

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

**Analyse du Cycle de Vie des Navires : La
comparaison entre le HFO, MDO et le LNG**

Jean-Baptiste Jourdain

I. Table des matières

I.	Table des matières	ii
II.	Liste des figures.....	iv
III.	Liste des tableaux.....	v
IV.	Liste des abréviations.....	vi
V.	Avant-Propos.....	viii
VI.	Résumé	ix
VII.	Abstract.....	x
1	Introduction	1
2	Aperçu des impacts d'un navire marchand	2
2.1	La phase de construction	2
2.2	Le recyclage.....	3
2.3	Quelques aspects de l'exploitation	5
2.3.1	L'antifouling.....	6
2.3.2	Les rejets d'hydrocarbures	9
2.3.3	Autres déchets.....	12
2.3.4	Nuisances sonores	14
2.4	Emissions dans l'air.....	15
3	Fuel et propulsion dans la marine marchande	18
3.1	Les différents fuels utilisés couramment	18
3.1.1	Le Fuel lourd HFO	18
3.1.1	MGO	20
3.1.1	LNG	21
3.2	Les différentes propulsions	23
3.2.1	Le moteur diesel 2 temps à rotation lente.....	23
3.2.2	Les moteurs Dual-Fuel	24
3.2.3	La turbine à gaz.....	25
3.2.4	Récapitulatif.....	27
4	La méthodologie de LCA	29
4.1	Les origines.....	29
4.2	Un système standardisé.....	33
4.2.1	Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale	33
4.2.2	Programme des Nations unies pour l'environnement	34
4.2.3	International Organisation for Standardisation.....	35
4.3	La Méthodologie.....	37

4.3.1	La définition des objectifs et du champ de l'étude	37
4.3.2	L'inventaire des émissions et des extractions	40
4.3.3	L'analyse de l'impact environnemental	42
4.3.4	L'interprétation	43
5	Comparaison entre LNG, MGO et HFO	46
5.1	Objectif des champs de l'étude	46
5.1.1	Caractéristiques du moteur dual-fuel 12X92DF	47
5.1.2	Conditions de réalisation de l'essai.....	50
5.2	Analyse de l'inventaire	51
5.2.1	Les facteurs d'émissions de la combustion du fuel.....	51
5.3	Evaluation des impacts	55
5.3.1	Gaz à effet de serre	55
5.3.2	NOx	57
5.3.3	SOx.....	59
5.3.4	Particules en suspensions (PM)	61
5.4	L'interprétation.....	61
6	Alternatives et comparaison	64
6.1	La comparaison des résultats obtenus.....	64
6.2	Solutions et technologies alternatives	66
6.2.1	Système de lavage des fumées : Le scrubber.....	66
6.2.2	Le HVO.....	68
6.2.3	L'algocarburant	69
7	Conclusion.....	70
8	Bibliographie	72

II. Liste des figures

Figure 1 Exemple d'un navire avec un antifouling usagé	8
Figure 2 Quantités d'hydrocarbures déchargées accidentellement entre 1970 et 2019	11
Figure 3 Critères de décharges selon l'annexe 5 Marpol	13
Figure 4 Les Zones d'Emission Contrôlées	16
Figure 5 Evolution de la teneur en soufre dans les carburants marins	17
Figure 6 La première turbine à gaz équipant un navire	26
Figure 7 Le cycle de vie	29
Figure 8 Evolution des cours du baril de pétrole entre 1861 et 2011	32
Figure 9 Le principe du LCA selon la SETAC	34
Figure 10 Les 4 grandes étapes du LCA selon ISO	36
Figure 11 Les catégories d'impact et de dommages selon Impact 2002+	43
Figure 12 Consommation spécifique selon la puissance développée du 12X92DF	47
Figure 13 Emissions liées à la combustion de HFO hors CO2	53
Figure 14 Emissions liées à la combustion de MGO hors CO2	53
Figure 15 Emissions liées à la combustion de LNG hors CO2	54
Figure 16 Evolution des émissions des NOx en fonction de la norme TIER	58
Figure 17 Cinq impacts positifs de la teneur limite du fuel des navires	60
Figure 18 Nombre de navires marchands équipés d'un scrubber dans le monde	66
Figure 19 Schéma de principe du scrubber en circuit ouvert	67

III. Liste des tableaux

Tableau 1 Etude simplifiée de l'augmentation des couts de fonctionnement en raison de la baisse de vitesse d'un navire	7
Tableau 2 Seuils limites d'émissions sonores.....	14
Tableau 3 Principaux constituants du LNG.....	22
Tableau 4 Tableau récapitulatif des différents modes de propulsion	27
Tableau 5 Données de la consommation du moteur en mode fuel.....	48
Tableau 6 Données de la consommation du moteur en mode gaz.....	49
Tableau 7 Conditions ISO 3046.....	50
Tableau 8 Facteurs d'émission en g/g fuel lors de la combustion du MGO, HFO et LNG pour l'année 2030	52
Tableau 9 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de HFO	55
Tableau 10 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de MGO	56
Tableau 11 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de LNG	56
Tableau 12 Emissions de NOx	59
Tableau 13 Emissions de particules en suspension	61

IV. Liste des abréviations

- ACV : Analyse du Cycle de Vie
- DFE : Design for Environment
- DO : Diesel Oil
- ECA : Emission Control Area
- Gt : Gross Tonnage
- GTL : Gas to Liquid
- HFO : Heavy Fuel Oil
- HVO : Hydrotreated Vegetable Oil
- IFO : Intermediate Fuel Oil
- ILO : International Labour Organization
- ISO : International Organization for Standardization
- LCA : Life Cycle Assessment
- LCC : Life Cycle Cost
- LNG : Liquefied Natural Gas
- MARPOL : Marine Pollution
- MEPC : Maritime Environment Protective Council
- MGO : Marine Gas Oil
- MRI : Midwest Research Institute
- NOx : Nitrogen Oxydes
- ODME: Oil Discharge Monitoring Equipment
- OMI : Organisation Maritime Internationale

- OPEP : Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
- PCB : Polychlorobiphényles
- PM : Particules en suspensions
- PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement
- REPA : Ressource and Environnemental Profile Analysis
- SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry
- SRP: Ship Recycling Plan
- SOx: Sulfur Oxydes
- TBT : tributylétain
- ULSFO: Ultra Low Sulfur Oil
- VLSFO: Very Low Sulfur Oil

V. Avant-Propos

Ce mémoire de master porte essentiellement sur une comparaison entre trois différents fuels à l'aide d'un LCA.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur, le Docteur Potters pour l'aide et le soutien apporté tout au long de l'année scolaire pour la réalisation de mon travail.

VI. Résumé

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode standardisée par plusieurs institutions en particulier par l'ISO. Il est impossible de réaliser un ACV complet d'un navire marchand. On trouve relativement peu de littérature scientifique qui s'appliquent au ACV dans le secteur maritime. Il est impossible de réaliser l'ACV complet d'un navire, c'est-à-dire de sa construction à son démantèlement. On peut cependant en réaliser sur certaines périodes de sa vie comme sa période d'exploitation.

L'étude se porte essentiellement sur la combustion de trois différents fuels : MGO, HFO et LNG dans un moteur de type dual-fuel. Dans le but de déterminer lequel de ces trois fuels est le plus propre, nous avons réalisé des calculs et comparé ces résultats avec de la littérature scientifique déjà existante.

Le LNG n'est pas une solution miracle. Il reste une énergie d'origine fossile. Il n'émet pas moins de gaz à effet de serre que les MGO ou HFO, principalement en raison du méthane slip. En l'absence de solution viables pour combattre ce phénomène, il ne serait être une solution viable pour l'avenir.

Le LNG ne semble être que transitoire avant le passage vers certains biofuels comme le HVO ou encore les algocarburants.

VII. Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is a method standardized by several institutions, like ISO. It is impossible to perform a full LCA of a merchant ship. There are relatively few scientific literatures that apply to LCA in the maritime sector. It is impossible to perform the full LCA of a vessel, from its construction to its dismantling. However, it can be carried out during certain periods of her life such as her operation time.

The study focuses on the combustion of three different fuels: MGO, HFO and LNG in a dual-fuel engine. To determine which of these three fuels is the cleanest, we have performed calculations and compared these results with existing publications.

LNG is not a perfect solution. There is still fossil fuel. It does not emit less greenhouse gases than MGO or HFO, mainly due to methane slip. Without a viable solution to solve this phenomenon, LNG would not be a viable solution for the future.

The LNG only seems to be transitory before the passage towards certain biofuels like the HVO or algafuel.

1 Introduction

Au cours de la seconde partie du 20ème siècle, l'homme s'est malheureusement rendu compte que l'ensemble de ses activités avaient un impact relativement néfaste sur le climat, la faune, la flore mais également que les ressources naturelles n'étaient pas inépuisables. Aujourd'hui, de nombreuses études sont réalisées avant la production d'un nouveau produit ou lorsqu'il est déjà existant afin de chercher à limiter son impact sur l'environnement. On retrouve parmi toutes ces études l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), Ecobilan ou encore dans la langue Anglaise le *Life Cycle Analysis ou Assessment* (LCA). Ces trois différents noms regroupent un seul et même type d'étude qui est apparu à la fin des années 1960 et enfin prendre le nom tel que nous le connaissons au cours des années 1990. Dans une volonté de simplification, nous utiliserons par la suite uniquement l'acronyme LCA pour *Life Cycle Assessment*, comme nommé par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO). Les aspects économiques ne sont pas abordés en détail, ils sont traités à part dans des études de type *Life Cycle Cost* (LCC).

Après de nombreuses recherches, il s'est avéré que peu d'études de type LCA ont été conduites dans le secteur d'activité de la marine marchande. L'objectif principal est de démontrer certains aspects des impacts environnementaux d'un navire marchand, puis expliquer la méthode LCA, réaliser une étude comparative entre le *Heavy Fuel Oil* (HFO), *Marine Gas Oil* (MGO) et *Liquefied Natural Gas* (LNG) et comparer ces résultats avec d'autres études déjà existantes et proposer éventuellement une ou plusieurs solutions alternatives.

2 Aperçu des impacts d'un navire marchand

2.1 La phase de construction

L'approche globale de la conception et construction d'un navire est essentiellement basée sur certains critères si on y inclut le concept de *Design For Environment* (DFE) ou Ecoconception en Français. Cette liste de critères pour un navire a été donnée par Shama (2005) :

- OMI et autres conventions internationales
- Exigences statutaires
- Exigences de la société de classification
- Exigences de sécurité nationales et internationales
- Exigences de performance
- Utilisation rationnelle des matériaux
- Minimisation de la consommation d'énergie
- Assurer une production plus propre
- Minimisation des impacts environnementaux
- Minimisation des déchets solides
- Minimisation des problèmes de démolition

Les conclusions qui en ressortent concernent différents aspects du cycle de vie. Les chantiers navals peuvent réduire leur consommation d'énergie lors de

la construction ou des réparations et donc réduire les impacts environnementaux et les coûts (the Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka-1000, Bangladesh, Rahman, Karim, & the Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka-1000, Bangladesh, 2015). La déconstruction du navire doit être prise en compte dès sa conception. Pour améliorer ce point, il ne faut pas tenir compte en priorité des aspects économiques mais surtout de l'environnement. La majorité des impacts environnementaux du navire ont lieu pendant la phase d'exploitation. Il est primordial d'augmenter les standards les rendements énergétiques des navires ainsi que leurs impacts sur l'environnement. (Shama, 2005).

2.2 Le recyclage

On retrouve de nombreuses matières polluantes et toxiques lors de la démolition d'un navire. On peut citer par exemple les polychlorobiphényles (PCB) (Still, Arfsten, Jederberg, Kane, & Larcom, 2003), qui sont connus pour être cancérigènes pour l'humain (Faroon & Ruiz, 2016). Ils sont aujourd'hui interdits mais présents encore en grande quantité à bord de certains navires en raison de leurs propriétés diélectriques ou comme fluide caloporteurs. On retrouve aussi du plomb, de l'amiante, des métaux lourds ou encore des hydrocarbures.

Cette activité de démantèlement est bien souvent réalisée sur des plages de pays peu développés, comme à Alang en Inde, en Turquie ou encore le Pakistan.

Les navires sont échoués à même la plage avant d'être déconstruit, sans prendre vraiment en compte l'aspect environnemental. Au cours de l'année 2017, 543 navires ont été vendus à des démolisseurs localisés en Asie du Sud Est. Cela représente 65% de la totalité des navires qui ont été vendus à la démolition pour cette seule année (NGO Shipbreaking Platform, 2017).

Au cours de ces 20 dernières années, de nombreux codes et procédures ont été mis en place dans le but d'en limiter le plus possible les impacts. Dès 2003 le Comité de la protection du milieu marin (MEPC), pose les lignes directrices du futur dans lesquelles tout doit pouvoir être recyclable et que les nouveaux navires doivent disposer d'un « green passeport ». Il s'agit d'un inventaire de tous les matériaux utilisés dans la construction d'un navire qui sont potentiellement dangereux pour la santé humaine ou l'environnement. Cependant, l'aspect sur le réchauffement climatique est très faible, car selon Hua, Cheng, & Hwang (2019), le processus de découpage d'un navire conteneur type post panamax de 330mètres de long, seuls 105 tonnes de dioxyde de carbone sont émises, ce qui représente une infime quantité au cours du cycle de vie d'un navire.

