types de propulsion que l'on peut trouver à bord des navires met en évidence la pollution liée à l'émission de gaz d'échappement. Le choix de la propulsion est fait en fonction de l'utilisation du navire et de la puissance que l'on souhaite lui conférer. De plus, les problèmes techniques à bord de ce genre de navires sont beaucoup plus nombreux qu'ordinaire. Il est primordial de porter une attention particulière aux installations auxiliaires et aux températures des liquides dans les conduites. Finalement, il existe plusieurs solutions pour limiter la pollution des navires dans ces zones à l'écosystème fragile.

Abstract

As a result of the increased attendance in the polar regions, accidents and air pollution have expanded sharply. Assistance to ships stuck in ice is also more common. The introduction of the Polar Code and guides for construction oblige the manufacturers to innovate and adapt the ships to the cold conditions of the polar zones. The challenge of the engine room is fully realised when the ship needs to get out of the pack because the road has become too congested or to fight a fire amid of icebergs. The study of the different types of propulsion that can be found on board ships highlights the pollution linked to the emission of exhaust gases. The choice of propulsion is made according to the use of the ship and the power that we want to give it. Besides, there are far more technical problems on board such vessels than usual. It is essential to pay particular attention to the auxiliary installations and the temperatures of the liquids in the pipes. Finally, there are several solutions to limit pollution from ships in these fragile ecosystem areas.

Table des matières

Liste des figures	8
Liste des tableaux.....	10
Liste des abréviations.....	11
Lexique	13
1. Introduction.....	15
2. La réglementation	17
2.1. Les classes des navires polaires	17
2.2. Le Polar Code	20
2.3. Recommandations et guides	22
2.4. Utilisation du fioul lourd.....	25
3. Les différents types de propulsion	27
3.1. Propulsion diesel.....	27
3.2. Propulsion électrique	30
3.3. Dual-fuel	34
3.4. Propulsion nucléaire.....	37
4. Les risques techniques liés à la navigation polaire	39
4.1. Simulation d'un problème de refroidissement dans des conditions extrêmes	39
4.2. Solution pour les problèmes typiques	42
5. Réduction et traitements des gaz d'échappement	45
5.1. Traitement des SOx.....	46
5.2. Traitement des NOx.....	50
5.3. Traitement des particules en suspension.....	54
5.4. Réduction des émissions de CO ₂	56
6. Conclusion	59
Bibliographie.....	61

Liste des figures

Figure 1 : Organisation du Code Polaire.....	20
Figure 2 : Mesures pour la protection de l'environnement	21
Figure 3 L'Astrolabe	23
Figure 4 : Carte représentant les zones à émission contrôlée	25
Figure 5 : Dépôt de noir de carbone sur la banquise.....	26
Figure 6 : Le Polarfront dans les glaces.....	27
Figure 7 : Représentation schématique d'un moteur diesel.....	28
Figure 8 : Cycle d'un moteur diesel 4 temps.....	29
Figure 9 : US Coast Guard Healy	30
Figure 10 : RRS Sir David Attenborough.....	31
Figure 11 : Représentation des parties énergies et propulsions	31
Figure 12 : Redresseur	32
Figure 13 : Cyclo-convertisseur.....	32
Figure 14 : Synchro-convertisseur	33
Figure 15 : Convertisseur à commutation force.....	33
Figure 16 : Description du Commandant Charcot	34
Figure 17 : Représentation d'un moteur 2 Temps Dial-fuel.....	35
Figure 18 : Schéma de la machine d'un moteur 4 Temps Dual-fuel.....	35
Figure 19 : L'Arktika.....	37
Figure 20 : Fonctionnement d'un réacteur nucléaire.....	37
Figure 21 : Réacteur nucléaire à eau pressurisée	38
Figure 22 : Système d'aspiration de l'eau de mer.....	39
Figure 23 : Système de refroidissement d'eau douce	41
Figure 24: Arrangement des prises eau de mer.....	42
Figure 25 : Accumulation de glace dans le fond de la machine	43
Figure 26 : Composition moyenne d'un gaz d'échappement d'un moteur diesel	45
Figure 27 : Scrubber en circuit fermé	46
Figure 28 : Répartition des élément du scrubber	47
Figure 29 : Scrubber en circuit ouvert et en circuit fermé	48
Figure 30 : Acidification des océans du au CO2	49
Figure 31 : Le Nordica.....	50

Figure 32 : Catalyseurs en forme de plaque et en nid d'abeille.....	51
Figure 33 : Réduction Catalytique selective	52
Figure 34 : Système de réduction catalytique sélective	53
Figure 35 : Filtre à particules.....	54
Figure 36 : Filtre à particules vue de l'extérieur	55
Figure 37 : Organisation de SEEMP.....	56
Figure 38 : Bulbe d'un navire.....	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparatif des classes des navires polaires	17
Tableau 2 : Comparatif des navires polaires et brise-glaces.....	19

Liste des abréviations

AC	Alternative courant (Courant alternatif)
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
DF	Dual Fuel (Bi-carburant)
DNV	Det Norske Veritas (Bureau Véritas de Norvège)
ECA	Emission Control Area (Zone à émission contrôlée)
EEDI	Energy Efficiency Design Index (Indice de conception de l'efficacité énergétique)
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator (Indicateur opérationnel d'efficacité énergétique)
g	gramme
GNL	Gaz Naturel Liquéfié (LNG)
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HC	Hydrocarbure
HFO	Heavy Fuel Oil (Fioul lourd)
H ₂ O	Monoxyde de dihydrogène (Eau)
IACS	Association Internationale des Sociétés de Classification
kW	Kilo Watts
LTFW	Low Temperature Fresh Water (Circuit d'eau douce à basse température)
m	mètre
MARPOL	Marine Pollution (Pollution Marine)
MW	Méga Watt
NaOH	Hydroxyde de Sodium
Na ₂ SO ₃	Sulfite de Sodium

NH ₃	Ammoniaque
NO _x	Oxyde d'azote
NOR	Nitrogen Oxide Reducer (Réducteur d'oxyde d'azote)
N ₂	Diazote
OMI	Organisation Maritime Internationale
O ₂	Dioxygène
PC	Polar Class (Classe Polaire)
pH	Potentiel Hydrogène
PM	Particulate matter (Particule en suspension)
rpm	Rotation par minutes
RRS	Royal Research Ship (Navire de recherche royal)
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan (Plan de gestion de l'efficacité énergétique des navires)
SCR	Selective Catalytic Reduction (Réduction catalytique sélective)
SOLAS	Safety Of Life At Sea (Sauvegarde de la vie humaine en mer)
SO _x	Oxyde de soufre
tr/min	Tour par minute
TBCH	Turbocharger (Turbocompresseur)
ULSFO	Ultra Low Sulphur Fuel (Fioul à très faible teneur en soufre)
UMS	Universal Measurement System (Système de mesure universel)
USCGC	United States Coast Guard Cutter (Brise-glace de la garde côtière des Etats-Unis)
VLSFO	Very Low Sulphur Fuel (Fioul à très faible teneur en soufre)

Lexique

Azipod	Propulseur azimutal à pods électriques
Balais	Contact mécanique glissant, transmettant le courant électrique entre la partie tournante d'une machine et son circuit intérieur fixe
Ballast	Réservoir d'eau permettant d'assurer la stabilité d'un navire
Bus	Electrotechnique, ensemble de conducteurs pouvant relier plusieurs appareils ou dispositifs
Collecteur	Organe permettant une connexion entre la partie fixe et la partie tournante du moteur électrique
Consommateur	Ensemble des dispositifs nécessitant un apport en énergie électrique (ex : éclairage, pompes, propulseur d'étrave...)
Coquerons	Compartiments étanches situés à la pointe avant et la pointe arrière du navire
Couple	Effort en rotation appliqué à un axe, en Newton-mètre
Eau libre	Eau libre de glace, dégagée de banquise
Flashpoint	Température à laquelle un composé organique particulier dégage suffisamment de vapeur pour s'enflammer dans l'air
Fioul Pilote	Fioul qui permet l'allumage du gaz dans un moteur dual-fuel
Frasil	Fines aiguilles ou plaquettes de glace en suspension dans l'eau
Guindeau	Treuil de pont utilisé pour relever l'ancre ou virer les amarres
Harmonique	Composantes sinusoïdales d'un courant électrique, description de la distorsion d'un signal
Ice Class	Classe des navires polaires
Inerter	Remplacement d'un gaz explosif par un gaz inerte, gaz qui n'a pas d'activité chimique
Installation machine	Ensemble des composants se situant dans la salle des machines, liés à la propulsion, la gouverne, le système de lutte incendie, la production d'eau et d'électricité et les appareils de pont hydraulique.

Moteur Asynchrone	Machine produisant ou absorbant un courant électrique, à courant alternatif
Moteur Synchrone	Machine produisant ou absorbant un courant électrique, la fréquence et la vitesse du moteur sont liées
Noir de Carbone	Forme élémentaire du carbone, on le retrouve dans les suies. Composant polluant de l'air, utilisé dans l'industrie pétrochimique
Pack	Banquise ou plaques de glace
pH	Unité de mesure de l'acidité, l'échelle allant de 1 à 14
Port en lourd	Chargement maximal qu'un navire peut emporter, inclut les marchandises, les consommables et le personnel
Positionnement Dynamique	Système contrôlé par ordinateur qui permet à un navire de maintenir sa position en utilisant ses propres moyens de propulsion
Réducteur	A pour but de modifier le rapport de vitesse entre l'axe d'entrée et de sortie du moteur
Thyristor	Composant semi-conducteur, permet de déclencher le passage du courant dans une seule direction
Vapeur Saturée	Vapeur contenant une quantité importante de molécules d'eau en suspension
Vapeur Surchauffée	Vapeur à une température supérieure à la température de saturation
Vieille glace	Glace de plus d'un an, ayant survécu à au moins un été de fonte, plus arrondie que la glace de première année
Viscosité	Propriété d'un fluide à résister à l'écoulement uniforme et sans turbulence

1. Introduction

Depuis quelques années, le nombre de navires empruntant le passage du Nord-Ouest et du Nord-Est en Arctique n'a cessé d'augmenter. Il en est de même pour la zone polaire Antarctique qui se retrouve envahie de navires de croisières, très en vogue depuis une dizaine d'années. Cette hausse de la fréquentation entraîne la création du Code Polaire. Il a pour but de réguler les classes des navires polaires, donner des indications sur la construction, réguler les émissions de gaz d'échappement et les rejets de déchets. Le durcissement des réglementations forcent les constructeurs à trouver des solutions pour réduire les rejets de gaz d'échappement, en choisissant un système de propulsion plus propre, en modifiant des machines déjà existantes ou en ajoutant des systèmes de traitement des gaz d'échappement. De plus, les températures extrêmes nous obligent à adapter la salle des machines car le gel d'une conduite, de l'huile, ... pourrait avoir des conséquences désastreuses pour le reste du voyage.

Dans un premier temps, j'ai voulu étudier la réglementation du Code Polaire, de MARPOL et de SOLAS pour comprendre à quoi sont confrontés les armateurs quand ils décident de faire construire un navire polaire. La législation permet de choisir la classe du navire en fonction de l'utilisation que l'on va en faire. Plusieurs types de navires sont amenés à traverser les glaces ou juste passer à côté, comme les navires de transport de marchandises, les navires de croisière, ou encore les brise-glaces. Ces derniers se divisent en trois catégories : les navires d'assistance, les navires de recherche et/ou de ravitaillement et les navires dédiés à la souveraineté et à la patrouille. De plus, les guides édités par les sociétés de classification donnent de bonnes indications sur les problèmes techniques que l'on peut rencontrer dans les glaces et les enjeux de l'installation machine dans des conditions extrêmes. Depuis le 1^{er} janvier 2020, l'Organisation Maritime Internationale a aussi décidé que le taux de soufre devait être limité à 0,5% dans le carburant. Cette règle met en péril les écosystèmes des zones polaires car les substituts du soufre sont très dangereux pour l'environnement.

Pour poursuivre mes recherches, j'ai décidé de recenser les différents types de propulsions que l'on pouvait retrouver sur un navire polaire et pourquoi un armateur va choisir un système de propulsion plutôt qu'un autre. Pour cela, je me suis d'abord penchée sur les moteurs diesel 4 Temps, moteur que l'on retrouve fréquemment dans les glaces car ils sont sûrs et faciles d'entretien, et offrent une facilité de manœuvre appréciable.

Ensuite, j'ai étudié les navires avec une propulsion électrique. La partie énergie est fournie par des moteurs diesels, qui est transformée en énergie électrique à l'aide de convertisseurs et des moteurs électriques assurent la propulsion. Ce type d'installation est très prisée par les chercheurs car elle fait moins de bruit sous-marin et qu'elle permet une précision de navigation grâce au système de positionnement dynamique. Les moteurs dual fuel sont aussi très plébiscités par les armateurs car l'utilisation du gaz naturel en plus d'être peu coutant, est écologique et n'oblige pas l'installation de station de traitement des gaz d'échappement. Enfin, la propulsion nucléaire est la plus courante à bord des brise-glaces d'assistance car cette installation est très puissante. Cela permet de créer des chemins dans les glaces ou remorquer un navire bloqué dans le pack.

Dans le chapitre quatre, j'ai souhaité détailler les différents problèmes techniques liés à la navigation hivernale. Pour comprendre le mécanisme de la machine en avarie, j'ai effectué une simulation sur ordinateur. Cette étape m'a permis d'exposer un problème courant à bord des navires : le gèle des prises d'eau de mer. Le refroidissement est essentiel au bon fonctionnement de n'importe quel moteur et l'interruption de ce processus entraine une grande réaction en chaine, se soldant par un ralentissement du navire voire un arrêt total des moteurs. D'autres problèmes peuvent aussi survenir comme le refroidissement du carburant, de l'huile ou encore le gel des ballasts. Ils sont à traiter avec le plus grand sérieux car ces problèmes peuvent avoir de lourdes conséquences sur la bonne marche du navire.

Les moyens pour limiter les gaz d'échappement sont aussi au cœur du débat car la pollution de l'air dans les zones polaires augmente la rapidité du réchauffement climatique. Les émissions d'oxydes d'azote (SOx) et de soufre (NOx) sont à surveiller de près, ainsi que le CO₂. Les installations pour limiter ces gaz polluants sont limitées et ne sont pas toujours possibles sur des navires existant. Les scrubbers sont très demandés pour réduire le SOx mais leur utilisation est très controversée car ils déplacent la pollution. L'utilisation d'un système de réduction catalytique sélective permet de nettoyer les gaz d'échappement des NOx mais il comporte aussi des inconvénients. Enfin, pour réduire les émissions de particules et de CO₂, plusieurs méthodes sont à envisager, comme la pose d'un filtre, la réduction de la vitesse des navires ou encore la pose d'un bulbe adapté.

2. La réglementation

Naviguer dans les zones polaires nécessite un certain nombre de règles. La mise en place d'un système de classification des navires polaires uniforme ainsi qu'un guide pour la construction est essentiel afin de limiter les accidents dans des endroits hostiles où un navire d'assistance peut mettre plusieurs jours à arriver. De nombreuses règles et recommandations sont aussi mises en place par le Code Polaire, par MARPOL, et par les sociétés de classification. L'ensemble de ces codes et guides permet aussi de choisir quel type de navire l'armateur peut commander à un chantier, en fonction de l'utilisation que l'on va en faire.

2.1. Les classes des navires polaires

Classe	Notation Glace	Description	Epaisseur
IACS Pt. 5 Chap. 1 Sec. 8	PC-1	Toute l'année dans les eaux polaires	3m
	PC-2	Toute l'année dans des glaces modérés	3m
	PC-3	Toute l'année dans des glaces de deux ans avec inclusion de vieilles glaces	2,5m
	PC-4	Toute l'année dans des glaces d'un an avec inclusion de vieilles glaces	1,2m
	PC-5	Toute l'année dans des glaces moyenne d'un an avec inclusion de vieilles glaces	0,7-1,2m
	PC-6	Été/Automne dans des glaces d'un an avec inclusion de vieilles glaces	0,7-1,2m
	PC-7	Été/automne dans des glaces minces d'un an avec inclusion de vieilles glaces	0,7m
RS Pt. 1 2.2.3.1	Arc9	Glaces de plusieurs années	4m
	Arc8	Glaces de plusieurs années	3m
	Arc 7	Glaces de deux ans	1,7m
	Arc6	Glaces épaisses d'un an	1,3m
	Arc5	Glaces moyennes d'un an	1m
	Arc4	Glaces fines d'un an	0,8m
	Ice3	Navires non arctiques	0,7m
	Ice2	Navigation indépendante dans la banquise ouverte	0,55m
	Ice1		0,4m

Tableau 1 : Comparatif des classes des navires polaires

Source : Propre travail

Les classes de navires permettent de déterminer les caractéristiques qu'un navire doit posséder pour pouvoir franchir un certain type de glace. L'épaisseur des glaces inscrit dans les classes peut aller de 0,4 à 4 mètres.

La certification glace est rendu obligatoire par le Code Polaire depuis le 1^{er} janvier 2017. Des catégories ont été mises en place par les sociétés de classification et supervisées par l'Association Internationale des Sociétés de Classification (IACS) et l'Organisation Maritime Internationale (OMI). Un navire possède donc une « ice class » déterminée par la société de classification. Un tableau des équivalences des classes peut être établie. On observe aussi que le tableau 1 donne une description générale des types de glaces que le navire doit pouvoir franchir sans risque.

Les types de classes les plus représentés sont les PC. Ils sont utilisés par l'IACS et servent souvent de référence pour les autres classes. Plus le chiffre de la classe est bas, plus le navire peut naviguer dans des conditions de glace dense et épaisse. Par exemple, un navire classé PC-1 peut avancer toute l'année, dans les eaux polaires, dans une glace épaisse jusqu'à 3 mètres. A l'inverse, un navire PC-7 peut seulement naviguer d'août à septembre, dans une glace de première année avec des inclusions de vieilles glaces, dans une glace épaisse jusqu'à 70 centimètres.

D'après le document édité par la compagnie Latitude Blanche, Ice Academy, la navigation dans les glaces est contraignante et nécessite certaines adaptations des navires et de la navigation. Cependant, les navires polaires possèdent certaines caractéristiques semblables. En machine, celles qui nous importent le plus sont : [4]

- La résistance de la coque, celle-ci devant être plus épaisse et renforcée conformément à la classe polaire du navire
- L'aspiration et le circuit d'eau de mer qui doivent être protégés du givre au moyen d'une grille ou d'un système de chauffage car la glace peut s'accumuler au niveau des puits d'aspiration
- Des protections pour l'hélice et le gouvernail
- Des capacités de vivre et de carburant plus importantes avec leur système de réchauffage
- Et enfin, une machine plus puissante qui permettra au navire d'évoluer dans les glaces sans encombre

DNV Class Notations	Equivalent Baltic (Finnish-Swedish) Ice class	Vessel Type	Ice Condition	Impact Limits
ICE-C	1C 1B 1A 1A Super	All ship types	Very light ice condition	No ramming
ICE-1C			First year ice and Broken channel: 0.4 m ice thickness	
ICE-1B			0.6 m ice thickness	
ICE-1A (PC-7)			0.8 m ice thickness	
ICE-1A* (PC-6)			1.0 m ice thickness	
ICE-1A* F			1.0 m ice thickness	
ICE-05 ICE-10 ICE-15		Vessels intended for ice breaking	First year ice with pressure ridges	Occasional ramming
POLAR-10 POLAR-20 POLAR-30		Built for another main purpose	Multi-year ice with glacial inclusions	
ICEBREAKER		Icebreaking is main purpose		

Table 2: DNV rules and other requirements – hull

Baltic (Finnish-Swedish) Ice class	Polar Ice Class	Operating conditions	Winterised
	PC-1	All ice-covered waters year-round	ARCTIC
	PC-2	Moderate multi-year ice year-round	
	PC-3	2nd year ice year-round	
	PC-4	Thick 1st year ice year-round	COLD
	PC-5	Medium 1st year ice year-round	
ICE-1A*	PC-6	Medium 1st year ice summer/autumn	
ICE-1A	PC-7	Thin 1st year-ice summer/autumn	BASIC
ICE-1B			
ICE-1C			

Tableau 2 : Comparatif des navires polaires et brise-glaces

Source : Amarine

Sur le tableau 2, on peut voir d'autres équivalences. Notamment la relation entre la classification de la société de classification DNV (Det Norske Veritas) basée en Norvège et la classification Finlande-Suédoise pour la navigation dans la mer Baltique. Un parallèle est aussi fait avec les Polar-Class de l'IACS. Ces équivalences permettent de savoir comment un navire va être construit et quels types de glace il va pouvoir affronter. [14]

2.2. Le Polar Code

Le Code Polaire, ou Recueil de règles obligatoires pour les navires exploités dans les eaux polaires, a été créé par l'OMI dans le but de réduire l'impact des navires sur l'environnement et les hommes dans les eaux polaires. Il s'applique aux navires de commerce et aux navires à passagers de plus de 500 UMS (Universal Measurement System) et concerne les eaux Arctique et Antarctique entre autres. [13]

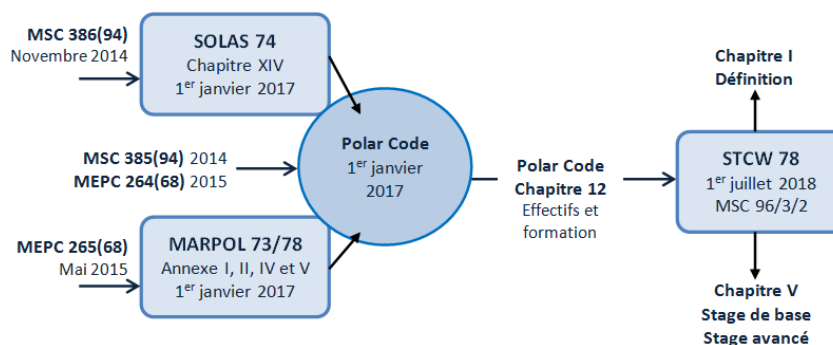


Figure 1 : Organisation du Code Polaire

Source : Organisation Maritime International

Le Code Polaire vient ainsi compléter des conventions existantes, telles que MARPOL et SOLAS. Il est divisé en 2 parties : I et II. Les parties I-A et II-A sont obligatoires pour tous les navires et les parties I-B et II-B sont des recommandations concernant la construction, l'exploitation et la maintenance des navires.

La première partie du Code divise les navires polaires en trois catégories : la catégorie A qui concerne les navires exploités dans des glaces de première année pouvant inclure des vieilles glaces, la catégorie B pour les navires exploités dans des glaces fines de première année et la catégorie C pour les navires avançant dans des eaux libres. [17]

La partie du Code qui nous intéresse ici est la partie du code qui concerne l'installation machine et l'environnement. D'après MARPOL Annexe I, le transport et l'utilisation de fioul lourd est interdit en Antarctique, le Code Polaire précise que cette règle n'est pas obligatoire en Arctique mais il est fortement conseillé de la suivre. Après discussion, l'obligation d'utiliser de l'huile de lubrification minérale a été abandonnée. Les armateurs désireux d'être respectueux de l'environnement peuvent suivre ce conseil mais rien n'est obligatoire.

Le Chapitre 6 du Code Polaire concernant l'installation machine est composé de neuf règles, divisées en trois parties. La première partie concerne l'infiltration de glace et/ou de neige dans les circuits machine. Il est dit que les circuits doivent être protégés du froid afin de conserver une viscosité des liquides convenable et que les aspirations d'eau de mer doivent être protégées des infiltrations de glace. La deuxième partie concerne l'air dans la machine. Le plus important étant l'aspiration d'air qui doit être maintenue à une température convenable pour le bon fonctionnement du moteur. La troisième partie vise l'appareil à gouverner, l'arbre d'hélice et les pales d'hélice. Il faut évidemment maintenir ce système dans un état de fonctionnement normal au vu des conditions hostiles. [9]

Sur la figure 2, on peut voir toutes les mesures prises pas l'OMI pour lutter contre la pollution dans les zones polaires.

COMMENT LE RECUEIL SUR LA NAVIGATION POLAIRE PROTÈGE L'ENVIRONNEMENT

HYDROCARBURES

REJETS
Le rejet à la mer d'hydrocarbures ou de mélanges contenant des hydrocarbures provenant d'un navire, quel qu'il soit, est interdit.

STRUCTURE
Tous les pétroliers, y compris ceux d'un port en lourd inférieur à 5 000 tonnes (navires des catégories A et B construits le 1er janvier 2017 ou après cette date) doivent avoir une double coque et un double fond.

FUEL-OIL LOURD
Le fuel-oil lourd est interdit dans l'Arctique (en vertu de MARPOL). Les navires sont encouragés à ne pas utiliser ou transporter du fuel-oil lourd dans l'Arctique.

LUBRIFIANTS
Envisager d'utiliser des lubrifiants biodégradables non toxiques ou des systèmes à base d'eau pour les éléments lubrifiés en dehors de la partie immergée de la coque qui sont en interface directe avec l'eau de mer.

Eaux Usées

REJETS I
Aucun rejet d'eaux usées dans les eaux polaires n'est autorisé (sauf dans des conditions spécifiques).

INSTALLATIONS DE TRAITEMENT
Le rejet est autorisé si le navire est doté d'une installation de traitement des eaux usées d'un type approuvé et si le rejet des eaux usées traitées est effectué aussi loin que possible dans la pratique de la terre la plus proche, de toute banquise côtière, de tout plateau de glace ou des zones présentant une concentration de glace spécifique.

REJETS II
• Les eaux usées qui n'ont pas été broyées ou désinfectées peuvent être rejetées à une distance de plus de 12 milles marins de tout plateau de glace ou toute banquise côtière.
• Les eaux usées qui ont été broyées et désinfectées peuvent être rejetées à une distance de plus de 3 milles marins de tout plateau de glace ou toute banquise côtière.

ORDURES

MATIÈRES PLASTIQUES
Tout rejet de matière plastique est interdit (en vertu de MARPOL).

DÉCHETS ALIMENTAIRES I
Le rejet de déchets alimentaires sur les glaces est interdit.

DÉCHETS ALIMENTAIRES II
Le rejet de déchets alimentaires qui ont été broyés ou concassés (pour pouvoir passer à travers un tamis dont les ouvertures ne dépassent pas 25 mm) est uniquement autorisé lorsque le navire se trouve à une distance supérieure à 12 milles marins de la terre la plus proche, du plateau de glace le plus proche ou de la banquise côtière la plus proche.

CARCASSES D'ANIMAUX
Le rejet de carcasses d'animaux est interdit.

RÉSIDUS DE CARGAISON
Les résidus de cargaison et les agrafes ou additifs de nettoyage présents dans les eaux de lavage des cales peuvent uniquement être déchargés si la mer est suffisamment profonde pour le milieu marin, le port de départ et le port suivant de destination se trouvent tous dans le littoral des eaux arctiques, et aucune installation de réception adéquate n'est disponible dans ces ports. Les mêmes prescriptions s'appliquent pour la zone arctique en vertu de MARPOL.

ESPECES ENVAHISSANTES

ESPECES AQUATIQUES ENVAHISSANTES
Des mesures doivent être prises pour réduire au minimum le risque de transfert d'espèces aquatiques envahissantes par le ballast des eaux de ballast et de l'enrichissement biologique des navires.

REJETS

REJETS
Le rejet de substances liquides nocives ou de mélanges contenant de telles substances est interdit dans les eaux polaires.

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

LE RECUEIL INTERNATIONAL DE RÈGLES APPLICABLES AUX NAVIRES EXPLOITÉS DANS LES EAUX POLAIRES ENTRERA EN VIGUEUR LE 1ER JANVIER 2017.

LE RECUEIL S'APPLIQUE AUX NAVIRES EXPLOITÉS DANS LES EAUX ARCTIQUES ET ANTARCTIQUES, COMPLEMENT AUX PRESCRIPTIONS EXISTANTES DE MARPOL.

LE RECUEIL VISE À ASSURER LA SÉCURITÉ DE L'EXPLOITATION DES

DÉFINITIONS

CATÉGORIES DE NAVIRES
Il existe trois catégories de navires conçus pour être exploités dans les eaux polaires :

- A) dans au moins de la glace moyenne de première année.
- B) dans au moins de la glace mince de première année.

BANQUISE CÔTIÈRE : glace de mer qui se forme et reste fixe le long de la côte, où elle est attachée soit au rivage, soit à un mur de glace, soit à une falaise de glace, entre des hauts fonds ou des icebergs échoués.

PRODUITS CHIMIQUES

Figure 2 : Mesures pour la protection de l'environnement

Source : Organisation Maritime Internationale

2.3. Recommandations et guides

De nombreux guides ont été publiés pour construire des navires polaires, afin qu'ils respectent les règles du Code polaire, du SOLAS et de Marpol. Ces guides sont écrits par des sociétés de classification, comme la société Allemande Germanischer Lloyd ou encore l'Association Internationale des Sociétés de Classification (IACS), et énoncent une liste de recommandations afin d'obtenir un navire suffisamment robuste pour affronter les températures extrêmes. [8]

Cependant, ils ne fournissent que peu d'information concernant l'installation machine, à proprement parlé. Beaucoup d'informations sont données pour les systèmes de propulsion et l'appareil à gouverner. Les forces maximales sur l'hélice ou les Azipods y sont très détaillées, à l'aide de formules et de graphiques sur la répartition des forces sur une pale. Le couple sur l'arbre d'hélice en fonction du nombre de pales y est aussi démontré. L'ensemble est ainsi décrit avec beaucoup de précisions pour éviter une avarie du système à gouverner qui immobiliserait le navire pour une durée indéterminée. En effet, ce genre d'avarie peut avoir de lourdes conséquences sur l'équipage et les personnes présentes à bord si les vivres commençaient à manquer avant l'intervention d'une aide extérieure. [3]

En novembre 2019, L'Astrolabe a été victime d'une avarie de ligne d'arbre qui l'a immobilisé pendant plusieurs mois. Ce contretemps a annulé le ravitaillement de la base de Dumont d'Urville en Terre Adélie et retarder les premières missions scientifiques de l'Institut Français Paul-Emile Victor. Cela a créé un réel problème de logistique pour approvisionner la base scientifique, accessible seulement en été austral, et les coûts de réparations en plus des coûts de non-exploitations du navire étaient très élevés. [26]



Figure 3 L'Astrolabe

Source Mer et Marine

Les autres recommandations des guides restent relativement vastes et permettent aux armateurs de faire le choix des moyens pour lutter contre l'invasion de glace, les basses températures ou encore les problèmes de viscosité de l'huile ou du carburant.