La Convention internationale de Hong Kong pour le recyclage sûr et écologiquement rationnel des navires qui s'est tenue en 2009 a été ratifiée par 15 états (40% de la flotte mondiale) (Le Journal de la Marine Marchande, 2019) est dans le futur ce qui réglementera le processus de déconstruction des navires marchands. Ainsi, chaque navire devra passer par plusieurs étapes :

- Disposer d'un inventaire de toutes les matières dangereuses présentes à bord

- Une visite finale qui permet de vérifier que l'inventaire est correct
- Le chantier chargé de la déconstruction doit recevoir un *Ship Recycling Plan* (SRP) qui traite de comment chaque navire est déconstruit

La déconstruction navale est également une activité à haut risque pour la santé humaine. Outre l'expositions aux substances toxiques, de nombreux accidents mortels ont également lieu chaque année. Depuis 2009, près de 400 personnes ont été tués et 250 blessures graves ont eu lieu (NGO Shipbreaking Platform, 2019).

2.3 Quelques aspects de l'exploitation

La phase d'exploitation commerciale d'un navire marchand correspond à la période où le navire aura un impact maximal sur l'environnement. Ils seront différents suivant le type de navire et l'opération à laquelle il est affecté. On peut se douter qu'un navire marchand de transport, type porte conteneur aura une empreinte sur l'écosystème différente d'un navire de pêche. Néanmoins, nous allons démontrer qu'il existe de nombreux impacts qui sont communs à toute phase d'exploitation comme l'antifouling, l'utilisation de carburants et la production de déchets. Dès 1998, une étude menée sur le transport maritime démontrait que l'exploitation était la période au cours de laquelle un navire marchand avait le plus d'impacts sur l'environnement (Johnsen & Fet, 1998).

2.3.1 L'antifouling

Nous allons commencer par développer l'aspect de la pollution aquatique par les peintures antifouling. Elles sont utilisées sur chaque navire et ont pour objectif principal de limiter la prolifération de la faune et flore sous-marine sous la ligne de flottaison. D'un point de vue strictement environnemental, son principe est tout à fait négatif car le principe même est de libérer au fur et à mesure des toxines à sa surface.

L'objectif principal de limiter la prolifération sur la coque d'un navire est de limiter la perte de vitesse. En absence d'antifouling, on estime qu'un navire qui navigue peut se couvrir en seulement six mois de 150 kilogrammes par mètre carrés de faune et flore marine comme illustré dans la Figure 1. Ceci va avoir pour principale conséquence d'augmenter la friction entre la coque du navire et l'eau, et donc une diminution significative de la vitesse du navire ainsi qu'une hausse de la consommation de carburant. Une coque aux entrées d'eau fines couverte de coquillages peut faire augmenter la puissance requise à l'hélice jusque 86% afin de garder la même vitesse de croisière (Schultz, 2007).

Si la vitesse de croisière diminue nettement, on assiste à une hausse non négligeable des coûts de fonctionnement d'un navire (fuel, équipage, heures machines). Nous allons prendre l'exemple d'un navire de type porte conteneur avec une vitesse de 25 nœuds, avec une coque sans salissures. Entre Anvers et New-York, la distance est de 3388 milles nautiques. Les coûts fixes d'exploitation sont de 9000 dollars et la consommation journalière est de 50 tonnes/ jours de HFO. Ces données proviennent d'un exercice d'exploitation du navire de master. Au 20 février 2020, le prix à Rotterdam d'IFO 180 était de 320

dollars/ tonnes. Nous considérons que la consommation de carburant reste la même bien que notre navire soit sale, seule la vitesse diminue. Sans antifouling, les prix du transport maritime seraient alors le double de ce qu'ils sont à ce jour comme démontré dans tableau 1.

Tableau 1 Etude simplifiée de l'augmentation des coûts de fonctionnement en raison de la baisse de vitesse d'un navire

Source : *Propre Travail*

Vitesse moyenne en Nœud	25	22,5	21,25	20	18,75	17,5	15	12,5
Différence en %	0	10	15	20	25	30	40	50
Durée voyage	5 Jours 16 Heures	6 Jours 7 heures	6 Jours 15 heures	7 Jours 1 heure	7 jours 13 Heures	8 jours 2 heures	9 jours 10 heures	11 jours 7 heures
Coûts Carburant	90 347 USD	100 385 USD	106 290 USD	112 933 USD	120 462 USD	129 067 USD	150 578 USD	180 693 USD
Coûts Fixe	50 820 USD	56 467 USD	59 788 USD	63 525 USD	67 760 USD	72 600 USD	84 700 USD	101 640 USD
Coût Total Voyage	141 167 USD	156 852 USD	166 078 USD	176 458 USD	188 222 USD	201 667 USD	235 278 USD	282 333 USD

Le tributylétain (TBT) était largement utilisé en raison de sa grande efficacité à partir des années 60. L'Organisation Maritime Internationale (OMI) a adopté une convention le 5 octobre 2001 (IMO, 2001) qui en interdit l'usage sur tous les navires à partir de 2008. Selon l'OMI, les principales conséquences étaient qu'il provoquait des malformations sur les huitres ainsi qu'un changement de sexe sur le buccin. D'autres études prouvaient qu'il s'agit du pire polluant qui a pu être déversé dans l'océan (Evans, Leksono, & McKinnell, 1995). Ces effets ont été démontrés dès la fin des années 70 dans le bassin d'Arcachon (Alzieu, 2000). La France a été le premier pays à en interdire l'usage dès 1982 pour les navires de moins de 25 mètres. Environ 10 ans, après leur interdiction totale, on en retrouvait encore des traces dans sédiments extraits lors des campagnes de dragage portuaires. Les TBT se dégradent très lentement dès qu'ils sont enfouis dans la vase. Près de 30 ans après son interdiction pour les petits navires, 89%

des ports de plaisance français ayant récemment subi une campagne de dragage contenaient encore des traces significatives de TBT (TMO REGIONS, 2015).



Figure 1 Exemple d'un navire avec un antifouling usagé

Source : Propre travail (2020)

Aujourd'hui, les antifouling qui sont principalement utilisés à bord des navires marchands sont de type auto-polissant. Leur durée de vie est d'environ trois à cinq ans. Leurs principaux constituants sont les acrylates de cuivre, zinc et de silyle. Ces constituants agissent comme biocides (Arai, Harino, Ohji, & Langston, 2009). Les acrylates sont notamment connus pour leur toxicité sur les poissons et l'environnement aquatique (Freidig, Verhaar, & Hermens, 1999). Le principe d'un antifouling auto-polissant est que la friction de l'eau sur ce dernier, va créer

une perte de matière en surface pour toujours avoir une couche de biocide active et donc limiter la prolifération d'organismes vivants.

Dans le cadre de l'application mondiale et uniforme du système harmonisé de visites et de délivrance des certificats (HSSC), chaque navire reçoit un certificat de navigabilité valable et renouvelable chaque cinq ans après un cycle complet d'inspection. Ce cycle de cinq années comprend, deux mises à sec du navire, au maximum espacé de 36 mois. Il est néanmoins parfois possible, suivant l'âge du navire et son usage de n'en réaliser qu'une seule si on le fait inspecter par une équipe de plongeur spécialisée. Au cours d'une des mises à sec, généralement lors de la cinquième année, l'armateur en profite pour remplacer la peinture antifouling, nécessaire à la rentabilité commerciale du navire.

2.3.2 Les rejets d'hydrocarbures

D'après l'annexe 1 de Marpol, il est tout à fait possible pour un navire de rejeter des hydrocarbures dans l'eau de mer sous certaines conditions. Néanmoins, on fait la distinction entre la partie cargaison et la partie machine.

N'importe quel navire marchand de plus que 400 Gt) peut décharger des mélanges d'eau et d'huile provenant de la salle des machines dans les conditions suivantes :

En dehors de la zone spéciale Antarctique selon l'annexe 1 :

- Les eaux de cale ne proviennent pas des bouchains de chambres des pompes à cargaison

- Les eaux de cale ne st pas mélangées avec des résidus de la cargaison d'hydrocarbures
- Le navire fait route
- La teneur en hydrocarbures de l'effluent non dilué ne dépasse pas 15 ppm
- Le navire utilise un matériel de filtrage des hydrocarbures conforme aux dispositions
- Le matériel de filtrage est muni d'un dispositif d'arrêt permettant de garantir que le rejet est automatiquement interrompu lorsque la teneur en hydrocarbures de l'effluent dépasse 15 ppm.

Les pétroliers supérieurs à 150 Gt peuvent décharger quant à eux des résidus de cargaison dans l'eau sous certaines conditions :

- Le navire fait route
- Le navire se trouve à plus que 50 milles nautiques de la côte et en dehors d'une zone spéciale
- La quantité déchargée en instantanée est de maximum 30L par milles nautiques
- La quantité totale déchargée ne doit pas être plus que 1/30000 de la cargaison
- Le navire doit être équipée d'une ou deux citerne slop et d'un Oil Discharge Monitoring Equipment (ODME).

Il convient également d'ajouter les marées noires liées aux incidents d'exploitation des pétroliers. Certaines restent encore à ce jour tristement célèbre comme le Torrey Canyon en 1967 ; l'Amoco Cadiz en 1978, L'Erika en 1999 ou encore le Prestige en 2003. Néanmoins, il convient de préciser que depuis les années 70, les quantités déversées accidentellement diminuent chaque année.

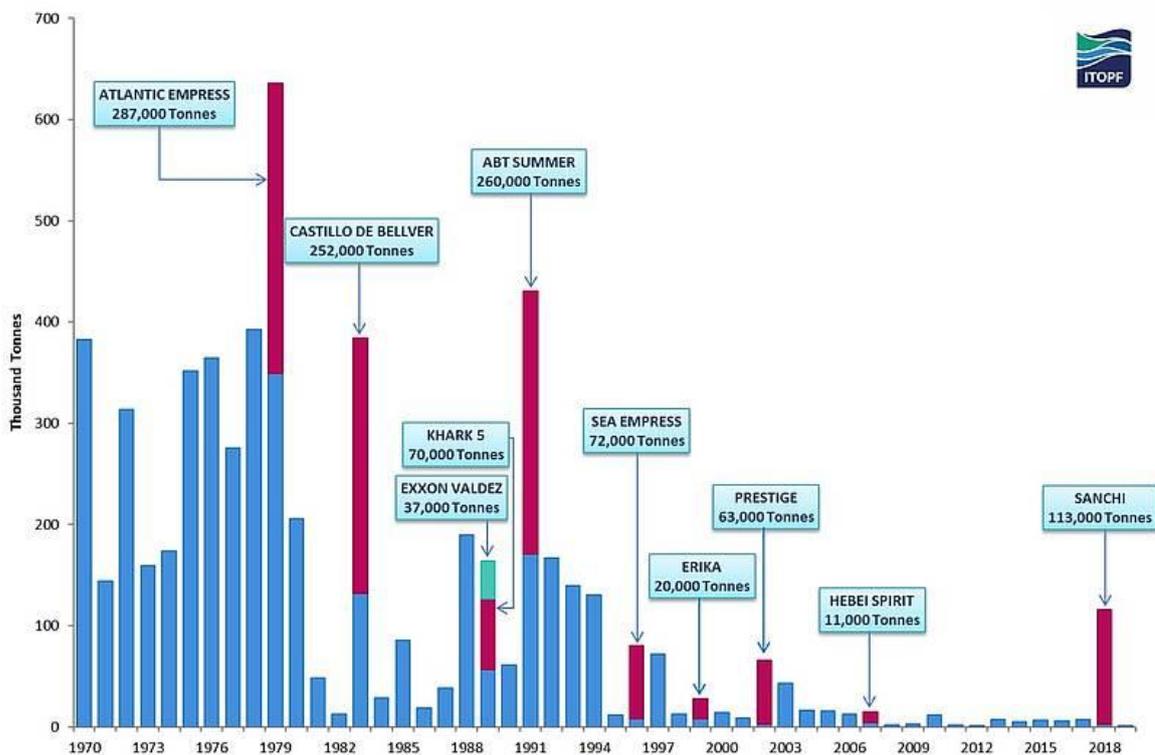


Figure 2 Quantités d'hydrocarbures déchargées accidentellement entre 1970 et 2019

Source : (ITOPF, 2019)

A la Suite du naufrage de l'Erika en décembre 1999 au large de la Bretagne, de nombreuses études ont été conduites sur les différents impacts engendrés. Les végétaux ont semblé relativement épargné dans leur développement, sauf s'ils ont été complètement recouverts de fioul. (Laubier, 2004). Cependant, les oiseaux restent malheureusement les plus touchés. Ainsi, à la suite de l'accident

de l'Exxon Valdez en 1989, Piatt, Lensink, Butler, & Nysewander (1990) estimaient que entre 100 000 et 300 000 oiseaux marins ont été tués. Heureusement, dans la plupart des cas, toutes les traces et dégâts de marées noires disparaissent entre 2 et 10 ans après la pollution (Kingston, 2002).

2.3.3 Autres déchets

Sur chaque navire, on assiste à une production de déchets quotidiennes. Si certains nous viennent à l'esprit immédiatement comme les résidus alimentaires, emballages en carton ou en verre ou encore le plastique, d'autres sont aussi produits sur certains navires. Par exemple, des produits de nettoyage ou encore des résidus de la cargaison précédentes sont souvent présents à bord des navires vraquiers.