Le guide Allemand recommande aux navires classés de PC-1 à PC-5 d'avoir deux prises d'eau de mer pour refroidir l'ensemble des moteurs et des systèmes auxiliaires. Il dit aussi que chaque prise d'eau de mer doit pouvoir fournir un mètre cube d'eau par 750kW (kilos watts) de puissance totale installée. Une prise eau de mer est essentielle au bon fonctionnement d'un moteur car elle va venir refroidir de l'eau de mer qui circule ensuite dans la machine. Parfois même, l'eau de mer refroidit en direct le moteur et les machines auxiliaires. L'eau de mer refroidit aussi l'huile en sortie du moteur, l'air d'alimentation au préalablement compressé, pour améliorer le rendement d'un moteur. Si la machine n'est pas alimentée en eau de mer, les conséquences peuvent être lourdes pour le moteur et même obliger les mécaniciens à arrêter complètement l'ensemble des systèmes afin d'éviter la surchauffe des moteurs. Cela demande une intervention immédiate de la part de l'équipe machine et retarde l'ensemble du voyage. [3]

Pour les navires classés PC-6 et PC-7, une seule prise d'eau de mer est recommandée. Elle doit être installée au niveau de la ligne médiane du navire. Un système de prévention de la glace dans la prise eau de mer et les vannes en contact avec cette eau est aussi recommandé. Le choix de l'installation de chauffage est laissé libre au propriétaire. Le moyen le plus utilisé pour éviter l'accumulation de glace est une ligne d'eau chaude, provenant de la chaudière après condensation, autour de de la prise d'eau de mer. Un système de résistances peut aussi être utilisé. [10]

Concernant les problèmes de viscosité, il est préconisé d'installer un système de chauffage du combustible et de l'huile de lubrification si besoin. La viscosité est la faculté d'un fluide à résister au mouvement pour un écoulement. Cette installation peut être faite directement dans les réservoirs à l'aide d'un circuit d'eau chaude de la même provenance que pour les prises d'eau de mer. La température d'utilisation de l'huile et du carburant est défini par le vendeur de ces produits. Une viscosité de l'huile trop élevée empêche le bon écoulement dans les tuyaux, la bonne lubrification des installations pouvant aller jusqu'à la détérioration des pièces en mouvement. Pour le carburant, cela entraîne une mauvaise alimentation du moteur qui va ralentir jusqu'à son arrêt complet. Pour ralentir ce processus, des additifs peuvent être ajoutés, augmentant ainsi la viscosité à basse température. L'inconvénient de l'ajout d'additifs est qu'au moment où ils vont brûler, ils vont libérer des molécules toxiques pour l'homme et dangereuses pour l'environnement. En conclusion, la quantité de molécule peut être considérée comme minime mais les effets à long terme sont notables. [26]

Une autre recommandation concerne l'air qui rentre dans la salle des machines. Cette air sert à renouveler l'air présent dans la salle des machines, participe au refroidissement des installations mais alimente surtout les moteurs. La température qui rentre dans les cylindres va indirectement déterminer le rendement du moteur. Une température trop froide va empêcher la bonne combustion du carburant et donc créer des imbrulés. Une température trop élevée va déclencher une combustion trop rapide du carburant, le temps moteur sera incomplet. Pour éviter ce type de problème et avoir un rendement le plus élevé possible, il est demandé d'avoir deux prises d'air situées de chaque côté du navire et un circuit de chauffage de l'air si besoin. Aucune autre précision n'est apportée. [30]

2.4. Utilisation du fioul lourd

La consommation de carburant par la marine marchande représente une énorme part de la consommation mondiale totale. En moyenne, le secteur maritime consomme 20 millions de tonnes de fioul lourd (HFO= Heavy Fuel Oil) et 30 millions de tonnes de gasoil par an.

Cela représente respectivement 45% et 5% de la consommation mondiale annuelle. [11]

Au 1^{er} Janvier 2020, l'OMI a décidé de rajouter une clause au code MARPOL obligeant les navires à utiliser du fioul lourd moins soufré car il est très polluant dans l'air. La norme est aujourd'hui de 0,5% de soufre dans le fioul contre 3,5% avant. Ce nouveau décret offre deux possibilités aux armateurs, soit ils peuvent installer un scrubber, soit ils peuvent utiliser un fioul avec une teneur en soufre de 0,5%. [13]

D'après le Code Polaire, il est interdit d'utiliser du fioul lourd dans la zone Antarctique. Pour ce qui est de la zone Arctique, il est simplement recommandé de ne pas en utiliser, c'est-à-dire que les armateurs sont toujours libres de d'utiliser du fioul lourd car elle ne fait pas partie des zones à émission contrôlée (ECA= Emission Control Area). Dans ces zones, définie sur la figure 4, la teneur en soufre du fioul doit être de 0,1%. Cependant, comme beaucoup de navires parcourent ces zones, les armateurs préfèrent utiliser un fioul à très faible teneur en soufre (VLSFO= Very Low Sulfur Fuel Oil ou ULSFO= Ultra Low Sulfur Fuel Oil). [34]



Figure 4 : Carte représentant les zones à émission contrôlée

Source : Journal de la marine marchande

Cependant, le soufre a des propriétés lubrifiantes, indispensables pour le bon fonctionnement du moteur. Cet avantage est nécessaire au moment de la combustion car il participe à la lubrification du piston, ce qui limite l'usure de la chemise. D'ailleurs, des composés organo-soufrés sont utilisés dans les huiles de lubrification comme additifs sur les navires. Pour obtenir un fioul avec les mêmes propriétés tout en réduisant le taux de soufre dans le fioul, il a donc fallu rajouter des additifs lubrifiants dans le fioul. [20]

Ces additifs posent déjà de grands problèmes de pollution de l'air, notamment dans les zones polaires. En effet, ils sont chargés en composés aromatiques, tels que, le benzène et le toluène qui participent à l'émission de noir de carbone. Celui-ci se forme à partir d'une combustion incomplète et se disperse dans l'atmosphère sous forme de suie. Il est très toxique pour la santé et l'environnement. Les répercussions du dépôt de noir de carbone sur l'Arctique sont déjà visibles et seraient à l'origine d'une augmentation brutale de la température et de la fonte des glaces. En se déposant sur la banquise, le noir de carbone réduit la réflectivité de la glace et participe au changement climatique. Les scientifiques ont déjà informé l'Organisation Maritime Internationale du danger des fiouls à faible teneur en soufre et souhaitent une modification de la loi du 1^{er} Janvier. [11]



Figure 5 : Dépôt de noir de carbone sur la banquise

Source : High North News

3. Les différents types de propulsion

Le choix de la propulsion des navires polaires est très important. Il est dépendant de la classe polaire visée, de l'âge de la glace que l'on veut traverser et donc de la route que va emprunter le navire. Le type de propulsion est aussi intimement lié à la forme de carène, le choix d'une hélice ou d'Azipod et du nombre de propulseur d'étrave. Le choix de la propulsion va aussi dépendre du power-ratio et de la flexibilité de manœuvre que l'on veut apporter à son navire. Le HFO étant proscrit par le Polar Code dans la zone Antarctique par le MARPOL, les types de propulsions vont se concentrer sur la propulsion diesel, le moteur diesel/électrique, le moteur Dual-Fuel et la propulsion nucléaire. [4]

3.1. Propulsion diesel

La propulsion diesel est la plus commune sur le marché. On la retrouve sur plusieurs navires polaires comme le Polarfront. Ce navire, de classe polaire 1C, est équipé d'un moteur Wichmann AXA 5, c'est à dire un moteur diesel 4 Temps. Il entraîne, en direct, une hélice à pas variable en acier inoxydable. L'arbre d'hélice est couplé à un réducteur et à un alternateur pour fournir l'électricité du bord. [15]



Figure 6 : Le Polarfront dans les glaces

Source : Grands Espaces

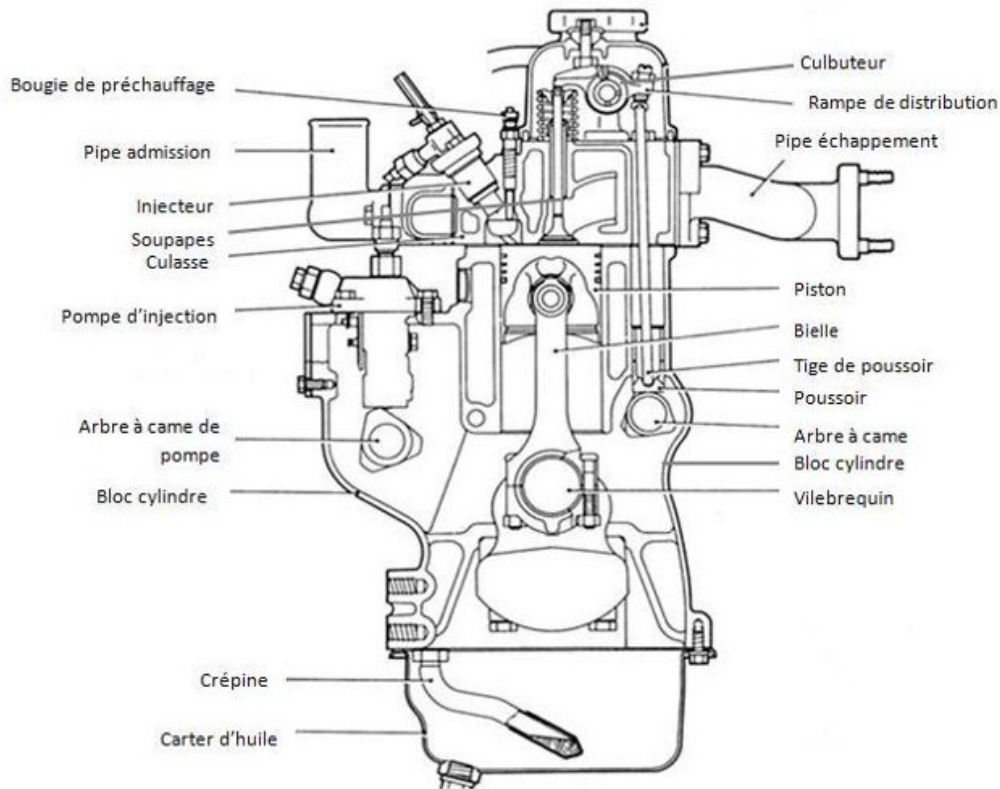


Figure 7 : Représentation schématique d'un moteur diesel

Source : Terre Net

Le moteur diesel est un moteur à combustion interne. L'injection de diesel provoque la mise en rotation de l'arbre manivelle qui entraîne l'arbre d'hélice. Le carburant s'enflamme dans la chambre de combustion par auto-inflammation, lié à la chaleur et au taux d'air dans le cylindre. Dans des conditions idéales de combustion le ratio est de 14g (grammes) d'air pur 1g de diesel mais dans la pratique on utilisera plutôt 30g d'air. Après la combustion, les températures dans le cylindre peuvent atteindre 900°C. [5]

Le moteur diesel est un moteur rapide ou semi rapide à piston fourreau, c'est à dire que la bielle est directement liée à l'arbre manivelle. Les moteurs diesels sont, le plus souvent, installés sur des navires rapides ou des navires qui changent de souvent de régime. C'est le cas des navires polaires qui nécessitent une grande plage de manœuvrabilité pour pouvoir casser la glace à plusieurs endroits consécutivement ou reculer dans leurs propres traces.

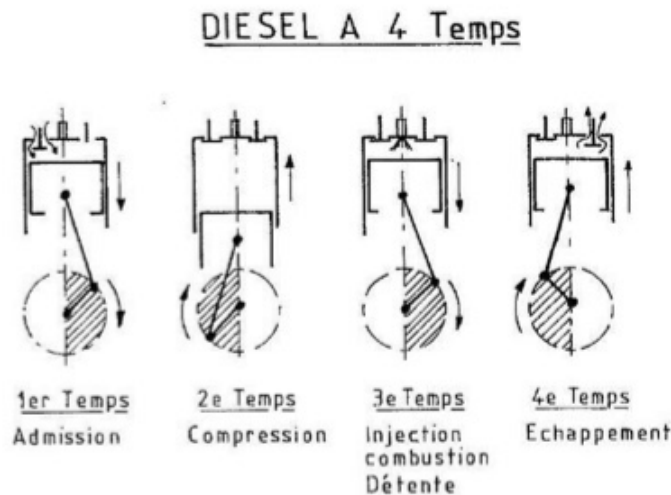


Figure 8 : Cycle d'un moteur diesel 4 temps

Source : Diesel Marin, Jean Briand et Gilles Duchemin

Son fonctionnement est relativement simple. Le moteur 4 Temps se compose d'un 1^{er} temps qui permet d'admettre l'air frais dans le cylindre. Le 2^{ème} temps consiste à la compression de cet air, parfois suralimenté. Au 3^{ème} temps, le combustible est injecté, la combustion a lieu et le cylindre redescend : c'est la détente ou temps moteur. Le 4^{ème} temps est dédié à l'échappement des gaz brûlés et la remontée du piston dans la chemise.

Le moteur 4 Temps est reconnaissable par ses quatre soupapes, les soupapes d'admission sont d'ailleurs plus grandes que les soupapes d'échappement car cela permet d'avoir un meilleur balayage. On le reconnaît aussi car l'arbre à came est deux fois plus grand que l'arbre à manivelle ou vilebrequin, afin qu'il puisse tourner à mi-vitesse. Un cycle comprend deux tours d'arbre manivelle.

La vitesse du moteur diesel peut varier de 100tr/min (tour par minutes) pour des moteurs lents, jusqu'à 1000tr/min pour des moteurs semi rapides et bien au-delà pour des moteurs rapides.

Pour le moteur du Polarfront, la vitesse du moteur est fixe à 375 rpm (rotations par minutes) avec une puissance de 1102kW. [5]

C'est aussi ce type de moteur qui a été choisi pour propulser l'Astrolabe. Ce navire de classe 1A est équipé de 4 Wärtsilä 20 4 Temps qui entraînent, en direct, deux hélices à pas variables en acier inoxydable. La vitesse du moteur est de 1200 rpm avec une puissance de 1600kW par moteur. L'arbre d'hélice aussi est couplé à un réducteur et à un alternateur pour fournir l'électricité du bord. Le moteur est au norme IMO Tier II. [3]

3.2. Propulsion électrique

La propulsion diesel-électrique un type de propulsion qui n'a pas eu un franc succès auprès des constructeurs de navires polaires. Il n'y a que très peu de navires qui sont propulsés par un moteur électrique, notamment le USCGC Healy. Sur le même modèle que le MV Marion Dufresne, USCGC Healy est doté de deux moteurs électriques AC Westinghouse synchrones en courant alternatif de 11,2 MW (méga watts). Ces deux moteurs à vitesses variables et entièrement inverseurs, c'est-à-dire que l'hélice peut changer de sens de rotation en passant par un point mort sans avoir à couper le moteur. Ils sont alimentés par un bus commun via un système de cyclo convertisseur AC/AC (courant alternatif). Ces moteurs sont entraînés par quatre génératrices diesel Sulzer 12Z AU40S qui entraînent deux hélices à pas fixe, l'une en face de l'autre, ainsi que quatre propulseurs d'étrave. Le USCGC Healy est classé comme un brise-glace moyen. [1]



Figure 9 : US Coast Guard Healy

Source : Arctic Today

Le RRS Sir David Attenborough, armé en 2019, est, lui aussi, muni d'une propulsion diesel-électrique. Ce navire de recherche Anglais est doté de ce type de propulsion car une propulsion électrique permet de réduire le bruit sous marin. Il est doté de deux générateurs diesel Bergen de 3600 kW et de deux générateurs diesel principaux Bergen de 5400 kW. Ces générateurs alimentent deux moteurs électriques asynchrones de 2750 kW chacun qui entraînent deux arbres d'hélices à pas variable. En plus de la réduction du bruit, cette configuration permet une liberté de manœuvre, nécessaire dans les glaces.



Figure 10 : RRS Sir David Attenborough

Source : Marine Insight

Le RRS Sir Davis Attenborough est classé Polar Class 4. La manœuvrabilité des navires permet de se frayer un chemin dans les glaces et de reculer si nécessaire dans ses propres traces si la glace devient trop épaisse. [32]

L'installation machine des navires à propulsion électrique se compose d'une partie produisant de l'énergie et une partie propulsion.

La partie énergie est formée de plusieurs génératrices diesel qui fournissent les consommateurs du bord et la partie propulsion en électricité. La partie propulsion se compose d'un convertisseur et d'un ou plusieurs moteurs électriques à vitesses variables ou à vitesses fixes. Sur la figure 11, le moteur alimente deux hélices à pas variable, comme sur le RRS Sir David Attenborough.