Il y'a encore quelques dizaines d'années, tout était jeté par-dessus bord. A ce jour, cette période est heureusement révolue à la suite de l'entrée en vigueur de l'annexe 5 Marpol en décembre 1988. Chaque navire doit disposer d'un plan de gestion de déchets et d'un registre depuis la dernière révision de 2012. Seules quelques exceptions subsistent comme dans la Figure 3. Certaines zones spéciales sont incluses dans cette annexe :

- Zone de la mer Méditerranée
- Zone de la mer Baltique
- Zone de la mer Noire
- Zone de la mer Rouge

- Zone des Golfes
- Zone de la mer du Nord
- Zone de l'Antarctique (au sud de la latitude de 60° S)
- Région des Caraïbes, y compris le golfe du Mexique et la mer des Caraïbes

Simplified overview of the discharge provisions of the revised MARPOL Annex V which entered into force on 1 January 2013

DISCLAIMER: Additional requirements may apply.

This simplified overview is for information or reference purposes only and is not meant as a substitute for the comprehensive provisions in the revised MARPOL Annex V (resolution MEPC.201(62)) or the 2012 Guidelines for the Implementation of MARPOL Annex V (resolution MEPC.219(63)).

Type of garbage	Ships outside special areas	Ships within special areas	Offshore platforms and all ships within 500 m of such platforms
Food waste comminuted or ground	Discharge permitted ≥3 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge permitted ≥12 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge permitted ≥12 nm from the nearest land
Food waste not comminuted or ground	Discharge permitted ≥12 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge prohibited	Discharge prohibited
Cargo residues ¹ not contained in wash water	Discharge permitted ≥12 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge prohibited	Discharge prohibited
Cargo residues ¹ contained in wash water		Discharge only permitted in specific circumstances ² and ≥12 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge prohibited
Cleaning agents and additives ¹ contained in cargo hold wash water	Discharge permitted	Discharge only permitted in specific circumstances ² and ≥12 nm from the nearest land and <i>en route</i>	Discharge prohibited
Cleaning agents and additives ¹ contained in deck and external surfaces wash water		Discharge permitted	Discharge prohibited
Carcasses of animals carried on board as cargo and which died during the voyage	Discharge permitted as far from the nearest land as possible and <i>en route</i>	Discharge prohibited	Discharge prohibited
All other garbage including plastics, domestic wastes, cooking oil, incinerator ashes, operational wastes and fishing gear	Discharge prohibited	Discharge prohibited	Discharge prohibited
Mixed garbage	When garbage is mixed with or contaminated by other substances prohibited from discharge or having different discharge requirements, the more stringent requirements shall apply		

¹ These substances must not be harmful to the marine environment.

² According to regulation 6.1.2 of MARPOL Annex V, the discharge shall only be allowed if: (a) both the port of departure and the next port of destination are within the special area and the ship will not transit outside the special area between these ports (regulation 6.1.2.2); and (b) if no adequate reception facilities are available at those ports (regulation 6.1.2.3).

Figure 3 Critères de décharges selon l'annexe 5 Marpol

Source : (SAFETY4SEA, 2012)

2.3.4 Nuisances sonores

Un navire marchand génère aussi des nuisances sonores pas différents endroits du navire : la salle des machines avec la propulsion, les propulseurs d'étrave, la rotation de l'hélice, le phénomène de cavitation de l'hélice ou encore la résistance de l'eau sur la coque. Afin de protéger la santé des marins, les émissions sonores sont limitées par la Convention du travail maritime (ILO, 2006). Néanmoins, certains endroits comme la salle des machines restent bien au-delà des seuils de confort pour la santé humaine. Au-delà de 85 décibels, le personnel doit porter des protections auditives dans le but de limiter la détérioration sur le long terme des capacités auditives.

Tableau 2 Seuils limites d'émissions sonores

Source : Adapté de (ILO, 2006)

Lieu	Seuil limite d'émissions sonores en [dB(A)]
Salle des machines	110
Salle de contrôle des machines	75
Atelier et autres espaces	85
Cabines et Hôpital	60
Mess, lieux de vie et bureaux	65
Espaces extérieurs de récréations et cambuse	75

Passerelle, Radar	65
Ailerons de passerelle	70
Cabine radio	60
Autres	90

Des impacts significatifs sur la faune marine sont également relevés, notamment pas les phénomènes de cavitation de l'hélice. Selon Ross (1987), des signaux sonores d'une fréquence entre 100 et 150Hz voir jusque 10 000 Hz parfois sont produits. Les mammifères marins sont les principaux animaux concernés par les nuisances sonores sous-marines liées aux navires (Badino, Borelli, Gaggero, Rizzuto, & Schenone, 2012).

2.4 Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air d'un navire sont régies par l'annexe 6 Marpol. Elle a été adoptée dès 1997 avant d'entrer en vigueur le 19 mai 2005. Elle a depuis été revue à plusieurs reprises. L'Annexe VI permet de limiter seulement l'émission des Oxydes d'Azote (NOx), les oxydes de soufre (SOx) ainsi que les particules fines qui sont une partie des résidus émis lors de la combustion.

Certaines parties du globe sont des considérés comme des zones spéciales au regard de l'Annexe VI. Ainsi en 2015, les Zones d'Émissions Contrôlées (ECA) étaient seulement au nombre de 3 : La Mer du Nord/Manche/Mer Baltique, les côtes d'Amérique du Nord ainsi que les Îles d'Hawaï et depuis, la partie

Américaine des Caraïbes depuis 2016. Début 2019, la France a effectué une demande afin que la Mer Méditerranée soit classée comme ECA. (« La France poursuit son action en faveur d'une zone ECA en Méditerranée », 2019).



Figure 4 Les Zones d'Emission Contrôlées

Source : IMO

Dans ces zones comme illustrées dans la **Error! Reference source not found.**, depuis le 1 janvier 2015, la teneur en soufre des carburants utilisés dans ne doit pas dépasser 0,1% afin de limiter les émissions de SOx dans l'atmosphère (IMO, 2014). Cependant, les teneurs en soufre dans les zones non ECA vont être réduite à 0,5% en 2020 contre 3,5% actuellement. Dans la Figure 5 on peut voir l'ensemble des évolutions des teneurs maximales en soufre entre 2005 et 2022. Au niveau mondial, en l'espace d'une quinzaine d'année, l'OMI aura presque réussi à diviser par 10 la teneur en soufre (IMO, 2020). Néanmoins, il est toujours possible d'utiliser du carburant avec une quantité de soufre plus importante si on utilise un scrubber.

Nous savons d'ores et déjà que les navires ont un impact sur le réchauffement climatique en raison d'émissions de CO₂. L'acidification des pluies et des océans

est une conséquence directe des émissions de SOx. Les NOx sont eux responsables d'impacts environnementaux et sur la santé humaine. La combustion de fuel est aussi productrice de particules fines et de suies qui impactent aussi la santé humaine. Cependant, l'usage de différents carburants ou propulsion permettent d'en limiter certains aspects.

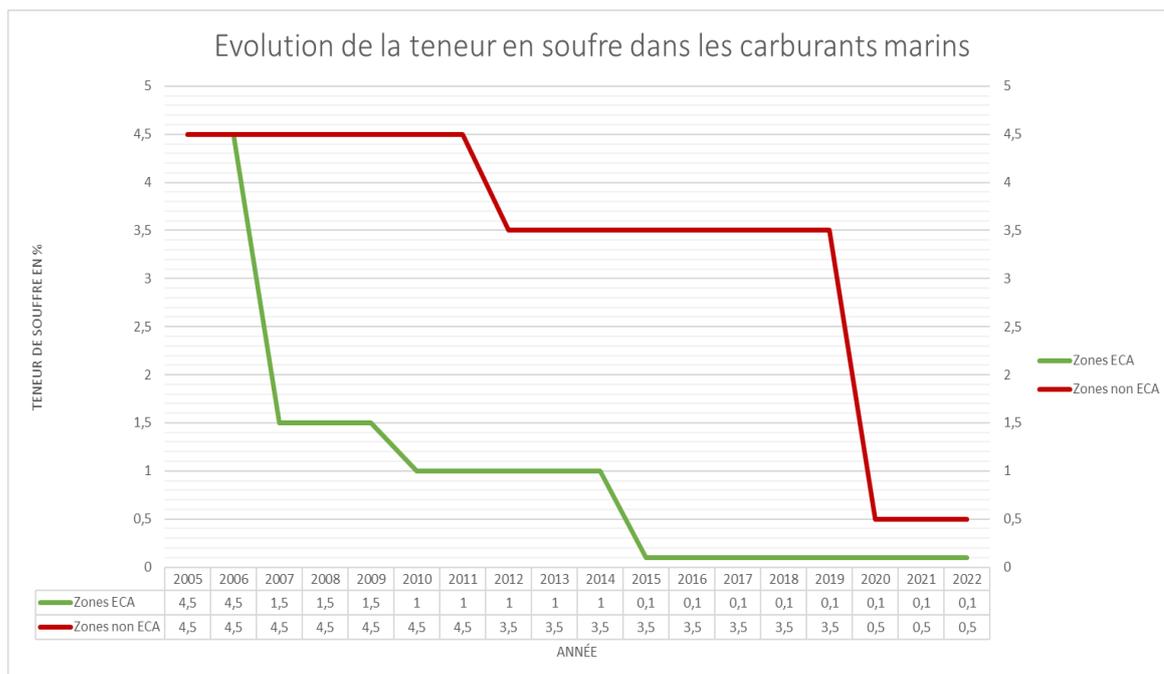


Figure 5 Evolution de la teneur en soufre dans les carburants marins

Source : *Propre travail*

3 Fuel et propulsion dans la marine marchande

3.1 Les différents fuels utilisés couramment

3.1.1 Le Fuel lourd HFO

Le *heavy fuel oil* (HFO) était le type de carburant le plus utilisé dans le transport maritime jusqu'à la fin de l'année 2019 en raison de son faible cout. On estime à 200 millions de tonnes, la consommation annuelle de fioul lourd pour le transport maritime (ISEMAR, 2018). Il est de couleur noire et dispose de longue chaines d'hydrocarbones. Selon l'annexe 1 Marpol, chaque carburant qui a une densité de plus que 900 kg/m^3 à la température de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ est considéré comme fuel lourd.

Il existe à ce jour plusieurs types fiouls lourd utilisés à bord des navires marchands. On trouve l'*Intermediate Fuel Oil* (IFO) de grade 180 et 380. Ces deux chiffres correspondent à leur viscosité maximale à la température de 50 degrés Celsius. Elle est exprimée en centistoke, unité de la viscosité cinématique. Il s'agit de la capacité d'un liquide à s'épandre. Plus le chiffre est élevé, moins le liquide à la capacité de s'épandre. A bord, pour pouvoir être pompé et être ensuite envoyé dans la propulsion, ces fuels doivent être réchauffés en permanence à une température supérieure à 40 degrés Celsius. En effet, la viscosité d'un liquide diminue lorsque la température augmente. A une température d'environ 15 degrés, L'IFO à l'apparence d'un bloc de bitume.

Leur teneur en soufre est limitée par l'annexe 6 du code Marpol à 3.5% du volume (International Maritime Organization, 2017). Néanmoins, depuis le 1^{er} janvier 2020, ils ne sont seulement utilisables que si le navire est équipé d'un scrubber (voir 6.2.1) afin de limiter la libération dans l'atmosphère de SOx.(Confuorto, 2020)

On distingue également une autre variante de fuel lourd, la famille des produits ayant une teneur en soufre limitée et donc produisant moins de SOx lors de leurs combustions. On a ainsi le *Very Low Sulfur Oil* (VLSFO) d'une teneur maximale à 0,5% de soufre qui permet alors de se passer de scrubber. Il représente depuis janvier 2020 le carburant marin le plus utilisé (55% des parts de marché) pour la propulsion (Hellenic Shipping News Worldwide, 2020). Il s'agit seulement d'un type de fuel lourd qui a été désulfuré au cours du processus de raffinage.

Le *Ultra Low Sulfur Oil* (ULSFO) quant à lui à une teneur inférieure à 0,1% dans le but de se conformer aux normes d'émissions des zones ECA. L'utilisation de ce fuel serait en partie responsable de l'échouage du *Pride of Kent* dans le port de Calais (MAIB, 2019) en décembre 2017. Au cours des six derniers mois, depuis le passage du MGO vers le ULSFO, une des pompes d'alimentation en carburant du navire avait des performances réduites. Pour cela, la vitesse de rotation du moteur principal bâbord avait été réduite. En raison de cette modification, l'alternateur attelé sur la ligne d'arbre n'a pas pu délivrer assez de puissance au propulseur d'étrave ce qui a fait tripper ce dernier au cours d'une manœuvre par vent fort. A la suite de cet incident, la compagnie à fait le choix de revenir au MGO (MAIB, 2019).

Ce processus de désulfuration n'est pas sans conséquences pour les rejets atmosphériques en termes de CO_2 (Soares & MARTECH, 2014) . Pour le HFO désulfuré à 0,5%, on estime que lors du processus de raffinage, 6g de CO_2 supplémentaires par MJ seront alors rejetés en plus, soit environ 6,6% du total émis.

3.1.1 MGO

Le MGO est exclusivement composé de fuel distillé. Les distillats sont tous les composants gazeux du pétrole brut qui s'évaporent en distillation fractionnée et sont ensuite transformés sous la forme liquide. Le gasoil marin se compose généralement d'un mélange de divers distillats. Il est similaire au diesel routier (0,845 kg/L) mais a une densité plus élevée (0,860 kg/L). Contrairement au fioul lourd (HFO), le gasoil marin n'a pas besoin d'être maintenu à une température d'environ 50°C pendant le stockage pour rester sous forme liquide. Il est recommandé de le stocker à la température ambiante (Mobley, 2001). Il est de couleur transparente. La teneur maximale en soufre est de 0,1% depuis le 1^{er} janvier 2015. Son prix est légèrement plus élevé (Ship and Bunker, 2020) par rapport au HFO, ce qui expliquait son usage restreint.