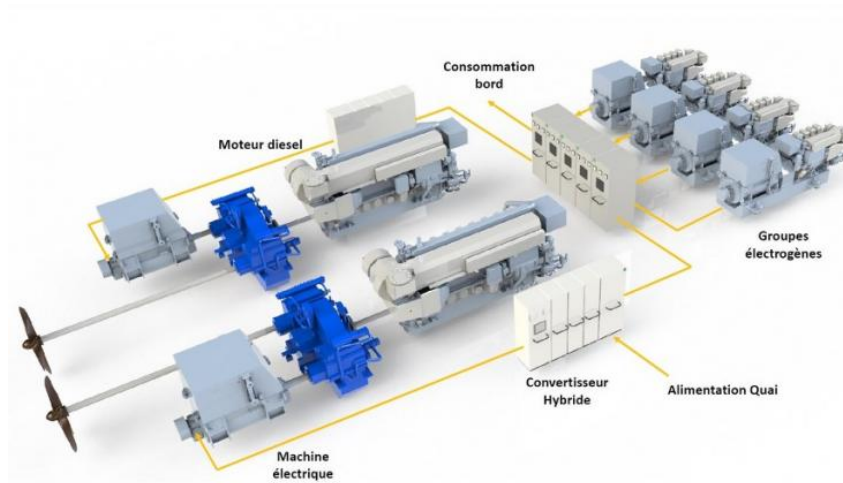


Figure 11 : Représentation des parties énergies et propulsions

Source : Le Marin

Il existe quatre types de convertisseur de puissance.

Le redresseur associé au moteur à courant continu, n'est quasiment plus utilisé aujourd'hui car il limite la puissance transmise à l'arbre, ce que l'on veut éviter dans les glaces. Il est composé de collecteurs et de balais qui s'encrassent facilement et peuvent provoquer des flashes au collecteur.

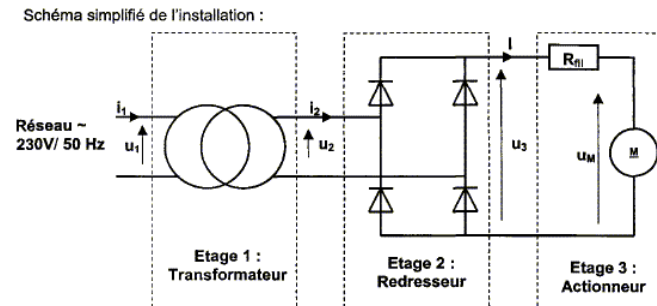


Figure 12 : Redresseur

Source : Chimix

Le deuxième type de convertisseur est le cyclo convertisseur. Il est associé à un moteur synchrone pour pouvoir libérer les navires brise glace du pack, car ils nécessitent une vitesse lente et un couple élevé. [31]

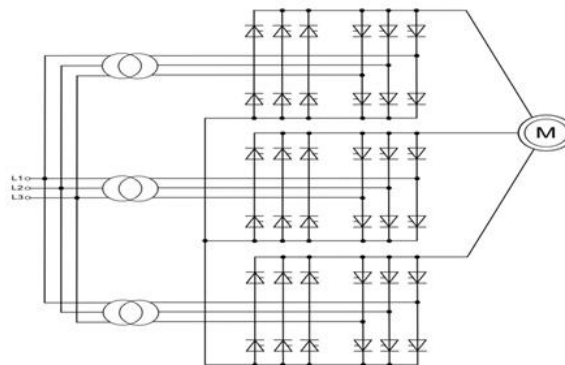


Figure 13 : Cyclo-convertisseur

Source : El-Pro-Cus

On peut aussi trouver le synchro convertisseur, associé à un moteur synchrone. Il est plus fiable et a un meilleur rendement que les autres convertisseurs car il comporte beaucoup moins de thyristors. Il présente d'autres avantages, notamment l'augmentation du facteur de puissance, une diminution du bruit et des vibrations et une pollution des harmoniques plus faible que pour un cyclo convertisseur. [18]

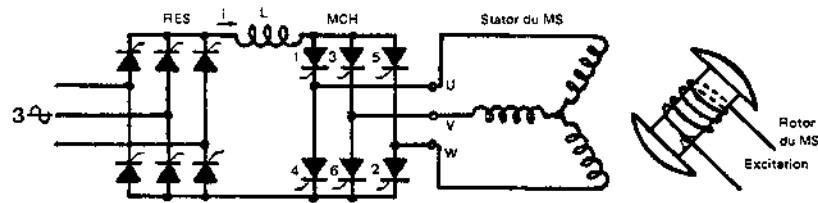


Figure 14 : Synchro-convertisseur

Source : La propulsion électrique des navires

La dernière solution est le convertisseur à commutation forcée. Il est associé avec un moteur asynchrone. Cette option n'est que rarement utilisée car le convertisseur a une puissance maximale limitée, ce qui lui permet d'être seulement couplé avec de nombreux propulseurs de faibles puissances. [18]

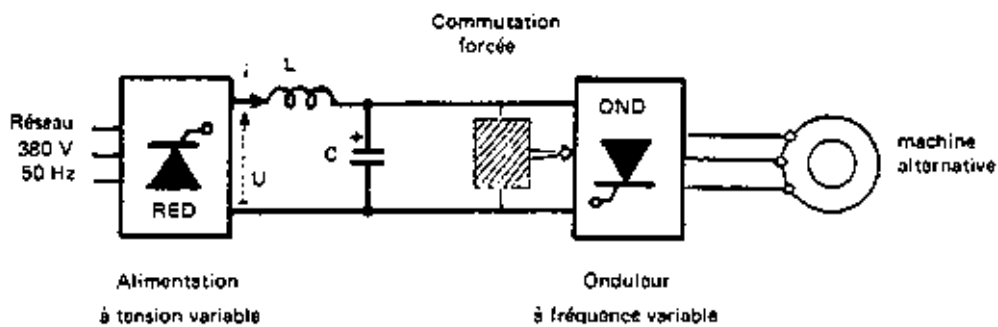


Figure 15 : Convertisseur à commutation forcée

Source : La propulsion électrique des navires

Les grands avantages d'une propulsion diesel-électrique sont :

- l'optimisation de l'espace dans la salle des machines, cela permet un gain de place à bord et une meilleure répartition des puissances si le navire est équipé d'un système de positionnement dynamique
- la réduction du bruit et des vibrations du navire, essentielle sur les navires scientifiques
- la diminution des coûts de maintenance des moteurs diesels, due à leur vitesse fixe
- la flexibilité de manœuvre, nécessaire dans les glaces

3.3. Dual-fuel

Le moteur dual-fuel est un moteur qui nécessite l'utilisation de deux types de carburant : le fuel et le gaz naturel. Cette technologie est utilisée sur le nouveau navire de la compagnie Ponant, le Commandant Charcot. Le navire est équipé du moteur Wärtsilä W31 DF (Dual Fuel) 4 temps ainsi que d'un parc de batteries. Ce moteur sert de générateur électrique pour deux propulseurs azimutaux Azipod VI2300 orientables sur 360°, fournis par ABB, assistés deux propulseurs d'étrave. La cuve de 4500 m³ (mètres cube) de gaz permettra aussi une grande autonomie en carburant, imposé par le Polar Code. Cette installation permet une grande marge de manœuvrabilité et une grande puissance, indispensable pour naviguer dans le pack. Le navire est classé Polar Class 2 et sa livraison est prévue pour mai 2021. [39]

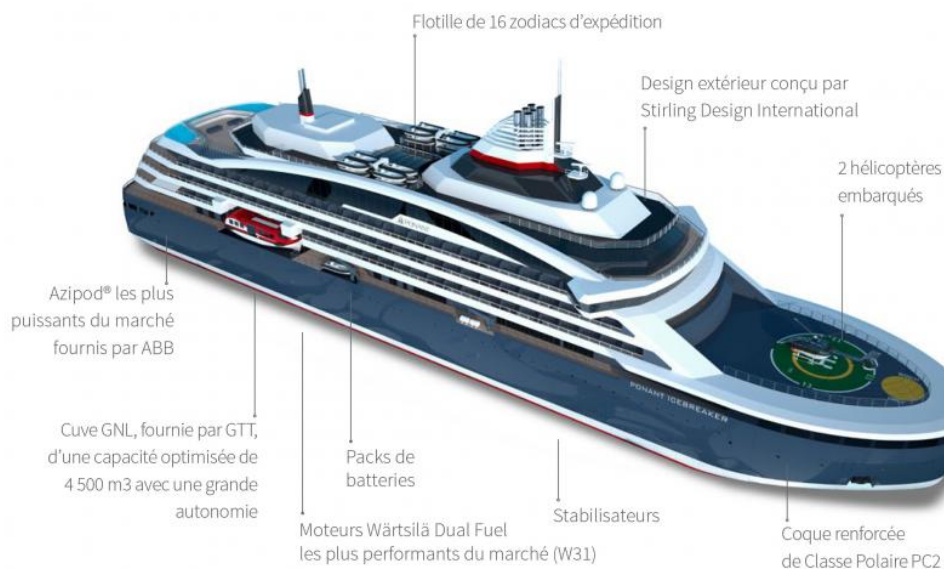


Figure 16 : Description du Commandant Charcot

Source : Ponant

Un moteur dual-fuel peut être un moteur 2 temps ou 4 temps. Mais pour ces deux types de moteur, l'installation de base reste la même : la conduite de gaz est parallèle à la conduite du carburant.

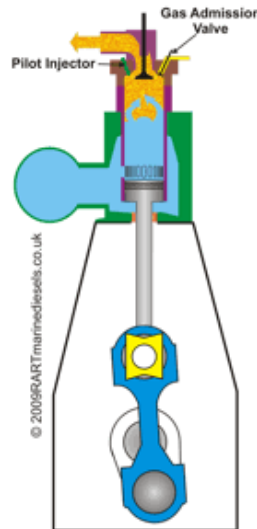


Figure 17 : Représentation d'un moteur 2 Temps Dual-fuel

Source : Marine Diesels

Le moteur 2 Temps est un moteur lent à cross, c'est-à-dire que la bielle n'est pas directement reliée à l'arbre manivelle. Une cross vient faire la liaison entre la bielle et l'arbre manivelle, ce qui évite les coups de piston dans la chemise, dus à la rotation de la bielle autour de l'arbre manivelle. Les moteurs lents sont utilisés pour des grosses unités qui n'ont pas besoin de changer de régime souvent. [28]

Au 1^{er} temps, l'air est admis dans le cylindre, celui-ci remonte pour comprimer le mélange avec le carburant, il atteint le point mort haut. Dans le 2^{ème} temps à lieu la combustion et la détente, le piston revient au point mort bas.

Pour un moteur 2 temps, le gaz est introduit soit via une soupape d'admission, au moment où la soupape d'échappement est fermée, ou par un injecteur. [29]

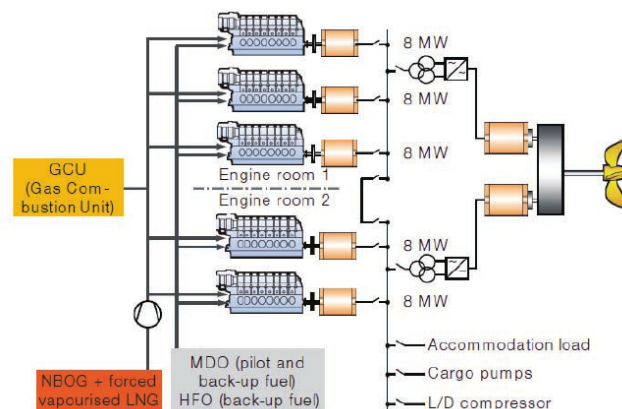


Figure 18 : Schéma de la machine d'un moteur 4 Temps Dual-fuel

Source : Options and Evaluations on propulsion system of LNG carriers

Pour le moteur 4 temps, le système est un peu différent. Le gaz est admis en même temps que l'air dans le cylindre, ce qui implique qu'ils soient mélangés en amont. Un injecteur est inséré dans le conduit d'aspiration d'air d'admission pour procéder au mélange.

Après la compression, l'air et le gaz entrent dans le cylindre et le mélange est allumé par un fioul pilote, provenant d'un injecteur dans le cylindre. [38]

La propulsion au gaz présente de nombreux avantages. Le bas prix du gaz est l'un des premiers facteurs décisifs dans le choix d'un moteur dual-fuel. Deuxièmement, le gaz naturel est un combustible très propre. Le rejet de Sox (Oxyde de soufre) et de particules fines est proche de zéro, le rejet de CO₂ (Dioxyde de carbone) est 25% inférieur à un moteur diesel et pour les NOx (Oxyde d'azote), c'est proche de 85% d'émission en moins. Cependant, le méthane imbrulé est responsable de l'augmentation des gaz à effet de serre. [11]

Les points négatifs de cette installation peuvent être la dangerosité du gaz, qui est volatil et plus léger que l'air et qui reste néanmoins un combustible fossile. Le flashpoint du GNL (gaz naturel liquéfié) est très bas (moins de 60°C), il faut donc avoir un système pour « inerte » le gaz. La température d'inflammation est proche de 600°C et le stockage se fait à -163°C, ce qui rend ce gaz très particulier à utiliser et transporter. Le stockage du gaz se fait dans un réservoir soit sphérique, soit à membrane.

Un autre navire à être propulsé au GNL est le Polaris. C'est d'ailleurs le premier brise-glace d'expédition à pouvoir naviguer avec un moteur dual fuel. Il possède quatre moteurs Wärtsilä, deux 9L34DF et deux 12V34DF. Chez Wärtsilä, le premier chiffre exprime le nombre de cylindre du moteur, L signifie en ligne donc V un moteur en V, le deuxième chiffre est l'alésage du cylindre et DF équivaut à dual fuel. Le Polaris est doté de deux cuves cryogéniques de 400m³ de GNL et sa propulsion est assurée par trois Azipods ABB. Le navire est classé PC-4. [12]

3.4. Propulsion nucléaire



Figure 19 : L'Arktika

Source : Mer et Marine

La propulsion nucléaire est le type de propulsion privilégié pour la construction des brise-glaces russes. L'Arktika, dont la sortie est prévue pour mai 2020, est le navire nucléaire le plus puissant du monde à l'heure actuelle. Il est doté d'une puissance de propulsion de 55MW qui est fourni par un réacteur nucléaire RITM 200. Ce brise-glace possède trois lignes d'arbre qui lui permettent de franchir une glace épaisse de 3 mètres et plus. Il possède donc la plus haute classification possible : Icebreaker 9. [36]

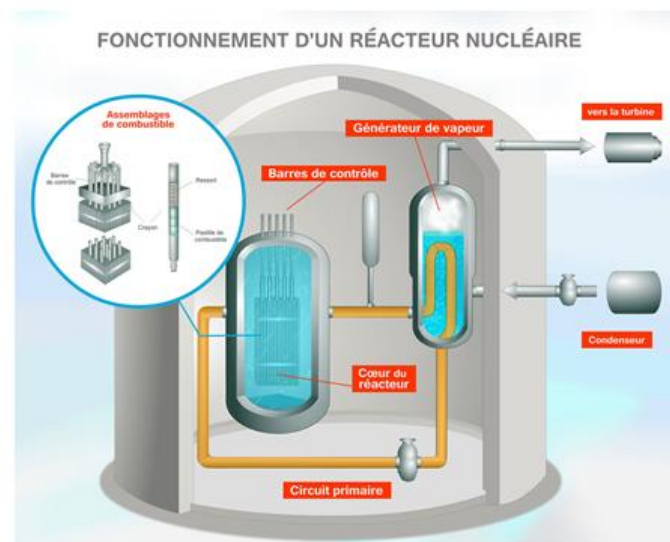


Figure 20 : Fonctionnement d'un réacteur nucléaire

Source : Le CEA

Une salle des machines sur un navire à propulsion nucléaire se compose de deux parties distinctes. La première partie est le circuit primaire, dans laquelle on trouve le réacteur nucléaire. A l'intérieur de celui-ci, on trouve des barres d'uranium. La fission de l'uranium, due à la collision avec des neutrons, va dégager de la chaleur. Cette énergie ainsi produite, va chauffer l'eau du circuit primaire jusqu'à 250°C. Pour des raisons de sécurité évidente, le circuit est confiné.

L'eau ainsi chauffée, va réchauffer l'eau du circuit secondaire qui va se transformer en vapeur surchauffée. Cette vapeur va entrainer deux turbines. La première est dédiée à la production d'électricité grâce à un alternateur attelé en courant alternatif. La deuxième turbine va entrainer l'arbre d'hélice à l'aide d'un réducteur et d'un embrayeur ou d'un alternateur en courant continue qui entrainera la propulsion. [33]

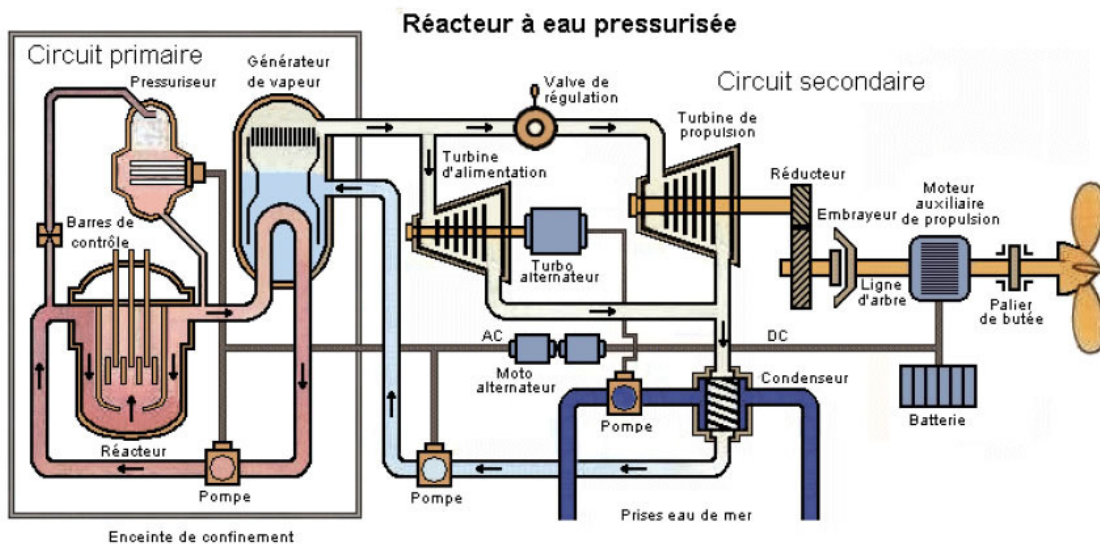


Figure 21 : Réacteur nucléaire à eau pressurisée

Source : Das Boot

4. Les risques techniques liés à la navigation polaire

Les navires polaires sont souvent sujet à de nombreux problèmes liés aux basses températures de l'air et de l'eau. Les prises d'eau de mer sont les premières concernées. Pour limiter l'impact du manque de refroidissement sur les installations dans la machine, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Le Code Polaire stipule que les prises d'eau doivent être pourvu d'un système empêchant la glace de rentrer dans les conduites d'aspiration mais aucun moyen n'est communiqué.

Les températures extrêmes peuvent aussi altérer la qualité des huiles et carburants, limitant l'écoulement des liquides dans les conduites. Quelques guides donnent des indications sur les conséquences d'une mauvaise circulation mais rien sur les moyens pouvant être mis en place.

Les matériaux exposés à l'air et à l'eau sont aussi à surveiller. Le gel peut endommager les tuyaux et les réservoirs de ballasts et le circuit d'incendie.

4.1. Simulation d'un problème de refroidissement dans des conditions extrêmes

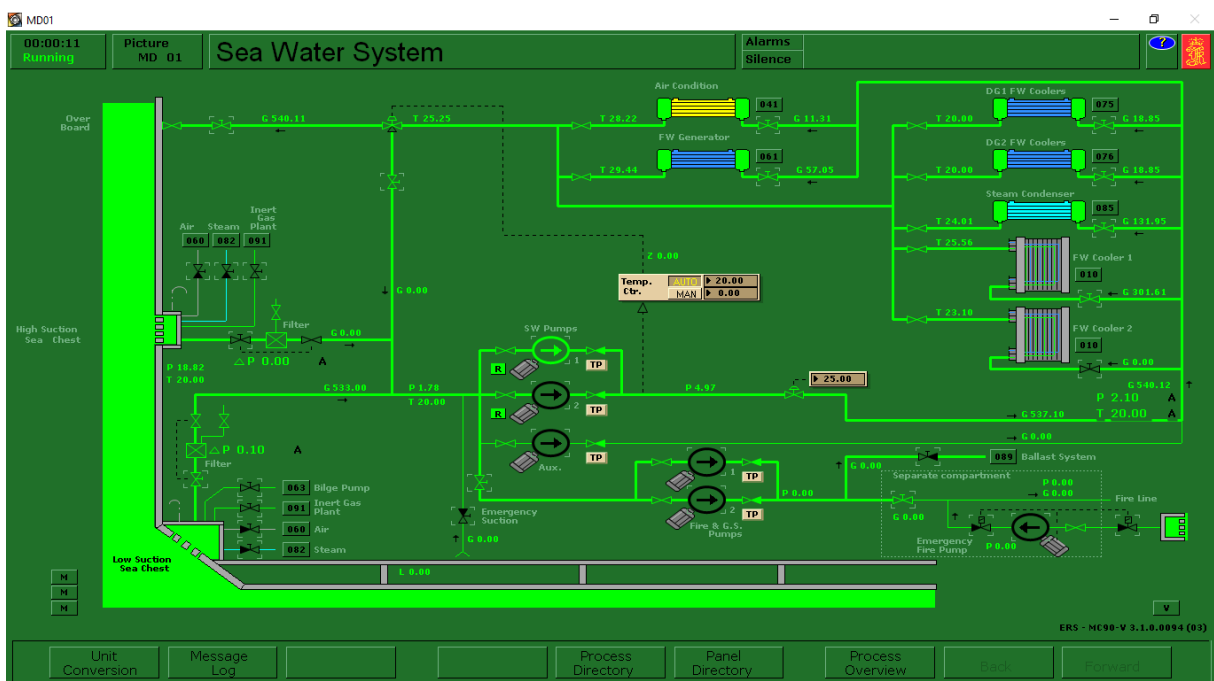


Figure 22 : Système d'aspiration de l'eau de mer

Source : Propre travail, MAN B&W 5L90MC VLCC11-V, Kongsberg

Pour simuler de la glace dans une prise d'eau de mer, j'ai utilisé le simulateur de Kongsberg «MAN B&W 5L90MC VLCCL11-V». Cette glace est également appelé sorbet ou glace « frasil ». Elle est constituée de petits cristaux friables et peut se solidifier très vite au contact de températures basses.

Sur la figure 22, on peut voir que pour simuler cette obstruction, j'ai partiellement fermé la vanne de refoulement des pompes de prise d'eau de mer. J'ai décidé de la fermé jusqu'à 25% pour montrer le début d'une obstruction et comment, très vite, on peut voir les répercutions sur les circuits de refroidissement.

Après avoir obstrué la prise eau de mer, j'ai laissé le simulateur tourner sans intervenir pour observer les effets d'un blocage partiel de la glace. On peut rapidement voir que les températures d'eau de mer après les échangeurs augmentent et après environ 4 minutes, la première alarme sort. Il s'agit de la température de sortie de pompe eau douce de température basse : « LTFW temp. outlet pumps », qui sort à 36°C.

Quelques minutes après, c'est le réservoir d'air d'admission qui sort en température haute, suivis de la différence de pression de l'échangeur eau douce/ air d'admission qui sort en pression haute.

Cette pression signifie que la différence de pression d'entrée et de sortie de l'échangeur a augmenté et donc que la température dans l'échangeur a aussi augmenté, due à la mauvaise circulation d'eau de mer dans l'échangeur eau douce numéro 1.

C'est à ce moment que les alarmes deviennent plus graves et plus complexes. Les températures à l'intérieur des cylindres du moteur principal, ainsi que les températures d'échappement sortent en alarme de températures hautes, respectivement à 250°C et 450°C. Au bout de 19 minutes, on peut observer l'alarme de « Slow down » et le moteur ralenti. Finalement, pour se stabiliser et continuer d'assurer la production d'électricité de 440 Volts, les deux générateurs se connectent sur les bars.

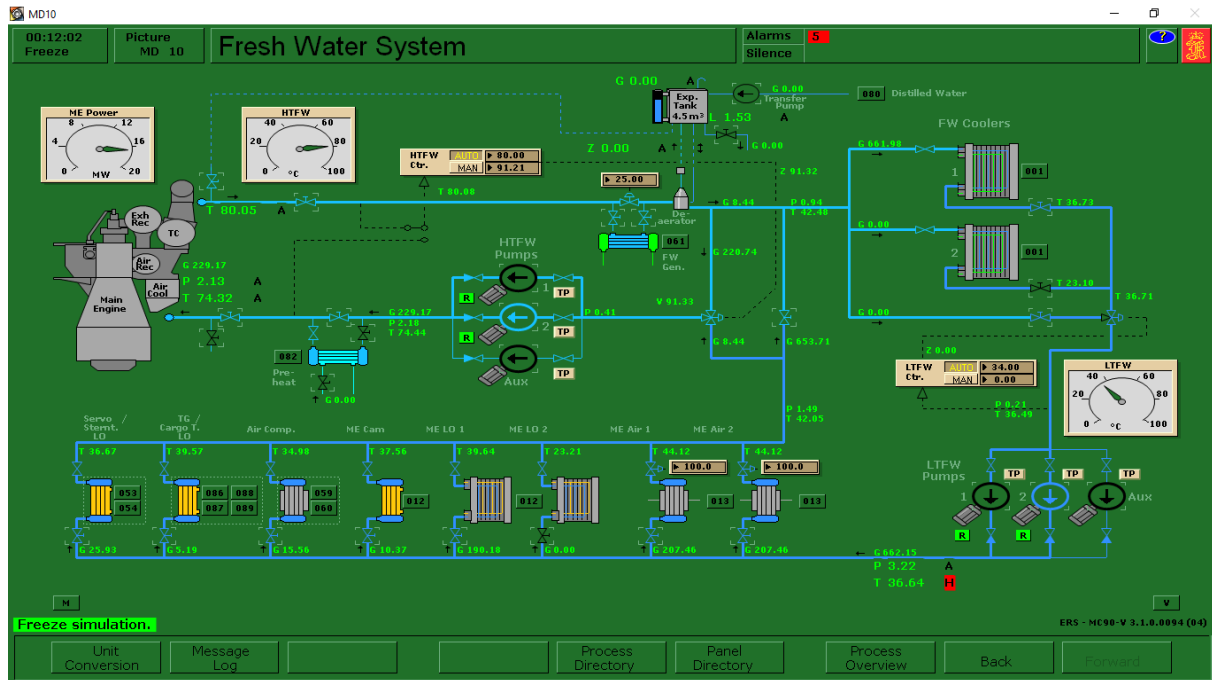


Figure 23 : Système de refroidissement d'eau douce

Source : Propre travail, MAN B&W 5L90MC VLCCL11-V, Kongsberg

Le turbo générateur et le l'arbre se déconnectent des bars, car le moteur ne tourne plus très vite et donc l'économiseur de gaz d'échappement ne produit plus assez de vapeur.

Heureusement, la chaudière principale prend vite le relai pour fournir la vapeur au turbo générateur. Il se reconnecte automatiquement sur les bars avec l'arbre, et le générateur numéro 2 se déconnecte car la production d'électricité est suffisante.

Après plusieurs minutes, plus aucune alarme n'apparaît, le moteur continue de tourner au ralentie sans intervention extérieure et la production d'électricité est suffisante. La situation n'est pas vraiment idéale dans un environnement aussi hostile mais cela permet néanmoins de continuer à manœuvrer dans le pack

4.2. Solution pour les problèmes typiques

Pour limiter apparition de « frasil » dans les prises d'eau de mer, plusieurs mesures sont à envisager. On peut avoir recourt à un système de réchauffage, comme une circulation d'eau chaude prêt des aspirations. On doit absolument tenir la vanne de prise haute d'eau de mer fermée. Cette option pourrait être une solution, mais si le navire avance dans le pack, la glace, qui peut être épaisse de plusieurs mètres, se situe au niveau de la ligne de flottaison. Elle peut donc entrée dans les prises eau de mer, et le problème s'en retrouve déplacé. [27]

On peut aussi garder la vanne de refoulement d'eau de mer partiellement ouverte, afin de permettre une recirculation optimale de l'eau de mer. L'eau de mer déjà utilisée retourne dans le circuit de refroidissement. Elle sert donc plusieurs fois jusqu'à ce que la température soit trop haute pour servir au refroidissement des installations. Une trappe de visite doit aussi être installée pour dégivrer manuellement en cas d'urgence.

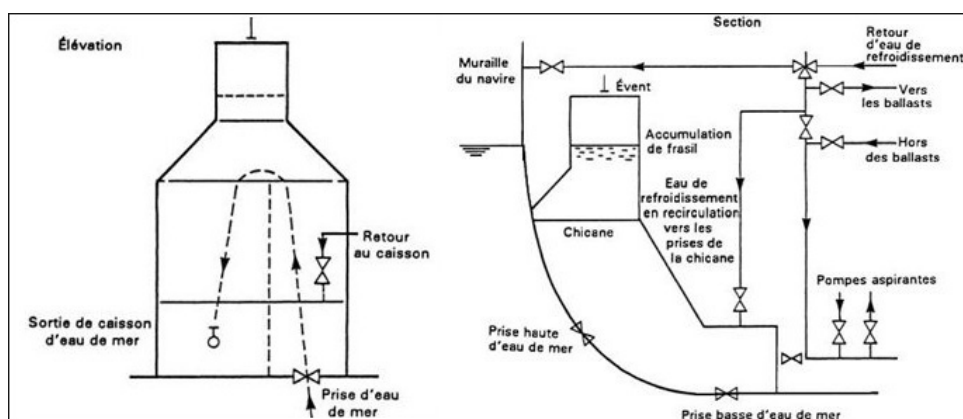


Figure 24: Arrangement des prises eau de mer

Source : Garde cotière Canadienne

Les navires de type ice-class sont obligés d'avoir un circuit de refroidissement de secours. Celui-ci est relié aux ballasts latéraux ou à la pointe avant. L'eau de ballast sert donc à refroidir l'eau douce dans les échangeurs. Cependant, cette solution n'est que de courte durée, à moins d'avoir une grande réserve d'eau dans les ballasts, et qu'elle puisse être utilisée plusieurs fois. L'eau une fois chaude doit, soit retourner à la mer, soit retourner dans les ballasts mais il faut faire attention à la stabilité du navire.

On doit, de toute façon, constamment surveiller les circuit d'eau de mer et surveiller les températures et les pressions dans les circuits afin de repérer une obstruction.



Figure 25 : Accumulation de glace dans le fond de la machine

Source : Transports Canada

D'ailleurs, les ballasts peuvent aussi geler. Les tuyaux, vannes et soupapes sont exposés à l'eau de mer. Le gel peut alors obstruer les conduites et endommager les circuits, empêchant l'assèchement des cales ou encore l'évacuation de l'eau dans les ballasts qui peuvent causer des dommages à la structure du navire. Les coquerons qui sont situés au-dessus de la ligne de flottaison, sont exposés aux basses températures de l'air et peuvent donc facilement geler. L'évacuation d'eau est aussi exposée à l'air, elle est donc potentiellement susceptible de s'obstruer. De plus, l'eau douce contenue dans les ballasts refroidit plus vite que l'eau salée. Il est donc important de purger les canalisations et circuits d'eau si les conditions climatiques se dégradent et si les températures descendent rapidement. Le navire doit aussi être conçu pour que les risques soient réduits. Encore une fois, un système de chauffage et une répartition intelligente des conduites peuvent être une solution pour limiter le gel. [23]

Les circuits incendies peuvent aussi geler, rendant toute lutte contre un feu impossible. Cette situation est très dangereuse et une procédure peut être suivie pour limiter les risques. Dans un premier temps, on peut choisir de purger entièrement le circuit, si possible. On peut aussi remplacer l'eau dans le circuit par un antigel mais il faudra le purger avant d'utiliser le circuit, l'antigel pouvant réagir avec le feu, ce qui n'est pas vraiment pratique. Une autre option est de laisser l'eau s'écouler en permanence dans le circuit, le laissant se déverser dans la mer. Il faudra veiller à ce que l'évacuation, exposée à l'air, ne gèle pas. Si on décide de purger le circuit, il ne faut surtout pas oublier d'assécher le circuit à l'air comprimée, la moindre goutte d'eau pouvant geler et limiter le débit en cas d'urgence.