Il est censé être plus propre que le HFO en raison d'une baisse des émissions de SO_x de 75 à 80% mais réclame plus d'énergie pour le produire. Les émissions de CO_2 sont légèrement supérieures de 1% (Corbett & Winebrake, 2008). Le potentiel de réchauffement global est donc plus élevé.

3.1.1 LNG

Le LNG est de plus en plus utilisé comme carburant à bord des navires marchands. Les premiers à l'utiliser étaient les méthaniers qui utilisaient le boil-off de leur citerne afin d'alimenter une turbine à vapeur, comme par exemple le Méthania de la compagnie maritime Belge Exmar. Depuis quelques années, les méthaniers disposent à présent d'un moteur dual fuel (Huan, Hongjun, Wei, & Guoqiang, 2019) (voir 3.2.2).

Néanmoins, au cours de ces dernières années, cette énergie intéresse de plus en plus d'armateurs en raison de son bas cout et certains avantages environnementaux.

Afin d'être stocké dans des réservoirs, il doit être liquéfié. Sa température de liquéfaction est d'environ -161°C . Cette opération permet de diminuer son volume d'environ 400 fois par rapport aux conditions atmosphériques ambiantes. On estime son pouvoir calorifique entre 37,99 et 43,2 MJ/ m³(Barnett, 2010).

Le LNG est composé de plusieurs éléments dont le méthane en majeure partie. La concentration de ses éléments varie en fonction de l'origine d'extraction comme dans le

Tableau 3 ci-dessous. Ces valeurs sont une moyenne au niveau mondial. Les meilleurs LNG ont une teneur jusque environ 98% de Méthane. Les principaux pays producteurs sont les suivants : Etats Unis d'Amérique, Russie, Iran, Canada, Qatar, Chine, Norvège, Australie, Arabie Saoudite et enfin l'Algérie (BP, 2019) (Hönig, Prochazka, Obergruber, Smutka, & Kučerová, 2019).

Tableau 3 Principaux constituants du LNG

Source : propre travail d'après les données BP (2019)

3.2 Les différentes propulsions

<p>diesel</p> <p>lente</p> <p>Le moteur moyen de utilisé le plus à bord des marchands</p>	Méthane CH_4	70-90	<p>3.2.1 Le moteur 2 temps à rotation</p> <p>diesel est le propulsion fréquemment navires actuellement.</p>
	Ethane C_2H_6	0-20%	
	Propane C_3H_8		
	Butane C_4H_{10}		
	Dioxyde de carbone CO_2	0-8%	
	Oxygène O_2	0-0,02%	
	Azote N_2	0-5%	
	Sulfure d'hydrogène H_2S	0-5%	
	Gaz Rares Argon, Hélium	Traces	

Environ 99% de la flotte marchande mondiale est équipée d'un moteur diesel (Lataire, 2019).

D'un point de vue économique, on distingue plusieurs avantages à utiliser un moteur diesel 2 temps. En premier lieu, c'est la possibilité d'utiliser le fioul résiduel comme le HFO (Ling-Chin & Roskilly, 2016). Le prix du carburant donne à ce jour, tous les avantages à choisir ce moyen de propulsion (Lataire, 2019). Le moteur diesel dispose également d'une grande souplesse d'utilisation, on peut naviguer suivant le régime moteur que l'on souhaite.

Il existe cependant certains points négatifs à ce système comme la masse de l'installation, la fiabilité ou encore l'usage de nombreux consommables en grande quantité comme l'huile nécessaire à la lubrification. Ce qui aujourd'hui pousse à remettre en cause le moteur diesel est son impact sur l'environnement.

3.2.2 Les moteurs Dual-Fuel

La technologie Dual-Fuel est de plus en plus utilisée dans la propulsion maritime. Les navires de type gazier LNG ont été parmi les premiers à être associés à ce système. Il s'agit d'un moteur diesel 2 temps conventionnel dans lequel, on peut utiliser soit du HFO ou du LNG (Weaver & Turner, 1994) et (Huan et al., 2019). Un mix des deux est également possible. Ceci est intéressant pour pouvoir utiliser l'un ou l'autre carburant en fonction de leurs prix respectifs. Il est cependant nécessaire d'utiliser toujours une petite quantité de diesel (environ 5%) lors de l'usage de LNG afin de sécuriser la combustion et de garantir une lubrification. (Lataire, 2019).

Il existe une autre alternative qui consiste à utiliser une propulsion de type diesel électrique à l'aide de moteurs 4 temps. Le principe du moteur 4 temps dual fuel consiste à produire de l'électricité afin d'alimenter une propulsion électrique. Il s'agit tout simplement d'un générateur électrique (Attah & Bucknall, 2015).

Aussi inattendu que cela puisse paraître, le monde du dragage s'intéresse à présent à la technologie dual-fuel. Un des navires du groupement d'intérêt économique, Dragage Port exploitée par le Grand Port Maritime de Nantes a été le premier navire sous pavillon français et européen à être convertie en Dual-Fuel. La Samuel de Champlain a été mise à l'eau en 2002 et a reçu cette transformation pendant l'hiver 2018-2019 chez Damen à Dunkerque (The Maritime Executive, 2019). Le navire était propulsé par trois moteurs conventionnels 4 temps de type diesel électrique. La transformation a consisté

à remplacer les moteurs diesels 4 temps conventionnels par des moteurs 4 temps dual fuel, tout en conservant la propulsion électrique originale.

Les avantages mis en avant par cette transformation sont une baisse des couts d'exploitation liés au carburant mais aussi une réduction des émissions polluantes dans l'atmosphère. A ce jour, il n'existe pas de données disponibles à la suite de cette transformation.

3.2.3 La turbine à gaz

En 1947, la Royal Navy Britannique à fait le choix d'équiper un Motor Gun Boat d'une turbine à gaz (« FIRST MARINE GAS TURBINE IN SERVICE. », 2009) qui à l'origine était propulsé par 3 moteurs diesels. Celle-ci entraînait directement la ligne d'arbre.

Le principe même d'une turbine à gaz est d'extraire de l'énergie depuis la combustion de gaz et de la transformer en énergie mécanique. Entre la fin des années 1940 et les années 1990, de grandes avancées ont été réalisées. Aujourd'hui, la température de combustion est de l'ordre de 1300°C contre 800°C à l'époque. La puissance disponible est passée de 10 à 100MW en moyenne (Wärtsilä,2020).

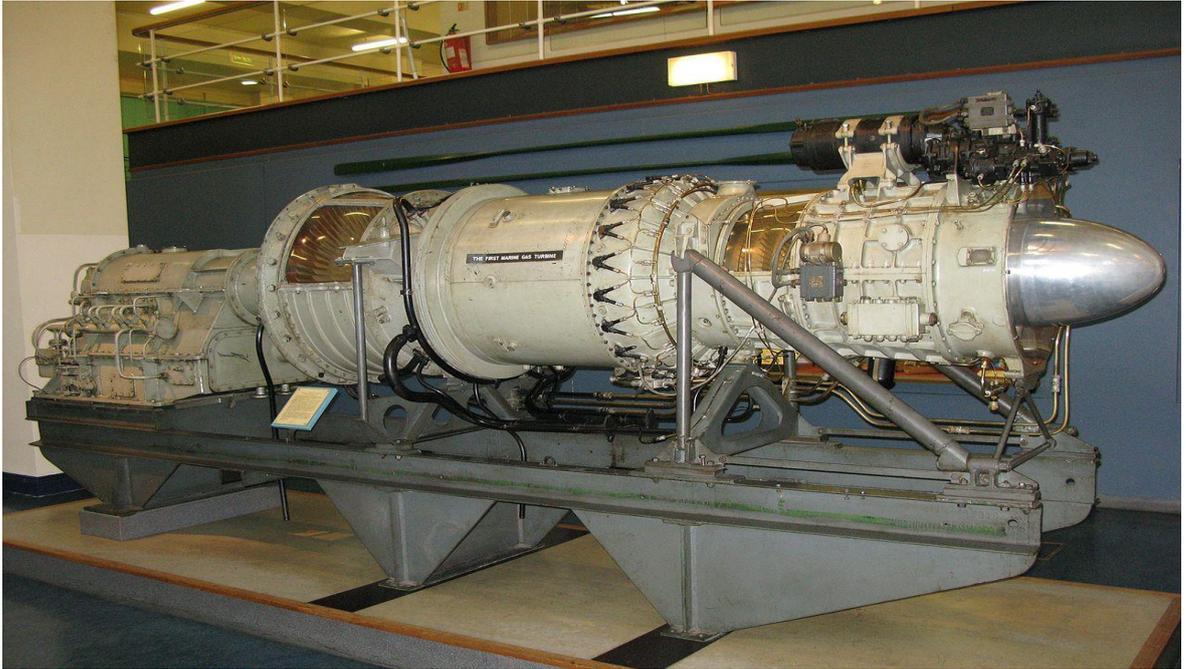


Figure 6 La première turbine à gaz équipant un navire

Source: Wikipedia CC BY-SA Geni photo (2009)

On trouve de nombreux avantages et désavantages à ce moyen de propulsion. D'un point de vue consommation de fioul, elle est beaucoup plus grande qu'un moteur diesel conventionnel et il doit être d'une grande qualité. S'il y'a des impuretés dans le carburant, celles-ci risquent d'entrer en contact avec les ailettes de la turbine et donc de les détruire.

Cependant, l'installation est relativement légère par rapport à la puissance développée, c'est-à-dire entre 1 et 2 kg/kW. De plus, l'espace occupé est plutôt réduit ce qui est avantageux sur de petits navires. Elle équipe principalement les navires qui devaient tenir un devis de poids limité mais nécessitant une grande puissance comme les navires militaires, les hovercrafts.

Malgré son faible rendement d'environ 25%, elle est néanmoins avantageuse d'un point de vue environnemental car les émissions en NOx ainsi qu'en CO₂ sont légèrement plus faibles qu'un moteur diesel conventionnel.

Certains navires de croisière récents en sont pourvus comme le Queen Mary 2 (GE Aviation, 2017) en plus d'une propulsion diesel-électrique . L'avantage d'avoir ces deux différents systèmes est de privilégier l'aspect de la consommation de carburant (Diesel) ou environnemental (Turbine).

3.2.4 Récapitulatif

Tableau 4 Tableau récapitulatif des différents modes de propulsion

Source : *Propre Travail*

Propulsion	Rendement	Environnement	Cout de fabrication	Masse
2 temps rotation lente	Excellent	Mauvais	Faible	Elevée
Turbine à gaz	Mauvais	Excellent	Elevé	Faible
Moteur dual-Fuel	Excellent	Mauvais avec avec fuels classiques Excellent avec LNG	Elevé	Elevée

Le tableau 4 reprend ainsi chaque avantages et désavantages présentés dans les paragraphes ci-dessus. Cependant, un moteur en particulier est intéressant car il semble combiner plusieurs avantages par rapport aux autres, le moteur dual-fuel. Celui-ci va être au centre de l'étude pour la comparaison de plusieurs fuels qu'il peut utiliser : Le HFO, le MGO et enfin le LNG. Est-ce que ces trois carburants respectent pleinement les conditions d'émissions polluantes ? Le LNG est-il vraiment le carburant du futur car censé être plus propre ?

4 La méthodologie de LCA

4.1 Les origines

Le principe du LCA est une méthode d'approche qui permet d'estimer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service au cours d'une partie de son cycle de vie ou dans sa totalité. Il est primordial de définir ce qu'est le cycle de vie d'un produit. On retrouve plusieurs étapes : l'extraction des matières premières, la production, le transport, l'utilisation sa fin de vie et éventuellement le recyclage comme illustré dans la Figure 7.

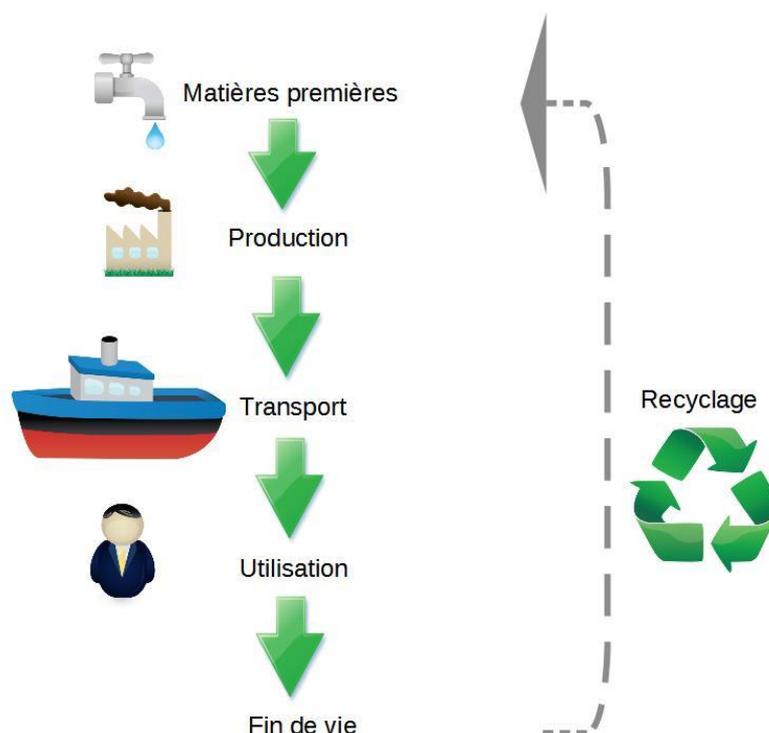


Figure 7 Le cycle de vie

Source : *Propre Travail*

Le cycle de vie parfait est connu sous le nom du berceau au berceau, ce qui veut dire lorsqu'un produit est en fin de vie, ses déchets deviennent alors une matière première pour un nouveau produit.