Les appareils de pont sont aussi vulnérables au froid. Les treuils, grues et guindeaux sont situés à l'air libre et l'huile peut donc geler dans les tuyaux. Il est judicieux de placer les pompes et les réservoirs d'huile hydraulique dans le local barre par exemple afin de les protéger. Il est recommandé de chauffer le local. On peut aussi rajouter une petite quantité d'alcool dans les réservoirs pour enlever l'humidité. [27]

La température dans les locaux de la machine est à surveiller également. L'air qui entre dans la machine à plusieurs fonctions, elle participe au refroidissement des pompes, compresseurs mais elle sert surtout à l'alimentation du moteur. Si l'air est trop froid, il pourrait endommager le moteur et réduire le rendement de celui-ci. Il faut donc veiller à ce que la température soit optimale pour les systèmes tout en conservant une bonne ventilation pour éviter d'avoir des vapeurs de fioul et d'huile stagnantes dans la machine. Si besoin, on peut mettre en marche le chauffage dans le local de propulsion, le local de pompes et séparateurs, le local de l'appareil à gouverner, le local des propulseurs d'étrave, le local de la génératrice de secours, le local des pompes incendie, le local CO₂ et le passage sous les ponts et dans les tunnels.

Le dernier point auquel il faut faire attention, est la température des huiles et du carburant. La baisse de la température de ceux-ci entraîne une augmentation de la viscosité, limitant l'écoulement dans les circuits. Il est donc nécessaire de réchauffer les réservoirs à l'aide de vapeur saturée provenant de la turbine ou de la chaudière. Il faut aussi conserver une quantité suffisante de carburant au cas où le navire resterait coincé dans les glaces. Dix jours supplémentaires sont exigés par l'Organisation Maritime Internationale. [13]

5. Réduction et traitements des gaz d'échappement

Le rejet de SO_x, NO_x et particules fines sont au cœur des discussions de l'OMI pour la prévention de la pollution de l'air. Les zones sensibles sont particulièrement touchées par cette forme de pollution et sont donc à protéger contre les émissions, celle-ci pouvant entraîner des troubles respiratoires chez l'homme, la destruction de la couche d'ozone qui protège la terre des rayons ultraviolets et l'acidité des océans. Les industriels redoublent d'imagination pour lutter contre la pollution atmosphérique et respecter l'Annexe VI de MARPOL concernant la pollution de l'air, ainsi que le Polar Code. Pour cela, plusieurs solutions ont été apportées comme les scrubber pour traité les SO_x, la réduction catalytique réductrice pour traité les NO_x et les filtre pour les particules fines. Ces solutions sont plus ou moins efficaces et parfois controversées.

D'après le graphique 26, on peut croire que la part des polluants (CO, HC, NO_x, SO_x, PM) contenue dans les gaz d'échappement d'un moteur diesel est minime mais ils restent très nocifs pour l'environnement et la santé. [11]

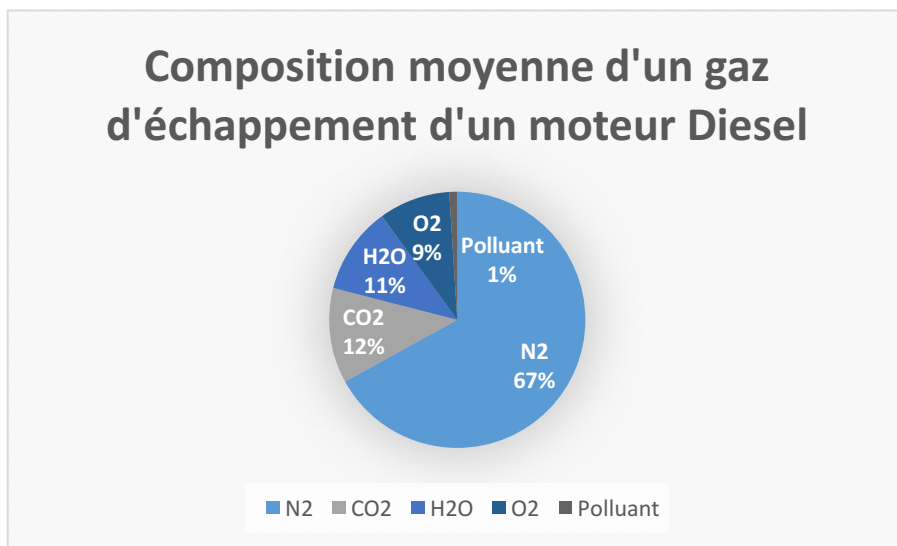


Figure 26 : Composition moyenne d'un gaz d'échappement d'un moteur diesel

Source : Propre travail

5.1. Traitement des SOx

Les SOx sont des composés issus de la combustion du fioul qui en contient. Ils sont faits à partir de soufre et d'oxygène. Ce gaz est très toxique pour l'homme et dangereux pour l'environnement, il est notamment responsable de troubles respiratoires et de l'acidification des océans.

Le traitement des SOx se fait à l'aide d'un scrubber. Il existe trois types de scrubber, un système open-loop ou circuit ouvert avec de l'eau de mer. Un système close-loop ou circuit fermé qui fonctionne avec de l'eau douce mélangé avec de la soude caustique. Et un système hybride qui peut tourner soit à l'eau douce soit à l'eau de mer.

Le premier système, open-loop, n'est pas autorisé dans certains pays et ports du monde comme à Singapour, à Fujairah et en Malaisie.

Dans le système close-loop, contrairement au système open-loop, l'eau douce du scrubber est traitée après son passage dans l'unité de traitement des gaz d'échappement, et peut ainsi être réutilisée. [6]

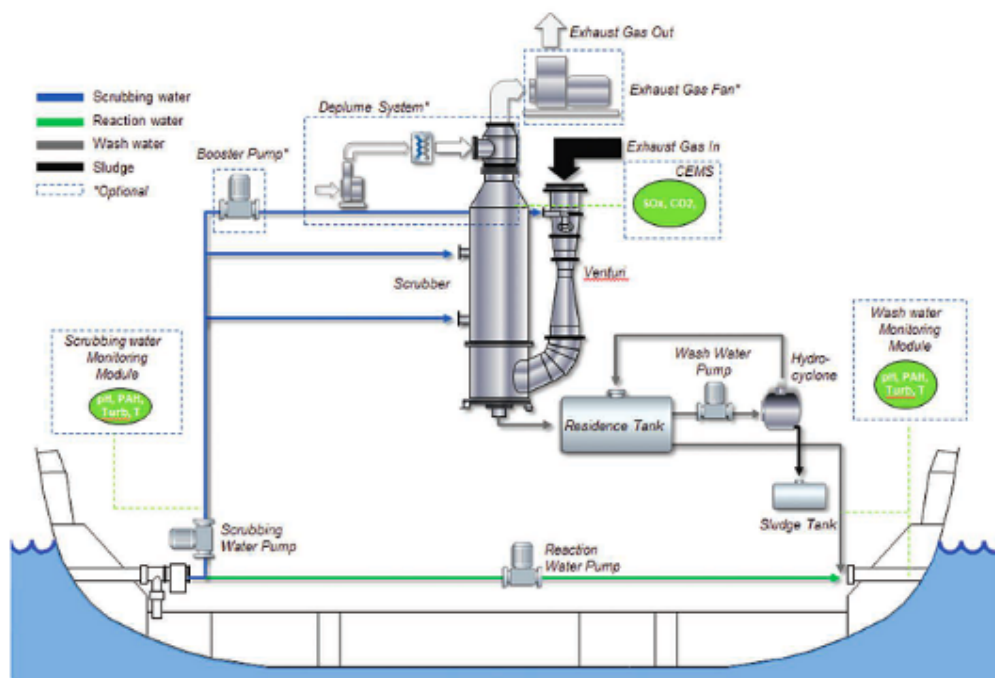
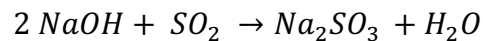


Figure 27 : Scrubber en circuit fermé

Source : The Maritime Executive

Le scrubber est installé au niveau de la cheminée. Les gaz d'échappement passent au travers un conduit dans lequel est pulvérisé de l'eau à haute pression qui refroidit et enlève les contaminants. Le conduit peut être installé verticalement ou horizontalement. Après avoir injecté l'eau douce, on ajoute de l'hydroxyde de Sodium (NaOH) également appelé soude caustique. [7]

La réaction chimique peut s'écrire de cette façon :



Le Na_2SO_3 issue de cette réaction est le sulfite de sodium qui est un sel qui n'est pas toxique pour l'environnement.

Un échangeur de chaleur est utilisé pour abaisser la température de l'eau douce afin que celle-ci ne s'évapore.

Une unité de traitement de l'eau douce permet d'éliminer toute traces d'huile ou de produit de combustion. Chez GEA (Westfalia) l'unité de traitement se compose de deux séparateurs. L'eau est ensuite testée et si sa qualité est bonne, elle est rejetée à la mer. Sinon l'eau est stockée dans un réservoir d'eau sale et les impuretés vont directement dans le sludge tank (cuve à boues). [24]



Figure 28 : Répartition des éléments du scrubber

Source : Alfa Laval

Enfin, une unité permet le réglage du pH. De l'hydroxyde de sodium peut être ajoutée à l'eau douce avant de la rejeter en mer afin de ne pas perturber le pH de l'océan.

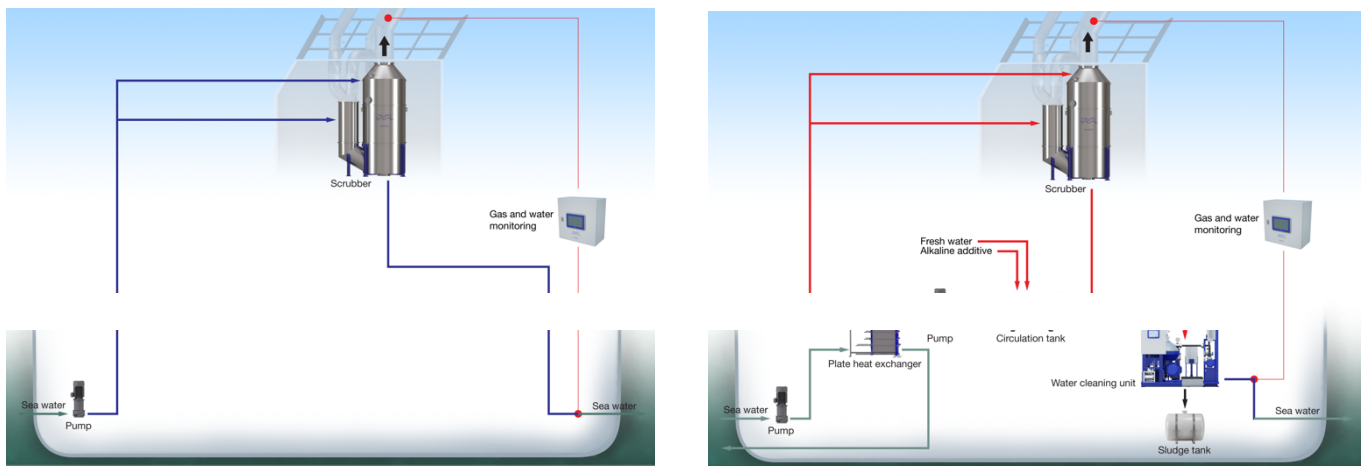


Figure 29 : Scrubber en circuit ouvert et en circuit fermé

Source : Alfa Laval

Avec les scrubbers, on peut espérer réduire le taux de SO_x de 70 à 95% et l'installation à une durée de vie moyenne de 15 ans. Ces chiffres rendent les scrubbers rentables pour les armateurs pour coller aux norme IMO Tier III, puisqu'une telle installation peu couter jusqu'à 3 millions d'euros pour du neuf avec un coût de maintenance annuelle de 30 000€ environs. [7]

Alfa Laval a conçu les trois systèmes de scrubbers. Sur la figure 27 on peut voir qu'il s'agit du système ouvert puisque l'eau sortant du scrubber ne passe pas par une unité de traitement. L'eau de mer ainsi utilisée retourne directement à la mer.

Sur la figure 29, on voit que le scrubber de gauche fonctionne en système close-loop. L'eau de mer vient seulement refroidir l'eau douce avant d'entrer dans le scrubber. Une unité de traitement de l'eau est prévue pour nettoyer le réservoir d'eau douce et rejeter que de l'eau très pure au besoin. Les particules et l'eau sale qui sortent de cette unité sont finalement stockés dans la cuve à boues, qui sera à terme déposée à terre dans une station prévue à cet effet. [2]

L'utilisation des scrubbers sur les navires polaires n'est cependant pas une solution utilisée. Les navires fonctionnent déjà avec des fiouls ne contenant que très peu voire pas du tout de soufre, comme le diesel ou le gaz naturel. Cette installation n'a donc pas d'intérêt environnemental sur ce type d'embarcation

Cependant, l'utilisation des scrubbers est très controversée. En effet, l'utilisation des scrubber open-loop permet de rejeter directement l'eau qui est passé dans le conduit de gaz d'échappement dans la mer. L'alcalinité et le pH de la mer peut donc s'en retrouver bouleversée. Le pH de l'eau usée d'un scrubber peut descendre jusqu'à 4. La présence d'hydrocarbure aromatiques polycycliques, hautement toxique, de nitrates et de sulfates peuvent être présent dans l'eau usée du scrubber. On peut aussi y trouver des métaux lourds et des particules fines qui participent à la pollution des environnements marins.

Finalement, malgré les inquiétudes de l'OMI et des ports du monde, aucune étude fiable n'a démontré le lien entre les scrubbers et l'acidification de océans. [11]

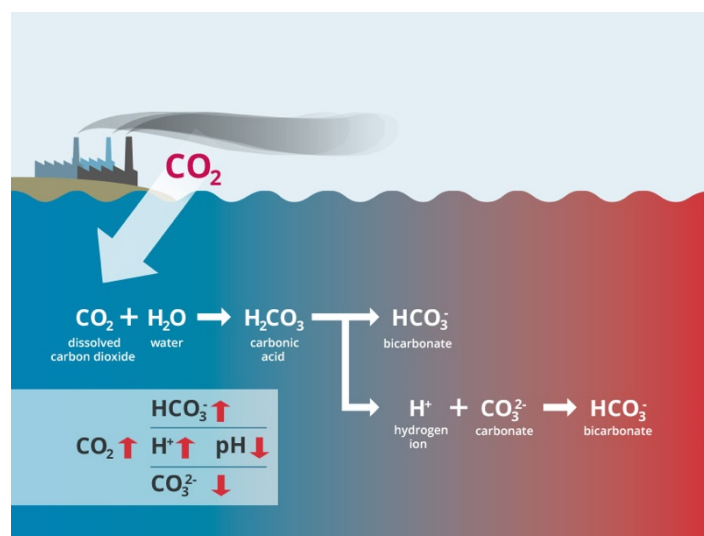


Figure 30 : Acidification des océans dû au CO_2

Source : Bioacid

Par ailleurs, on sait de source sûre que le CO_2 a un impact sur les océans puisqu'il contribue à l'acidification des océans mais rien n'est moins sûr concernant les SO_x .