Il faut remonter à la fin des années 60 aux États-Unis (Hunt, Franklin, & Hunt, 1996) ou encore au Royaume-Uni au début des années 70 (Boustead, 1996) pour retrouver les prémices de la méthode LCA. D'après Ciambrone (1997), le premier bilan énergétique aurait été présenté en 1963 lors de la Conférence mondiale de l'énergie par Harold Smith.

Ainsi en 1972, l'homme prend conscience que les ressources naturelles ne sont pas inépuisables comme il pouvait le penser. Ceci est mis en avant dans le rapport *The Limits to Growth*, (Meadows & Club of Rome, 1972). Dans ce rapport, il est souligné que à moyen terme, en raison de la forte demande en matières premières et en énergie, il y aura pénurie avec pour conséquences un déclin économique au niveau mondial.

L'entreprise Américaine Coca-Cola par le biais de Midwest Research Institute (MRI) a été la première à réaliser une étude sur l'impact environnemental de ses emballages. Il apparaît dans plusieurs ouvrages que cette étude était novatrice pour l'époque et était relativement proche de la méthode LCA telle que nous la connaissons aujourd'hui mais connue sous le nom de Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Cela consistait à quantifier les ressources utilisées ainsi que les rejets dans l'environnement. Néanmoins, selon cette étude n'a jamais été publiée par Coca Cola pour des raisons confidentielles (Hunt et al., 1996) bien que mise en avant sur leur site internet officiel (The Coca-Cola Company, 2018). Cette étude REPA a permis à

l'entreprise de se rendre compte que contrairement aux idées reçues de l'époque la bouteille en plastique pollueait moins qu'une bouteille en verre. Une quinzaine d'autres entreprises Américaines et Européennes ont également réalisées des études similaires au cours de cette même décennie. Le fabricant de produits chimiques américain Mobil a été le second à en réaliser une à propos de ses barquettes en plastique afin d'emballer la viande. Ils en ont conclu que leurs produits étaient mauvais pour l'environnement.

Au début des années 1970, les premiers signes d'une crise économique se font sentir et seront renforcés par deux grands événements historiques. Ainsi, les accords de Bretton Woods sont suspendus en Août 1971 ainsi que la guerre du Kippour en Octobre 1973 seront les principaux éléments déclencheur du premier choc pétrolier en 1973 et 1974. En effet, à la fin du conflit, l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) fait le choix de réduire la production mondiale de pétrole ainsi que de prendre un embargo contre les États Unis d'Amérique en raison de leur soutien Israélien. Les principales conséquences seront que le prix du baril de pétrole brut étant alors aux alentours de 3 US\$ est multiplié par quatre pour atteindre environ les 12 US\$.

CRUDE OIL PRICES SINCE 1861

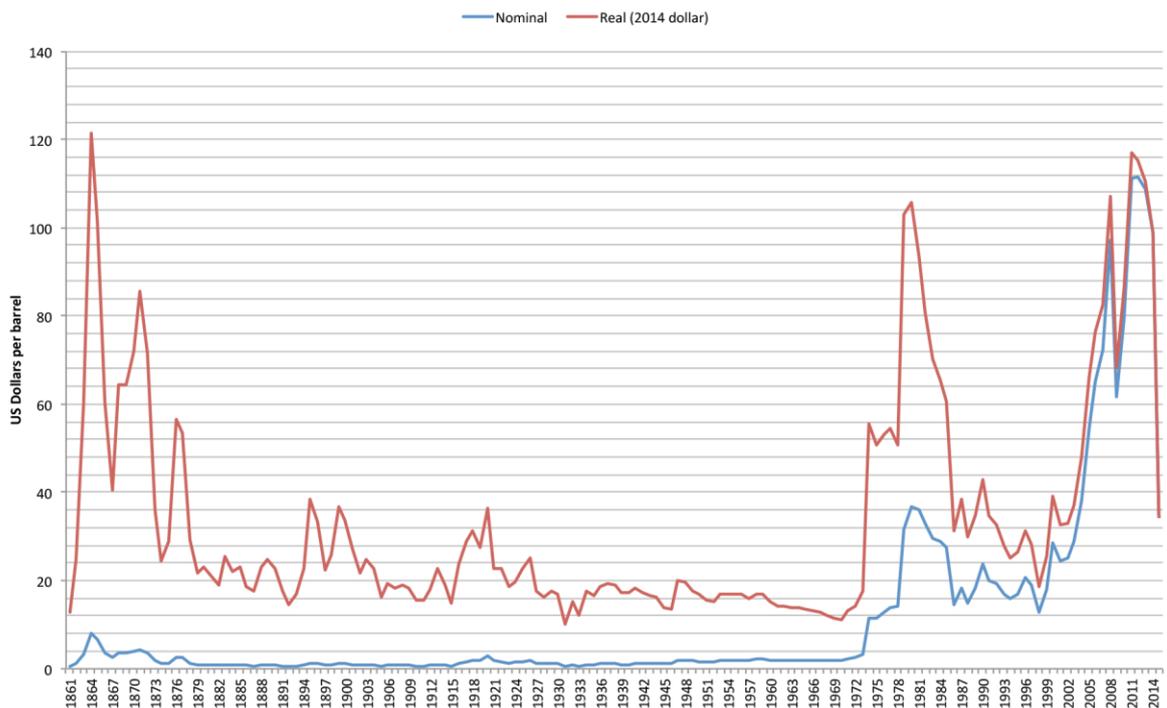


Figure 8 Evolution des cours du baril de pétrole entre 1861 et 2011

Source: Wikipédia, CC BY-SA Jashua data from BP workbook of historical data

Ce premier choc pétrolier sonnera la fin de l'ère du pétrole bon marché, et donc l'augmentation de certains produits dérivés directement du pétrole comme les matières plastiques ou encore du carburant.

En 1979, un nouveau choc pétrolier frappe de nouveau les économies occidentales principalement lié à une baisse de l'exportation en raison la révolution Iranienne. Entre 1978 et 1981, le prix moyen du baril de pétrole brut passera de 14US\$ à 35US\$, ce qui représente une hausse de 2,5 fois le tarif initial. Entre 1973 et 1981, cela représente une hausse cumulée de 1170%.

Le contexte économique des années 1970 nous permet donc de comprendre pourquoi la méthode LCA s'est développée. Les industriels cherchaient majoritairement à produire tout en utilisant le minimum d'énergie possible dans

le but de réduire au maximum les coûts de production. L'environnement n'était sans doute pas le principal objectif du REPA à cette époque.

Au cours des années 1980, le système LCA est moins utilisé en raison de la baisse du prix du pétrole et donc de ses dérivées. Néanmoins, il connaîtra un regain d'intérêt au début des années 1990 avec la nouvelle problématique de la gestion des déchets solides ainsi que les craintes d'un troisième choc pétrolier avec la guerre du Golfe en 1991.

Grâce au LCA, on a pu comprendre pendant cette même décennie qu'il était possible de recycler et de revaloriser certains déchets. En ce temps-là, il existait seulement 3 voies : incinération, décharge ou compostage. (ADEME, 2005).

On retrouve l'origine de l'abréviation LCA au cours de cette même décennie. Le concept repose tout simplement sur l'analyse des flux entrés dans le cycle de vie du produit comme l'énergie et les matières premières utilisées et de sortie : l'énergie perdue et les déchets qui en résultent. Cette décennie sera également celle du début de la normalisation du LCA.

4.2 Un système standardisé

4.2.1 Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale

La Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) est une organisation impliquée dans le développement du LCA. Ainsi en 1993 un code de pratique est rédigé à propos du LCA (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2010). On y retrouve quatre grandes différentes étapes : La définition des objectifs et du

système, l'inventaire, l'analyse de l'impact et enfin les évolutions possibles comme visible sur la Figure 9.

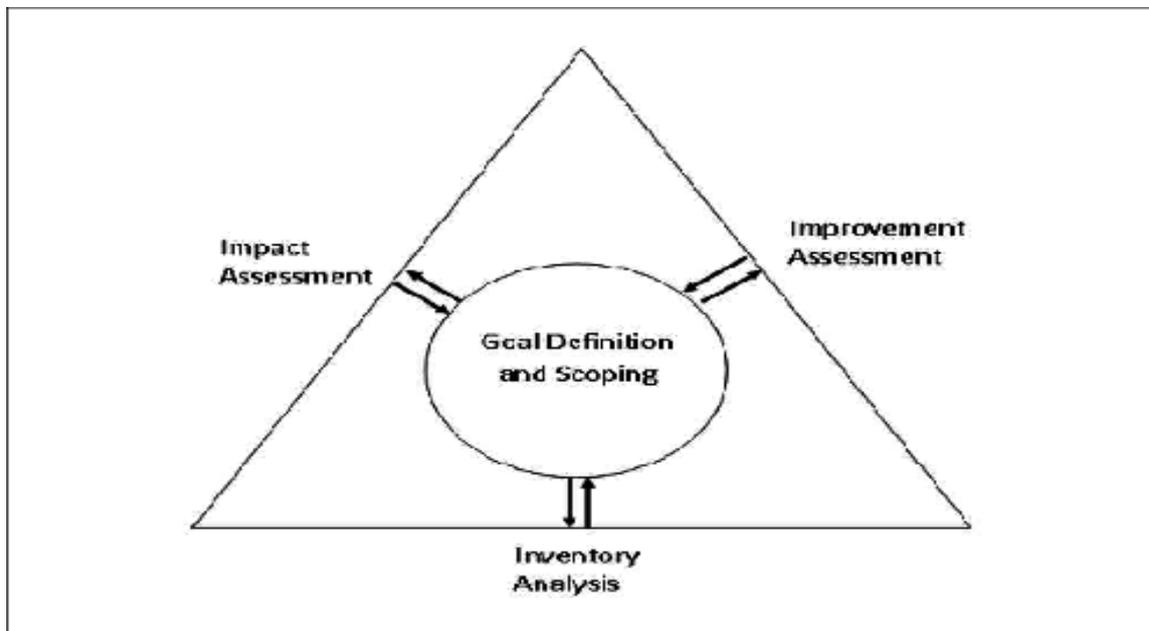


Figure 9 Le principe du LCA selon la SETAC

Source : SETAC (1993)

4.2.2 Programme des Nations unies pour l'environnement

Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) est une organisation dépendante des Nations Unies créée en 1972. Elle a pour principal but de coordonner les actions de l'Organisation des Nations Unies (ONU) dans le domaine de l'environnement. Le PNUE s'est associé en 2002 à la SETAC pour lancer l'initiative du cycle de vie qui est en réalité un partenariat international dont l'idée est la mise en application du cycle de vie. Ainsi en 2004, le directeur général du PNUE Klaus Tøpffer écrivait à ce sujet « *Les consommateurs s'intéressent de plus en plus à ce qu'il y a derrière le produit qu'ils achètent. Selon la perspective du cycle de vie, tous les intervenants qui*

agissent sur la chaîne du cycle de vie d'un produit, de sa création à son élimination, ont une responsabilité et un rôle à jouer, et tous les effets externes pertinents doivent être pris en considération. Pour pouvoir prendre des décisions éclairées sur les modèles de production et de consommation, sur les orientations et les stratégies de gestion, il faut tenir compte des effets de toutes les étapes du cycle de vie : prélèvement des matières premières, fabrication, utilisation par le consommateur, gestion et élimination à la fin de la vie utile. »

4.2.3 International Organisation for Standardisation

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a vu le jour le 23 janvier 1947 (ISO, 2018) et siège depuis en Suisse à Genève. Actuellement 164 états membres font partis de cette organisation et en 70 ans plus de 22538 normes ont été publiées.

La série des normes ISO 14000, intitulé management environnemental regroupe plusieurs codes comme par exemple les normes 14020 à 14025 concernant les marquages et les déclarations. En 1997 est publié la norme ISO 14040 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre suivi, en 1998 par ISO 14041 Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire, puis en 2000 ISO 14042 Évaluation de l'impact du cycle de vie et ISO 14043 Interprétation du cycle de vie et enfin ISO 14044 Exigences et lignes directrices.

Néanmoins en 2006, l'ensemble de ces normes ISO a été revu et corrigé. Les anciens codes 14041, 14042 et 14043 sont à présents annulés, révisés et inclus dans ISO 14040 et ISO 14044.