5.2. Traitement des NOx

Les NOx, appelé oxydes d'azote, sont composés d'oxygène et d'azote, et sont en parti responsables de pluies acides. Le traitement des NOx se fait le plus souvent à l'aide d'une réduction catalytique sélective ou SCR (selective catalytic reduction) en anglais. C'est la solution qu'à choisir l'Administration Maritime Finlandaise au moment de commander le MSV Nordica.

Ce navire, construit en 1994, est propulsé par un moteur ABB Strömberg AC/AC et alimenté par deux moteurs diesels Wärtsilä 12V32D et deux autre 16V32D quatre temps semi-rapide. Il est équipé de deux propulseurs azimutaux (azimuth thrusters) Aquamaster et trois propulseurs d'étrave. Cette technologie lui permet d'être particulièrement manœuvrable dans le pack. Il est classé PC3 depuis 2019. [35]



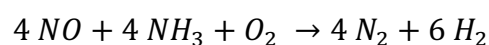
Figure 31 : Le Nordica

Source : Wärtsilä

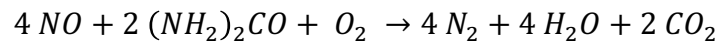
L'armateur a décidé d'installer le réducteur d'oxydes d'azote de Wärtsilä (Nitrogen oxides reducer NOR) en 2011 pour qu'il soit au norme Tier III.

La réduction des NOx est effectuée au moyen de l'injection de l'ammoniaque qui va servir de réducteur. L'oxygène O et l'azote N se transforme en N₂ et H₂O au contact de l'ammoniaque NH₃. [7]

Une des équations chimiques entre les différents composés est :



De l'urée ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$) peut aussi être injecté. L'équation chimique devient alors :



Dans ce cas on remarque la formation de CO_2 supplémentaire indésirable.

Le système se compose d'un catalyseur, ici NOR Reactor, fixé sur la cheminée, qui permet d'accélérer la réaction chimique et la diriger dans le bon sens. Il est fabriqué à partir de matériaux en céramique en forme de nid d'abeille ou en forme de plaque. Le catalyseur nécessite de prendre certaine précaution au niveau de la température de gaz d'échappement. En effet, une température trop haute ($>490^\circ\text{C}$) ne permet à l'ammoniac de brûler dans des conditions optimales et donc la réaction ne se fait pas avec l'oxyde d'azote. A l'inverse, une température trop basse ($<250^\circ\text{C}$) risquerait d'endommager le catalyseur et la réaction serait trop lente. La température idéale dans le catalyseur doit donc être comprise entre 300°C et 450°C . [18]

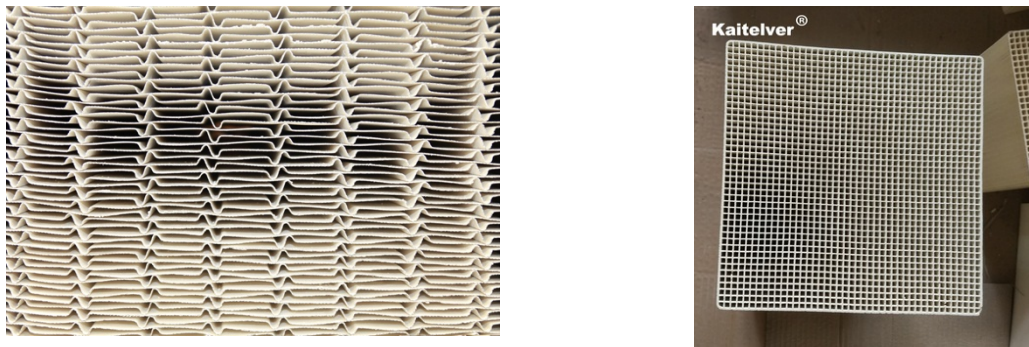


Figure 32 : Catalyseurs en forme de plaque et en nid d'abeille

Source : Johnson Matthey

Avant le catalyseur, l'ammoniaque est injectée dans la cheminée afin de se mélanger aux gaz d'échappement. L'injection d'ammoniaque est effectuée à l'aide d'un compresseur, afin d'effectuer le mélange avec l'air et ainsi obtenir une haute pression. La quantité d'ammoniaque est régulée par une unité de dosage, qui control l'échappement et ainsi ajuster en permanence la qualité du mélange air/réducteur.

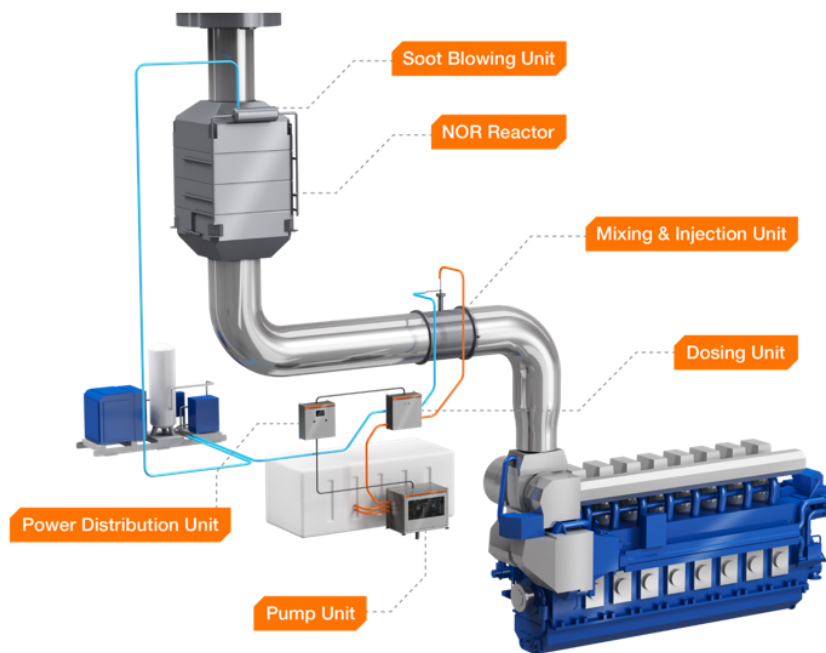


Figure 33 : Réduction Catalytique selective

Source : Wärtsilä

La durée de vie de ce genre d'installation est estimée à 15 ans. La réduction de l'émission des NOx peut aller jusqu'à 90%, ce qui est très important. Cependant, le système comporte quelques désavantages. L'installation d'un SCR est couteuse, pouvant aller jusqu'à 1 million d'euros et presque autant pour la maintenance annuelle. Elle est imposante par sa taille et par son poids, il faut avoir de l'espace dans la salle des machines et faire des calculs de stabilité et de force pour savoir si le navire peut supporter l'installation d'un SCR après sa construction. Le système peut aussi être dangereux en cas de fuite d'ammoniaque car se produit est hautement toxique pour l'homme et peut provoquer des brulures importantes. [25]

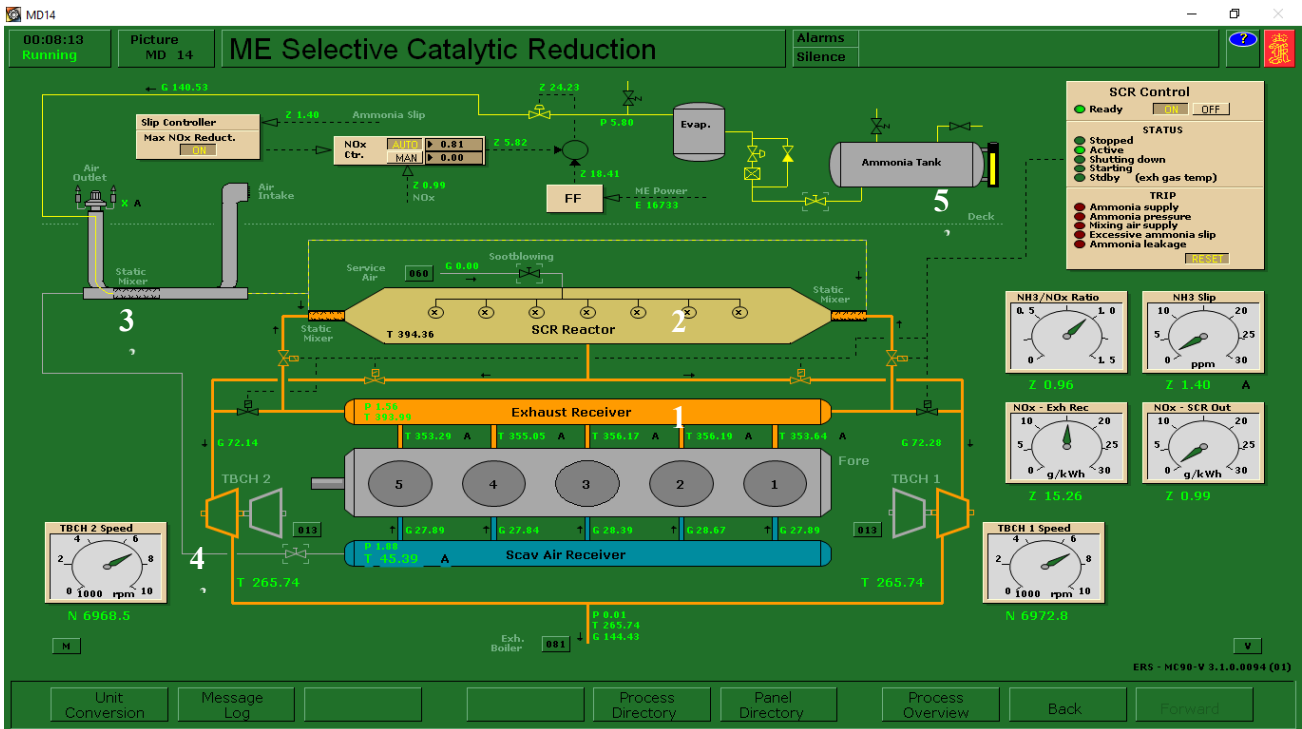


Figure 34 : Système de réduction catalytique sélective

Source : Propre travail, MAN B&W 5L90MC VLCC11-V, Kongsberg

Sur le simulateur de Kongsberg, « MAN B&W 5L90MC VLCC11-V », le circuit de réduction catalytique sélective se compose des mêmes éléments qu'un SCR normal. Les gaz d'échappements vont dans le collecteur « Exhaust Receiver » (1), puis passent par le catalyseur « SCR Reactor » (2). Avant de rentrer dans celui-ci, les gaz passent par un système d'injection d'ammoniaque « static mixer » (3) qui est situé de part et d'autre du catalyseur. Ce système permet de bien mélanger l'ammoniaque aux gaz d'échappement et ainsi d'avoir une réaction chimique optimale. Les gaz continuent leurs courses en traversant les turbocompresseurs « TBCH » (4) et finissent par passer par l'économiseur de gaz d'échappement.

Un système de distribution permet de réguler le dosage de l'ammoniaque, stockée dans un réservoir (5). Il contrôle le taux de NOx après le passage des gaz dans le catalyseur et choisit ensuite quelle quantité de produit injecter.

Un système d'injection d'air dans l'ammoniaque est situé en amont du catalyseur. Celui-ci prend de l'air du collecteur d'admission et lui fait traverser le produit. Cette opération permet d'augmenter le taux d'oxygène dans le système. Ainsi, un maximum de molécules d'oxydes d'azote sont réduites dans la réaction chimique.

5.3. Traitement des particules en suspension

Les particules fines (PM : particulate matter) sont aujourd'hui pointées du doigt par les associations de protection de l'environnement. Ces petites particules, qui vont de 2,5 à 10 microns de diamètre, se composent souvent d'alcane, d'alcènes et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les effets sur la santé et l'environnement sont importants. L'émission de ce genre de particules serait responsable de 200 000 morts rien qu'en Europe. L'inhalation de ces particules peuvent entraîner des problèmes respiratoires graves comme l'asthme, des cancers des poumons et des problèmes cardiovasculaires chez l'homme et l'animal. [22]

En Europe, la Méditerranéenne est la première compagnie à tester ces filtres à particules fines en 2019. La compagnie a opté pour un système de désulfuration à base de bicarbonate de soude pour réduire leur émissions d'oxyde de soufre. Ensuite, les gaz d'échappement passent à travers un filtre à particules afin d'éliminer de ne pas rejeter les molécules dans l'atmosphère. Les résidus captés par le filtre sont ensuite stockés dans un réservoir prévu à cet effet et déchargé à terre. Ils sont intégralement recyclés, ce qui réduit drastiquement leur empreinte environnementale.

Cette installation a été testée pendant six mois à bord du Piana. [21]

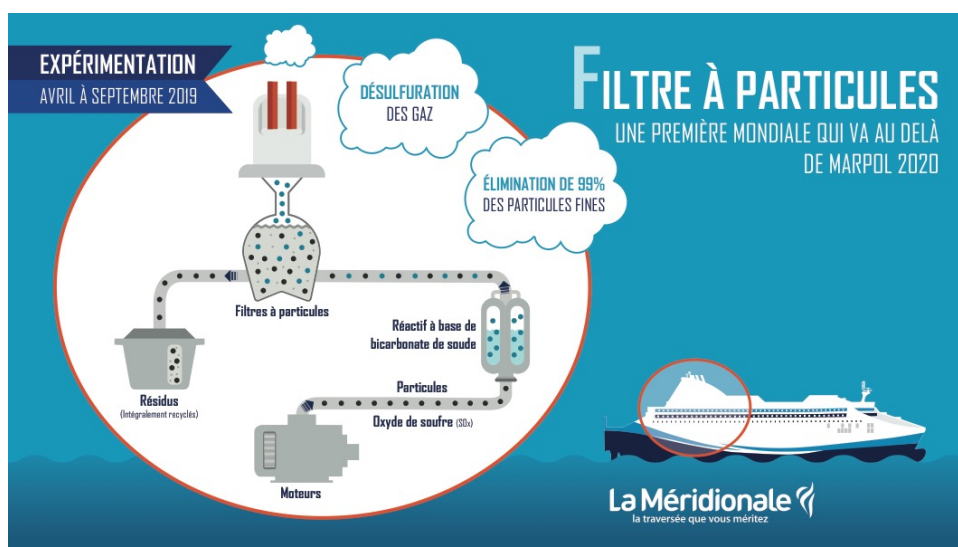


Figure 35 : Filtre à particules

Source : La Méditerranéenne

Le filtre en question est composé de centaines de sacs sur lesquels se dépose le bicarbonate de soude. Les particules et les métaux lourds vont se déposer sur le bicarbonate qui va créer une couche sur les sacs. Une fois les sacs colmatés, un système d'injection d'air va venir casser ce manteau et expulser les particules dans le collecteur.

L'entreprise espère ainsi atteindre ses objectifs en matière de rejet de gaz d'échappement et inciter d'autres compagnies à installer ce système de récupération des particules fines.

Cette solution pourrait être une avancé majeure concernant les rejets de soufre et de particules dans les zones protégées comme les zones Arctique et Antarctique. C'est aussi une bonne alternative à la réduction catalytique sélective. [16]



Figure 36 : Filtre à particules vue de l'extérieur

Source : Petites Affiches

5.4. Réduction des émissions de CO₂

La réduction de l'émission du CO₂ par les navires est plus difficile car il n'existe pas de technologie pour filtrer les gaz d'échappement. Les options sont nombreuses mais pas toujours efficaces ou possibles dans les zones Arctique et Antarctique.

Cependant, l'OMI a mis plusieurs plans et index en place afin de prévenir l'émission de CO₂ dans l'atmosphère. L'Emergency Efficiency Design Index (EEDI) ou Indice de conception d'efficacité d'urgence en français, permet de renseigner l'émission de CO₂ pour un certain type de navire à une certaine vitesse et avec un certain port en lourd. Cet indice a pour objectif de réduire les émissions de CO₂ de 30% pour 2025. [13]

L'autre mesure obligatoire pour tous les navires est le Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). Il établit une liste de mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique des navires en jouant sur l'amélioration de la route, le ballastage, la maintenance des installations machine et l'anti-fouling par exemple. Le SEEMP a pour but d'inciter les compagnies possédant des navires récents ou moins récents à utiliser le Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) ou Indication opérationnelle d'efficacité énergétique. Cet indicateur, basé sur le volontariat, permet aux mécaniciens de contrôler l'efficacité de l'installation machine et la consommation du navire.

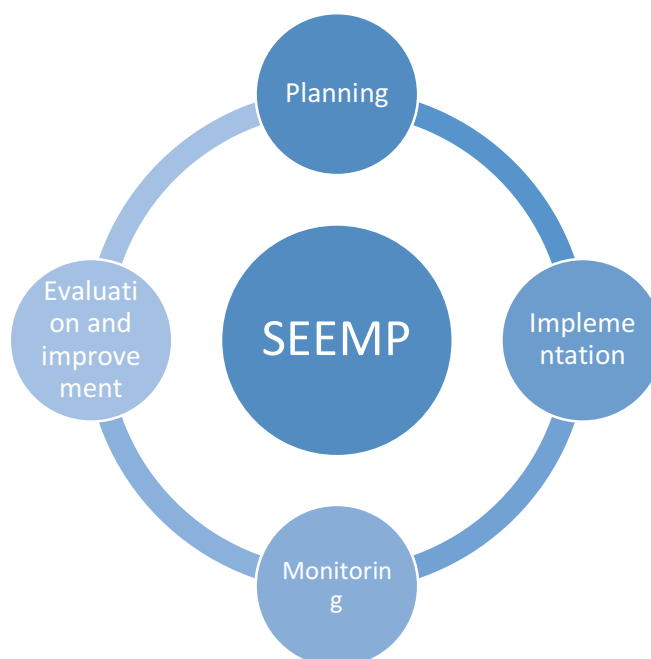


Figure 37 : Organisation de SEEMP

Source : Propre travail

Ces indicateurs sont des données précieuses, d'abord pour l'OMI pour prévoir les mesures anti-pollution de l'air et d'autre part pour les constructeurs et les compagnies pour choisir le système propulsif, la forme de la carène et le planning de maintenance le plus optimal possible.

La première solution à envisager est la réduction de la vitesse des navires. Cette solution a fait ses preuves dans le passé mais il faut forcément adapter la forme de carène à la vitesse du navire afin d'avoir un résultat optimal. Le point de fonctionnement du moteur est aussi à prendre en compte. D'après certaines études, réduire la vitesse des navires de 10% permettrait de réduire de 13% l'émission de gaz à effet de serre. Seulement, cette solution est peu envisageable dans les glaces car les navires ont besoins de puissance et d'une certaine vitesse pour se frayer un chemin dans le pack. Elle peut par contre être possible quand ils naviguent en eaux libres.

Une autre solution est de modifier la forme de la coque. Dans les eaux tempérées, cette proposition est possible car la forme de la coque et du bulbe peuvent être modifiés tout en gardant la rigidité et la résistance du navire. Pour rappel, le bulbe d'étrave est un renflement à l'avant des navires, permettant de réduire la résistance à l'avancement et donc la consommation de carburant. Le bulbe crée une vague artificielle, qui va annuler la vague d'étrave. L'économie de carburant peut aller jusqu'à 20%. Entre 2014 et 2015, nombreuses sont les compagnies à avoir choisit de réduire la taille des bulbes après avoir diminué leur vitesse de 24 nœuds à 16-18 nœuds. [7]

Le problème des bulbes, c'est qu'il n'est pas possible d'en installer sur tous les navires de type glace. L'étrave de ces navires doit absolument est renforcé pour résister à un certain type de glace. Plus la glace sera âgée, plus l'étrave du navire devra être résistante aux chocs et à la pression de la glace.

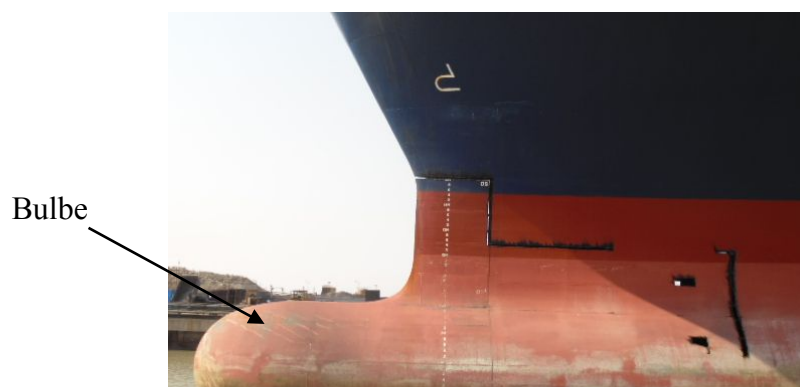


Figure 38 : Bulbe d'un navire

Source : Actu Nautique

L'entretien de la coque et l'ajustement du trim est la possibilité la plus envisageable pour les navires de type glace. Un nettoyage fréquent de la coque permet de limiter la surface de contact entre l'eau et le navire. Un bon anti-fouling, respectueux de l'environnement, permet de limiter la résistance de la coque dans l'eau, réduire la consommation de carburant et donc l'émission de CO₂ dans l'atmosphère.

L'ajustement du trim, permet aussi de réduire la consommation de fioul des navires, à condition de garder la stabilité du navire intact. Sur un navire glace, la stabilité est très importante, une accumulation de neige sur le pont peut vite influencer la stabilité du navire. Cela peut avoir de lourdes conséquences compte tenu de la position géographique des navires car les secours dans les glaces peuvent mettre plusieurs jours à arriver sur la zone du sinistre.

6. Conclusion

Ce mémoire avait pour ambitions de détailler les différents types de propulsion que l'on pouvait trouver sur un navire polaire, de présenter des solutions aux différents problèmes liés au froid et les options pour réduire l'impact sur l'environnement.

Il a fallu dans un premier temps, trouver les réglementations et les guides concernant la navigation polaire pour comprendre comment sont construits les navires et les risques techniques rencontrés dans la salle des machines. Il s'agissait aussi d'interpréter les instructions données par les sociétés de classification pour trouver des solutions pour limiter les risques liés aux températures extrêmes. L'étude de la réglementation m'a aussi permis d'établir les demandes et les recommandations de l'OMI concernant la protection de l'environnement. De plus, nous devons comprendre comment fonctionnent les différentes classes et leurs équivalences pour pouvoir prédire les risques et les problèmes futurs. Le problème du fioul lourd à faible teneur en soufre a aussi dû être abordé car il pose des questions environnementales sérieuses.

Par la comparaison de plusieurs systèmes de propulsion, nous avons pu déterminer les différents types de moteur que l'on peut rencontrer à bord d'un navire polaire. Un lien a aussi pu être établi entre les différents types de machines que nous pouvons installer, en fonction de la mission de navire. Un navire d'assistance a aussi besoin de plus de puissance qu'un navire à passagers par exemple. Le choix de la propulsion est crucial pour choisir les différents axillaires et les mesures à adopter pour respecter le Code Polaire. Le choix du carburant étant un facteur important sur le prix du navire et son coût d'exploitation. Il déterminera aussi la classe du navire.

Pour comprendre les conséquences du manque de refroidissement dans le moteur et les machines auxiliaires, il convenait ensuite de faire une simulation sur ordinateur. Cette simulation nous a permis de comprendre comment réagissait l'installation machine face à un manque de circulation d'eau de mer dans les différents circuits de refroidissement. De plus, grâce à l'étude des guides et recommandations édités par les sociétés de classification, j'ai déterminé les problèmes techniques liés au froid. Il suffisait ensuite de trouver des solutions et d'établir des procédures pour chaque dispositif exposé à l'eau, au gel et à l'air dans les conditions extrêmes d'une navigation hivernale.

Il convenait finalement d'exposer les solutions pour limiter l'impact des navires sur l'environnement. La pollution de l'air étant plus grave au niveau des cercles polaires, il fallait trouver des installations ou des techniques permettant de réduire les émissions de gaz toxiques. Les scrubbers, le système de réduction catalytique sélective et les filtres apportent un début de réponse. Cependant, l'utilisation des scrubbers est controversée car la pollution n'est que déplacée de l'air à l'eau. Les SCR proposent de limiter les émissions de NOx à l'aide de produits chimiques et les filtres à particules ne sont qu'à l'état de test. De plus, chaque installation n'est pas efficace à 100%, et a un véritable impact sur le prix du navire, pas toujours rentable par rapport au prix du carburant.

Pour conclure, cette recherche m'aura permis d'entrevoir les enjeux techniques liés à la navigation polaire et les améliorations que l'on peut encore apporter aux navires pour protéger et réduire notre impact sur l'environnement. Nous pouvons espérer que les entreprises de constructions pourront concevoir de réels systèmes visant à limiter la pollution des navires dans les années à venir.

Bibliographie

- [1] Hervé Baudu, Conseil Québécois d'étude géopolitique, URL: <https://cqegheulaval.com/la-flotte-mondiale-de-navires-brise-glaces/> (visité le 16/04/2020)
- [2] Hervé Baudu, La flotte mondiale des navires brise-glaces en 2018, URL : http://www.afcan.org/dossiers_techniques/flotte_brise_glaces.html
- [3] Jean Briand, Gilles Duchemin, Diesels Marins, Broché, 2012
- [4] British Antarctic Survey, RRS Sir David Attenborough, URL : <https://www.bas.ac.uk/polar-operations/sites-and-facilities/facility/rrs-sir-david-attenborough/> (visité le 30/04/2020)
- [5] Canadian Coast Guard, Ice Navigation in Canadian waters, Icebreaking program, Chapitre 5, 2012
- [6] Caroline Britz, Avarie de l'Astrolabe, Mer et Marine, 19/11/2019 URL : <https://www.meretmarine.com/fr/content/avarie-de-lastrolabe-nouvelle-plongee-devaluation-programmee>
- [7] Le Code Polaire, Organisation Maritime Internationale, URL: <https://omi.delegfrance.org/Le-Code-Polaire> (visité le 12/03/2020)
- [8] Gaël Cogné, Premier essais pour le brise-glace Russe, Arktika, Mer et Marine, 17/12/2019, URL : <https://www.meretmarine.com/fr/content/premiers-essais-pour-le-brise-glace-nucleaire-russe-arktika>
- [9] Adeline Descamps, Scubbers, condamnés à court terme mais plébiscités, Journal de la marine marchande, 06/08/2018, URL : <http://www.journalmarinemarchande.eu/actualite/shipping/scrubbers-condamnes-a-court-terme-mais-plebiscites>
- [10] ECA, Seca, Neca, Journal de la Marine Marchande, 01/10/2018, URL : <http://www.journalmarinemarchande.eu/mensuel/5090/compagnie/eca-seca-neca>
- [11] Finnish Icebreaker breaks northwest passage record, Good new finland, 03/08/2027, URL : <https://www.goodnewsfinland.com/finnish-icebreaker-breaks-northwest-passage-record/>
- [12] Vincent Groizeleau, A bord du patrouilleur polaire L'Astrolabe, Mer et Marine, 06/09/2017, URL : <https://www.meretmarine.com/fr/content/bord-du-patrouilleur-polaire-lastrolabe-0>

- [13] Guide pour la construction des navires polaires, Code Polaire, OMI, 2014
- [14] IMO Mandate for low sulphur fuel results in high black carbon emissions endangering in Arctic, High North News, 23/01/2020, URL : <https://www.highnorthnews.com/en/imo-mandate-low-sulphur-fuel-results-high-black-carbon-emissions-endangering-arctic>
- [15] L'insoutenable pollution de l'air du transport maritime, France Nature Environnement, URL : <https://www.fne.asso.fr/dossiers/linsoutenable-pollution-de-lair-du-transport-maritime-navire-bateaux-croisières>
- [16] Latitude Blanche, Ice Academy, 2019
- [17] Laveur GEA pour le nettoyage des systèmes d'échappement, GEA, URL : <https://www.gea.com/fr/products/emission-control/gas-cleaning/scrubber-exhaust-cleaning.jsp>
- [18] Mohammed-Fahd Legsai, Réduction et traitement des gaz d'échappements à bord des navires de la marine marchande, Mémoire de mécanique navale, Hogere Zeevartschool Antwerpen, 2010-2011
- [19] Laurent Mazodier, La propulsion électrique des navires, pdf, URL : https://www.yachter.fr/pdf/propulsion_elec.pdf
- [20] La Méridionale expérimente un filtre à particule novateur, La Méridionale, 01/04/2019, URL : <https://www.lameridionale.fr/actualites/la-meridionale-experimente-un-filtre-a-particules-novateur-177.html>
- [21] Navigation dans les glaces en eaux Canadiennes, Garde côtière Canadienne, URL : <https://www.ccg-gcc.gc.ca/publications/icebreaking-deglacage/ice-navigation-glaces/page06-fra.html>
- [22] Navigation hivernale sur le fleuve et le golf du Saint-Laurent, Transports Canada, URL : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0962776.pdf> (visité le 09/05/2020)
- [23] Valérie Noriega, Première mondiale, La Méridionale installe in filter à particule sur le Piana, son navire amiral, Le petites affiches, 27/03/2019, URL : <https://www.petitesaffiches.fr/actualites,069/tech,080/premiere-mondiale-la-meridionale,14570.html>
- [24] Polarfront, Latitude Blanche, URL : <https://www.latitudeblanche.com/yacht-polaire/> (visité le 29/03/2020)

- [25] Ponant Icebreaker : le navire bris-glace de Ponant, Webcroisières,
<https://www.webcroisieres.com/blog-voyage/ponant-icebreaker-navire-brise-glace-de-ponant/> (visité le 23/04/2020)
- [26] PureNOx, Alfa Laval, URL : <https://www.alfalaval.nl/fr-be/produits-et-solutions/solutions-de-process/solutions-pour-gaz-dechappement-marine/systeme-de-traitement-des-eaux-de-l-epurateur/purenox/> (visité le 28/03/2020)
- [27] PureSox, Alfa Laval, URL : <https://www.alfalaval.com/microsites/puresox/>
- [28] La radioactivité, URL : https://www.lradioactivite.com/site/pages/Energie_nucleaire.htm (visité le 26/03/2020)
- [29] Adrien Ratel, Le moteur Dual-fuel et son installation, Mémoire de mécanique navale, Hogere Zeevartschool Antwerpen, 2013-2014
- [30] Requirements concerning Polar Class, International Association of Classification Society, I3, 2007
- [31] Rules for Classification and Construction, Guidelines for the construction of polar class ships, Section 3, Allemand Germanischer Lloyd, 2008
- [32] Eric Saudemon, Le Polaris, le premier brise-glace GNL au monde a été livré, Pétrole et gaz, 04/08/2016, URL : <http://www.petrole-et-gaz.fr/le-polaris-le-premier-brise-glace-gnl-au-monde-a-ete-livre-en-finlande-7707/> (visité le 09/04/2020)
- [33] Ship Ice Class, Amarine Blog, URL: <https://amarineblog.com/2017/06/19/ship-ice-class/> (visité le 21/04/2020)
- [34] Traitement des NOx, Wärtsilä, URL : <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment/nox-abatement/wartsila-nox-reducer-nor> (visité le 15/03/2020)
- [35] Transformateur, redresseur, moteur à courant continue, 20/07/2009, URL : <http://www.chimix.com/an9/bac9/sti90.htm>
- [36] Transport Maritime: la nouvelle réglementation en question, connaissance des énergies, URL : <https://www.connaissancedesenergies.org/transport-maritime-la-nouvelle-reglementation-de-2020-en-questions-190404-0> (visité le 01/05/2020)
- [37] Huan Tu, Options and evaluations on propulsion system on LNG carriers, 02/2019
- [38] The two stroke dual fuel engine, Marine Diesels, URL : <http://www.marinediesels.info> (visité le 17/04/2020)
- [39] United States Coast Guard, USCGC Healy, URL : <https://www.pacificarea.uscg.mil/Our-Organization/Cutters/cgcHealy/> (visité le 04/04/2020)