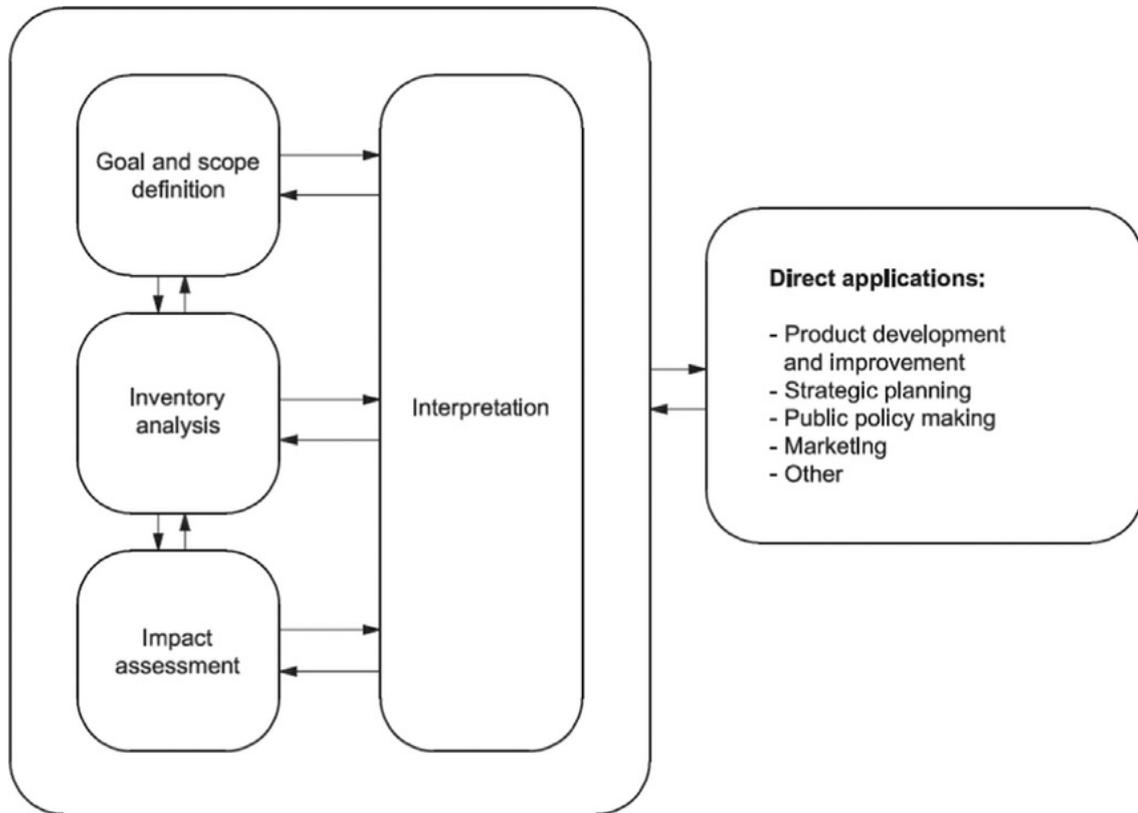


Figure 10 Les 4 grandes étapes du LCA selon ISO

Source : ISO 14040 (2006)

Grâce à la Figure 10, on remarque qu'ISO 14040 est le schéma de principe de la méthode LCA avec les quatre parties qui sont relativement proches de celle décrites par la SETAC. On a donc :

- La définition des objectifs et du champ de l'étude
- L'inventaire des émissions et des extractions
- L'analyse de l'impact environnemental
- L'interprétation

4.3 La Méthodologie

4.3.1 La définition des objectifs et du champ de l'étude

La définition des objectifs et du champ de l'étude est précisément le nom de la première étape d'un LCA selon la norme ISO 14040. Jusque en 2006, cette première étape était décrite dans l'ancien code ISO 14041, aujourd'hui obsolète. Elle est relativement importante et est essentielle pour la qualité de l'étude qui va être réalisée. Ainsi ISO 14040 définit clairement les objectifs en indiquant que les éléments suivants doivent être affichés sans aucune ambiguïté {ISO, 2006}:

- L'application envisagée
- Les raisons conduisant à réaliser l'étude
- Le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude.
- S'il est prévu que les résultats soient utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.

Pour résumer, on doit adapter l'étude selon le produit que l'on choisit d'analyser, c'est-à-dire si c'est pour évaluer l'impact d'un produit déjà existant et de comparer éventuellement avec une alternative déjà existante. C'était une des premières utilisations du LCA. On peut l'utiliser pour développer un nouveau produit et d'envisager certaines améliorations sur le projet initial afin d'en minimiser ou à défaut d'en réduire l'impact environnemental. Dans ce cas on parle d'étude comparative comme par exemple une comparaison des impacts environnementaux entre le LNG, le biogaz liquéfié, méthanol et le bio-méthanol (Brynolf, Fridell, & Andersson, 2014).

Selon le public concerné, on doit également prendre en considération les différents intérêts du ou des commanditaires de l'étude et le public qui est visé. Ainsi, si ce sont les consommateurs qui sont demandeurs de cette étude, leur motivation principale est bien souvent de comparer les impacts environnementaux de plusieurs produits dans l'objectif de choisir celui qui aura l'empreinte environnementale la moins prononcée. Par exemple, le choix d'un véhicule essence, diesel ou encore électrique. Si c'est un producteur, il souhaite réduire la pollution engendrée. Nous pouvons reprendre l'exemple des constructeurs automobiles qui doivent être en conformité avec les normes de rejets maximales de CO_2 selon Euro 6. C'est une étude d'un produit par rapport à un standard.

A présent il s'agit de développer le principe du champ de l'étude. Ici encore ISO 14040 (2006) décrit clairement les éléments suivants :

- Le système de produits à étudier : Un navire par exemple
- Les fonctions du ou des systèmes dans le cas d'études comparatives
- La frontière du système : si on étudie l'ensemble du cycle de vie ou seulement un ou plusieurs aspects comme la phase d'utilisation et le démantèlement.
- Les règles d'affectation
- La méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact par exemple la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet et al (2002))
- L'interprétation à utiliser

- Les exigences portant sur les données
- Les hypothèses : le fuel lourd est plus polluant que le LNG (Bengtsson, Andersson, et Fridell , 2011)

- Les choix de valeurs et les éléments facultatifs
- Les limitations
- Les exigences de qualité des données
- Le type de revue critique, le cas échéant
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude

Il est primordial de définir en avance et le plus précisément possible le niveau de détails de l'étude afin qu'il soit en accord avec l'objectif défini et surtout que l'on puisse y répondre.

Maintenant, on doit démontrer la fonction principale du système ou bien du produit. Si nous sommes dans le cas d'une étude comparative du transport maritime avec le transport ferroviaire, la fonction est bien la même, néanmoins on cherchera uniquement à comparer lequel de ces deux moyens de transport à le moins d'impact sur l'environnement.

La fonction première d'un navire marchand est avant tout de transporter des biens entre un point A et un point B par la mer. La protection de l'équipage, assurer sa sécurité et lui offrir un espace de vie font parties des fonctions secondaires.

Enfin, on doit déterminer une unité de référence. Elle est toujours la même, peu importe le scénario choisit mais doit être en rapport avec les objectifs de

l'étude. Ainsi, si on réalisait une étude comparative entre un avion-cargo et un navire marchand, on peut mettre en parallèle le nombre de tonnes transportés d'un certain type de marchandise par ces deux moyens sur une certaine durée. Si on choisit une unité de référence de 1 an, avec un avion-cargo et un navire marchand de 150 mètres sur un trajet Anvers- New York, le navire pourra transporter plus de marchandise en un seul voyage mais cependant, le temps du voyage sera plus important. On pourra alors comparer sur une année quel sera l'impact environnemental d'une tonne de marchandise transportée par ces deux modes de transports.

Si on réalise uniquement une étude sur un navire marchand, notre unité fonctionnelle correspondrait à un navire en état de fonctionnement pendant 10, 20, 30 ans ou plus, et notre flux de référence serait le nombre de navire nécessaire pendant cette période : 1 navire d'excellente qualité pendant les 30 ans ou bien 2 navires de basse qualité pendant ces 30 ans. Pour résumer, cela correspond tout simplement à la durée de vie du produit. Il est donc important de choisir la même unité fonctionnelle sous peine d'avoir des résultats erronés et donc de ne pas pouvoir réaliser une comparaison correcte. A titre informatif, cette étape est commune avec l'Analyse du Cycle des Coûts (ACC).

4.3.2 L'inventaire des émissions et des extractions

Dorénavant, nous allons aborder la deuxième partie du LCA comme définie par l'ISO qui est intitulée l'inventaire des émissions et des extractions. Il s'agit purement de faire l'inventaire de toutes les substances qui entrent en jeu dans le cadre de notre analyse. On prend en compte les matières premières, l'énergie

consommée ainsi que les déchets produits dans le cadre des limites de notre étude tel que défini dans l'étape précédente. Si on effectue une analyse sur le cycle de vie complet d'un navire marchand, on doit prendre en compte la construction, son exploitation sur une durée définie ainsi que son démantèlement. Il s'agit tout simplement d'une analyse quantitative. On peut utiliser un simple tableur pour le réaliser. Certains logiciels permettent de réaliser plus facilement cette partie de l'étude comme par Open LCA (<http://www.openlca.org/>) car ils intègrent une base de données pour la majorité des matières premières comme par exemple les plastiques, l'acier ou encore le verre. Si nous revenons dans le cadre d'un navire marchand, nous pouvons d'ores et déjà intégrer les composants suivants dans notre inventaire : aciers et autres métaux comme le cuivre pour le câblage, diverses matières plastiques, bois, l'intégralité des peintures et la liste est pour le moment non exhaustive. Si on y réfléchit bien, on se rend rapidement compte qu'il est relativement difficile de déterminer de manière quantitative l'ensemble de ces matières à bord d'un navire déjà existant si nous n'avons pas la possibilité d'interroger son constructeur. Pour ce qui est de sa phase d'exploitation, on sait d'avance qu'on peut intégrer dans le bilan de nombreux hydrocarbures comme les huiles de lubrifications, le carburant ainsi que les composants nécessaires à son entretien comme les peintures pour l'ensemble de sa durée de vie. A partir de l'inventaire des principaux constituants et consommables, on peut alors utiliser les bases de données qui nous permettent de connaître leurs principales matières premières, les quantités d'énergies utilisées ainsi que l'ensemble des rejets dans l'environnement comme le dioxyde de carbone, l'oxyde de soufre (SOx)

ou encore les oxydes d'azotes (Nox) qui sont les principaux rejets lors de la combustion du fioul.

4.3.3 L'analyse de l'impact environnemental

Cette troisième étape a pour but de relier l'inventaire réalisé précédemment avec son impact sur l'environnement. Néanmoins, ses impacts sont classés différemment en sous-catégories intermédiaires ou d'impacts et enfin en catégories de dommages. Pour résumer, on regroupe simplement les sous catégories intermédiaires entre elles. La figure 5 est connue sous le nom de méthode Impact 2002+ avec 14 sous catégories qui se regroupent ensuite en quatre grandes catégories de dommages : la santé humaine, la qualité de l'écosystème, le changement climatique et enfin sur les ressources.

Cependant, il est nécessaire de déterminer une valeur de normalisation pour définir si l'impact est négligeable ou non. La définition de la normalisation (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2010) « les résultats de la caractérisation des impacts sont rapportés à des valeurs de normalisation. Cette étape compare la contribution du service considéré à l'effet total actuel au niveau mondial, continental ou régional pour une catégorie intermédiaire ou de dommage donnée ». La valeur de normalisation, "Nc", s'exprime simplement à l'aide d'un rapport :

$$\left(N_c = \frac{S_c}{V_{Nc}} \right)$$

"c" est la catégorie d'impact ou de dommage

"S" est le score de caractérisation

"VN" la valeur de normalisation, c'est à dire l'ensemble des impacts et, ou des extractions actuelles.

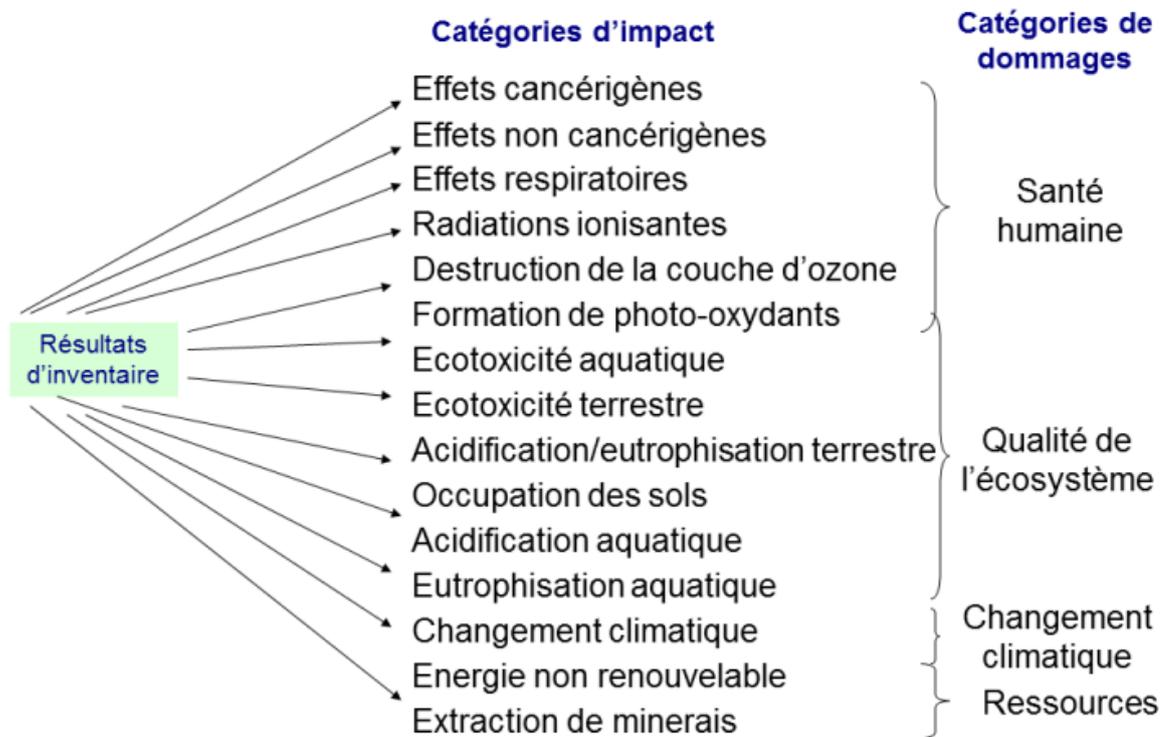


Figure 11 Les catégories d'impact et de dommages selon Impact 2002+

Source : (Jolliet et al., 2017)

4.3.4 L'interprétation

Le principal objectif de l'étape finale du LCA est de faire ressortir les phases du cycle de vie qui ont le plus d'impact sur l'environnement mais également de déterminer les incertitudes de l'ensemble de l'étude. Un rapport de la communauté européenne publié en 2016 (Joint Research Centre (European Commission)) est relativement utile afin d'interpréter correctement les résultats d'un LCA. On peut y lire que selon les recommandations du PNUE et de la SETAC, il faut considérer en priorité absolue les éléments dans l'ordre suivant :

- La problématique de l'eau et les autres ressources naturelles utilisées, les déchets produits, etc.
- Sur le cycle du produit en lui-même : son utilisation, sa fin de vie, etc.
- S'il est possible d'apporter des solutions selon les acteurs concernés : consommateurs, producteurs, fournisseurs, etc.
- Les ressources disponibles : le temps et l'argent qui peuvent être investis dans des actions correctives.

On peut par exemple tirer dans la conclusion que si on modifie légèrement une des étapes dans le cycle de vie du produit, comme par exemple lors de son élaboration, on peut à la fois réduire son empreinte environnementale mais également les coûts. Certes, dans un LCA nous n'aborderons pas les aspects économiques, mais cet aspect n'est pas négligeable et bien souvent primordial par rapport à l'environnement pour les différents acteurs. Nous revenons alors au début des premières analyses LCA pendant les années 70 afin de diminuer la quantité d'énergie utilisée pour pouvoir diminuer ou du moins limiter les coûts. Actuellement le LCA est surtout utilisé pour diminuer les impacts environnementaux mais l'aspect financier est bien entendu nettement pris en compte. Il serait tout à fait illusoire de penser que les acteurs qu'ils soient consommateurs ou producteurs soit prêt à payer 50 fois plus cher une nouvelle technologie qui n'a aucun impact sur l'environnement et qui permettrait de remplacer un système ancien et polluant.

Il est également important de comparer les résultats d'une étude avec une autre relativement semblable. Tout d'abord parce que les conclusions peuvent

être totalement différents, des éléments peuvent avoir été oubliés volontairement ou non, ou encore une mauvaise estimation des quantités, en particulier dans l'inventaire des émissions et des extractions.

5 Comparaison entre LNG, MGO et HFO

5.1 Objectif des champs de l'étude

En 2019, la compagnie maritime CMA CGM a été la première à installer un moteur dual fuel dans un navire de 23000 TEU. Il s'agit du 12X92DF de la société Winterthur.

Il y'a trois modes possibles de fonctionnement du navire, l'un au LNG, l'autre uniquement au HFO à 0,5% de teneur en soufre sans scrubber et enfin au MGO à 0,1% de teneur en soufre. L'objectif est de déterminer la différence des impacts environnementaux entre ces trois différents carburants. Nous limiterons notre étude au seul aspect de la combustion dans ce moteur bord en se focalisant uniquement sur les gaz à effet de serre, NOx ainsi que les particules en suspensions (PM). La vitesse commerciale du navire sera de 22 nœuds à 100% de la puissance maximale. L'hypothèse soulevée est que le LNG est le moins polluant, suivi du MGO et enfin le HFO.

Parmi les incertitudes qui peuvent déjà être soulignées, aucuns paramètres concernant les équipements pouvant améliorer ou au contraire diminuer le rendement comme l'hélice, les turbocompresseurs supplémentaires, la charge du navire ou encore la qualité du fuel ne sont pas inclus.

5.1.1 Caractéristiques du moteur dual-fuel 12X92DF

Il s'agit d'un moteur 2 temps à rotation lente de 12 cylindres. Les caractéristiques principales ont été obtenues depuis le logiciel GTD, disponible sur la page web de Winterhuur. La puissance développée à 80 RPM est de 63840 kw (86798 Chevaux). Sa masse à vide est de 2140 tonnes, sa longueur de 22,87 mètres pour une hauteur de 15,92 mètres. Pour fonctionner au LNG, comme souligné précédemment (voir 3.2.2), requiert malgré un petit montant de diesel. Il s'agit du fuel pilote.

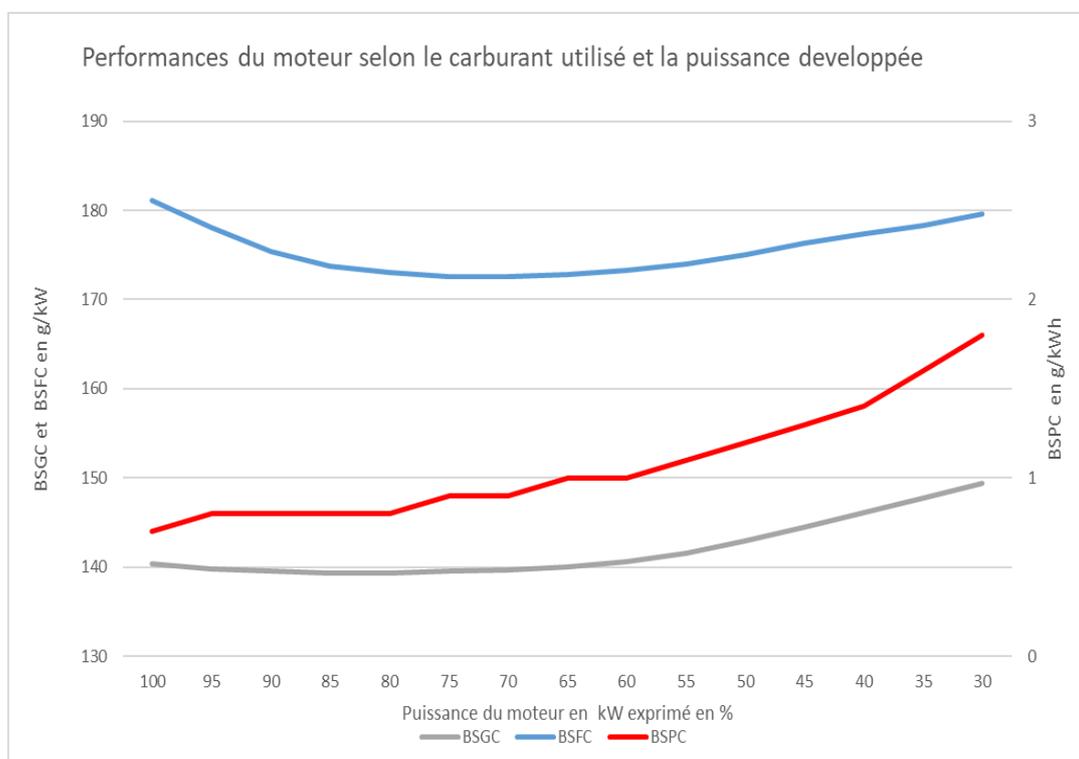


Figure 12 Consommation spécifique selon la puissance développée du 12X92DF

Source : *Propre travail d'après les données Winterhuur*

La consommation spécifique de fuel (BSFC) est un indice qui permet de mesurer les performances d'un moteur. L'unité s'exprime en g/kWh. Il s'agit d'un rapport basé sur le débit de carburant sur la puissance délivrée.

$$BSFC = \frac{mF}{Pe} * 3600$$

BSFC : Consommation spécifique en g/kWh

mF : Quantité de de fuel consommée en g/s

Pe : Puissance du moteur en KW

La consommation spécifique de Gaz (BSGC) ainsi que de fuel pilote (BSPC) sont dérivés de la même formule. Grace à la Figure 12 Consommation spécifique selon la puissance développée du 12X92DF on constate que le moteur est ainsi plus performant en mode gaz, malgré l'usage associé de fuel pilote. De cette formule, nous pouvons en déterminer la consommation théorique par heures.

Tableau 5 Données de la consommation du moteur en mode fuel

Source : *Propre travail d'après les données Winterhuur*

Puissance %	Puissance KW	BSFC g/kWh	Consommation de Fuel Tonnes/heure
110	70224	182,1	12,79
105	67032	181,2	12,15
100	63840	181,1	11,56
95	60648	178,1	10,80
90	57456	175,4	10,08
85	54264	173,8	9,43
80	51072	173	8,84
75	47880	172,6	8,26
70	44688	172,6	7,71
65	41496	172,8	7,17
60	38304	173,3	6,64
55	35112	174	6,11

50	31920	175	5,59
45	28728	176,3	5,06
40	25536	177,4	4,53
35	22344	178,3	3,98
30	19152	179,6	3,44
25	15960	179,6	2,87

Tableau 6 Données de la consommation du moteur en mode gaz

Source : *Propre travail d'après les données Winterhuur*

Power	Power	BSGC	Consommation de Gaz	BSPC	Fuel Pilote
%	KW	g/kWh	Tonnes/heure	g/kWh	Kg/heures
100	63840	141,2	9,0	0,7	44,7
95	60648	140,4	8,5	0,7	42,5
90	57456	139,8	8,0	0,8	46,0
85	54264	139,6	7,6	0,8	43,4
80	51072	139,3	7,1	0,8	40,9
75	47880	139,3	6,7	0,8	38,3
70	44688	139,5	6,2	0,9	40,2
65	41496	139,7	5,8	0,9	37,3
60	38304	140	5,4	1	38,3
55	35112	140,6	4,9	1	35,1
50	31920	141,5	4,5	1,1	35,1
45	28728	142,9	4,1	1,2	34,5
40	25536	144,5	3,7	1,3	33,2
35	22344	146,1	3,3	1,4	31,3
30	19152	147,8	2,8	1,6	30,6
25	15960	149,4	2,4	1,8	28,7

Le principal constat est qu'il est impossible pour le moteur en mode gaz d'avoir une réserve de puissance au-delà des 100% contrairement au mode fuel. La consommation de gaz est également plus faible par rapport au mode fuel en raison du pouvoir calorifique supérieur du gaz. C'est-à-dire que la même quantité de gaz a le pouvoir de produire plus d'énergie que du MGO ou bien du HFO. On peut compter sur une valeur moyenne de 40,4 MJ/kg de HFO, 43MJ/kg de MGO et 48 MJ/kg de LNG (Bengtsson, Andersson, & Fridell, 2011)

5.1.2 Conditions de réalisation de l'essai

Les données obtenues par le logiciel GTD peuvent être selon des conditions définies par l'utilisateur ou bien celle par défaut, conformes à la norme ISO 3046-1 (Moteurs alternatifs à combustion interne — Performances — Partie 1 : Déclaration de la puissance et de la consommation de carburant et d'huile de lubrification, et méthodes d'essai — Exigences supplémentaires pour les moteurs d'usage général). Cette dernière s'applique aux moteurs diesels marins, ferroviaires et pour les engins terrestres. On peut retrouver les conditions d'essais dans le tableau suivant :

Tableau 7 Conditions ISO 3046

Source : Propre travail d'après les données ISO 3046

Conditions ambiantes	ISO
Température de l'air avant ventilateur	25°C
Température de l'air dans la salle des machines	25°C
Température du réfrigérant avant le refroidisseur d'air de balayage	29°C
Pression atmosphérique	1000 mbar
Humidité relative	30%
Contre-pression des gaz d'échappement	300 mm WC

5.2 Analyse de l'inventaire

5.2.1 Les facteurs d'émissions de la combustion du fuel

L'analyse de l'inventaire consiste essentiellement à faire la liste des matières et substances polluantes qui vont entrer en compte dans notre étude. Nous allons nous focaliser uniquement faire un comparatif des résultats de la combustion de LNG, HFO et MGO par notre moteur dual fuel 12X92DF.

L'intégralité de l'étude aura pour but de comparer les émissions dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, Nox ainsi que les particules en suspensions. Nous ne prendrons en aucun cas en compte l'origine du fuel, le processus de raffinage, le transport ou encore le processus de liquéfaction pour le LNG.

Les quantités de polluants émises seront calculées à partir des facteurs d'émissions prévisionnels délivrés par une étude complète publiée par IMO en 2015. L'intégralité de l'étude sera basée sur les facteurs d'émissions prévisionnels de l'année 2030 car ceux-ci correspondent à la dernière mise à jour de l'annexe 6 de Marpol qui est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2020. Bien entendu, bien que les prévisions soient réalisées pour l'année 2030, les effets seront applicables dès l'année 2020.

Il est important de préciser que ces facteurs d'émissions incluent la présence de fuel pilote dans lors de la combustion de LNG et de HFO. Ces valeurs sont exprimées en grammes par grammes de fuel brûlés. Le LNG n'étant pas composé à 100% composé de méthane, on retrouve d'autres produits de la

combustion comme les particules en suspensions, les NOx ou encore du protoxyde d'azote.

Tableau 8 Facteurs d'émission en g/g fuel lors de la combustion du MGO, HFO et LNG pour l'année 2030

Source : *Propre travail d'après les données (IMO, 2015)*

Quantités en g /g fuel	MGO	HFO	LNG
CO₂	3,206	3,114	2,75
CH₄	0,00006	0,00006	0,05
N₂O	0,00016	0,00015	0,000108
SO₂	0,001	0,005	0
PM	0,00097	0,00385	0,00018
NOx	0,0877	0,0825	0,014

A partir de ces facteurs, pour chaque fuel et chaque espèce, on va calculer la quantité émise à partir de la consommation de carburant de notre moteur et nous allons les classer par catégorie d'impacts dans le sous paragraphe suivant (voir 5.3).

Le choix d'exclure le dioxyde de carbone des graphiques ci-dessous a été fait pour plus de visibilité car il représenterait à lui seul plus des 97% des émissions pour le MGO et HFO. L'objectif est de démontrer que les NOx sont les émissions majoritaires pour MGO et HFO après le dioxyde de carbone. (voir Figure 13 et Figure 14).

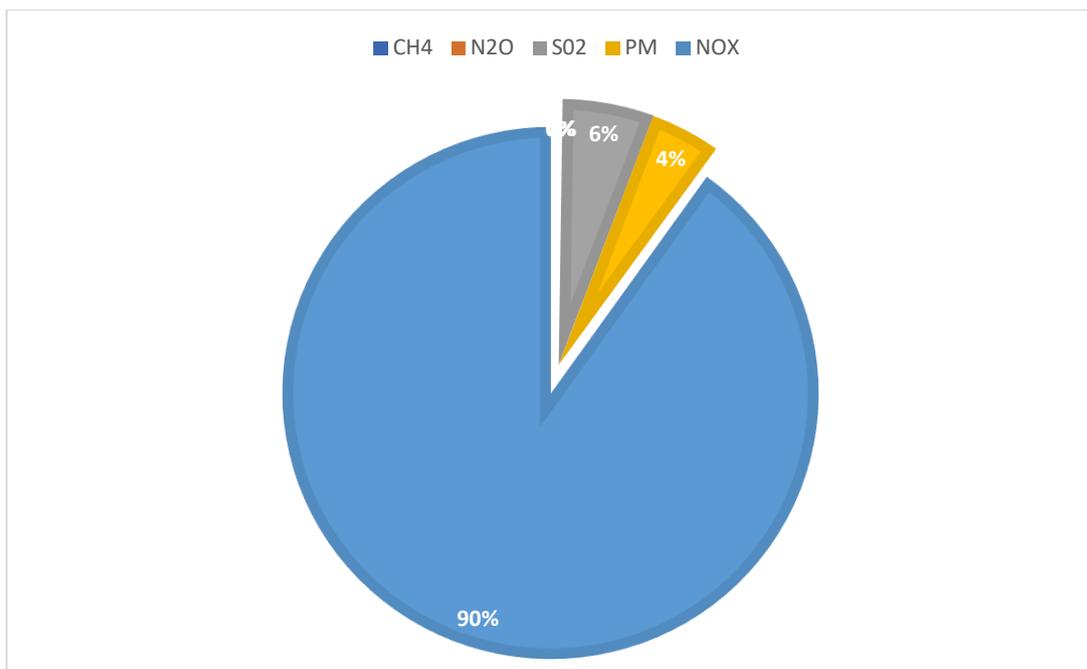


Figure 13 Emissions liées à la combustion de HFO hors CO2

Source propre travail

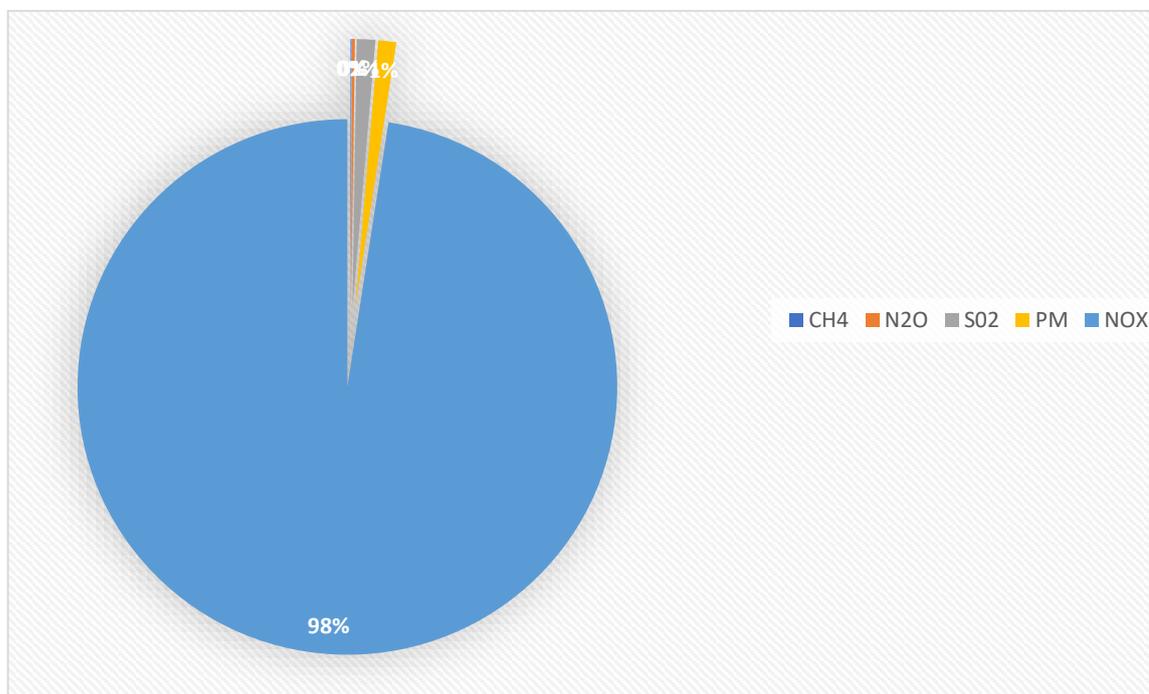


Figure 14 Emissions liées à la combustion de MGO hors CO2

Source propre travail

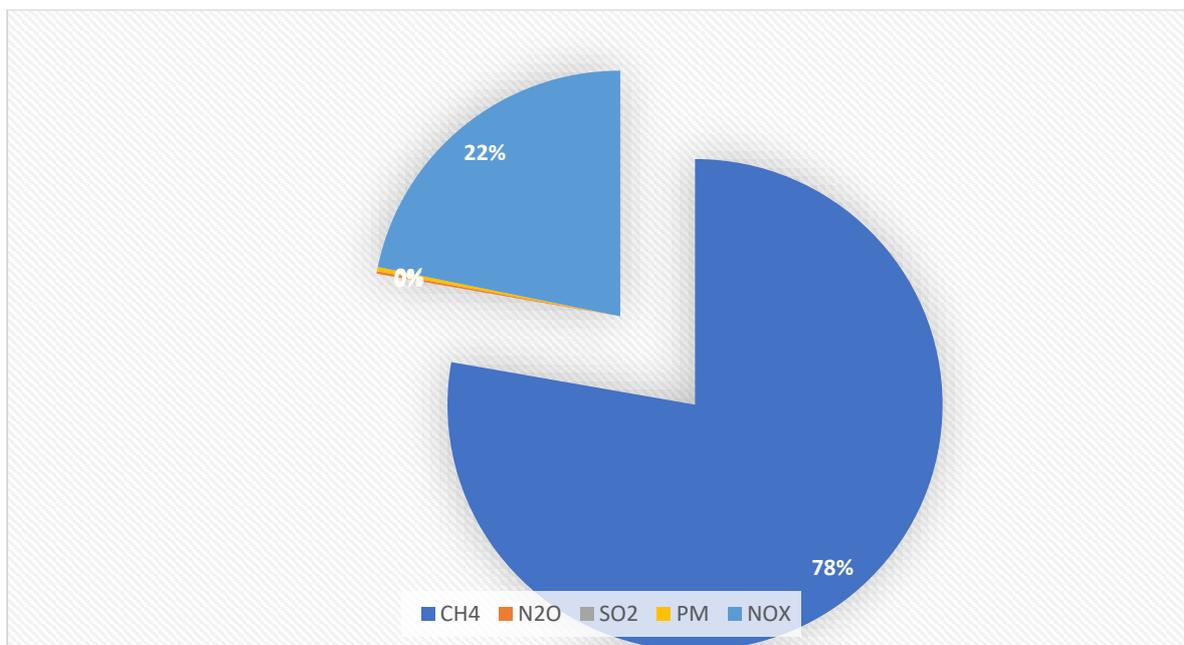


Figure 15 Emissions liées à la combustion de LNG hors CO2

Source propre travail

Force est de constater que l'émissions de NOx sont largement inférieures en proportions lorsque le moteur utilise du LNG. Cette part est seulement de 22% contrairement au 98% et 90% respectifs pour le MGO et le HFO.

Quant aux carburants traditionnels comme HFO ou MGO, le LNG est quant à lui un grand émetteur de méthane. Il représente près de 78% des émissions dans l'air comme le démontre la Figure 15. Pour le HFO il ne s'agit seulement que de 4% et 1% pour le MGO.

Le LNG ne contient pas de soufre contrairement aux deux autres fuels présentés dans cette étude. Nous savons déjà que la teneur en soufre est d'environ 0,1% pour MGO et 0,5% pour HFO.

5.3 Evaluation des impacts

5.3.1 Gaz à effet de serre

Parmi les émissions produites lors de la combustion de fuel, certaines ont un impact direct sur le réchauffement climatique. Nous pensons irrémédiablement au dioxyde de carbone (CO_2) mais néanmoins d'autres gaz ont un effet de serre comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O) (Bernstein et al., 2013; Viard et al., 2013).

Le dioxyde de carbone reste le gaz à effet de serre de référence, car un coefficient multiplicateur, le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) est utilisé pour multiplier la quantité émise d'un gaz afin de le convertir en équivalence de dioxyde de carbone. Par exemple, le méthane a un pouvoir de gaz à effet de serre 25 fois supérieur au dioxyde de carbone et protoxyde d'azote, 298 fois supérieur selon le 4^{ème} rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Bernstein et al., 2013)

Tableau 9 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de HFO

Source : *Propre travail à partir des données IMO et Winterhuur*

HFO	Facteur PRG	Emissions en g/heure	Équivalent Carbonne en kg/heure	kg/milles nautiques	Kg/km	Equivalent de CO_2 (en %)
CH_4	25,00	693,60	17,34	0,79	0,43	0,05
N_2O	298,00	1734,00	516,73	23,49	12,68	1,41
CO_2	1,00	35997840,00	35997,84	1636,27	883,51	98,54
TOTAL	-	-	36531,91	1660,54	896,62	100,00

Tableau 10 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de MGO

Source : *Propre travail à partir des données IMO et Winterhuur*

MGO	Facteur PRG	Emissions en g/heure	Équivalent Carbonne en kg/heure	kg/milles nautiques	Kg/km	Equivalent de CO ₂ (en %)
CH ₄	25,00	693,60	17,34	0,79	0,43	0,05
N ₂ O	298,00	1849,60	551,18	25,05	13,53	1,46
CO ₂	1,00	37061360,00	37061,36	1684,61	909,62	98,49
TOTAL	-	-	37629,88	1710,45	923,57	100,00

Tableau 11 Gaz à effet de serre émis lors de la combustion de LNG

Source : *Propre travail à partir des données IMO et Winterhuur*

LNG	Facteur PRG	Emissions en g/heure	Equivalent Carbonne en kg/heure	kg/milles nautiques	Kg/km	Equivalent de CO ₂ (en %)
CH ₄	25,00	450000,00	11250,00	511,36	276,11	31,00
N ₂ O	298,00	972,00	289,66	13,17	7,11	0,80
CO ₂	1,00	24750000,00	24750,00	1125,00	607,45	68,20
TOTAL	-	-	36289,66	1649,53	890,67	100,00

La conclusion de ces calculs est que le HFO émet moins de gaz à effet de serre que le MGO. Pour ces deux carburants respectifs, la part du dioxyde de carbone représente plus de 98% des émissions totales de gaz à effet de serre. On trouve un léger avantage pour le LNG en termes d'émissions de gaz à effet

de serre dont le de dioxyde de carbone qui représente que 68% des émissions totales.

Ce qui ternit le bilan du LNG ce sont les émissions de méthane (CH_4). Ce gaz à un potentiel de réchauffement global 25 fois supérieur au dioxyde de carbone sur une durée de 100 ans (Solomon et al., 2007). Il représente alors 31% des émissions de gaz à effet de serre lors de la combustion de LNG. On appelle cela le méthane slip. Il s'agit simplement d'un rejet direct de méthane dans l'atmosphère sans qu'il soit brûlé. Ce phénomène se produit essentiellement au cours des opérations de bunkering ou encore lors de la combustion du LNG. D'après Herdzyk, (2018), cet impact serait sous-estimé dans toutes les études publiées jusqu'à présent. Il serait important de limiter au plus vite ce problème. Cela permettrait d'apporter un réel avantage au LNG par rapport aux fuels conventionnels et d'en faire un réel carburant d'avenir (Hwang, Jeong, Jung, Kim, & Zhou, 2019).

5.3.2 NOx

Les NOx regroupent plusieurs espèces chimiques composés d'azote comme le dioxyde d'azote (NO_2) et le monoxyde d'azote (NO). La formation de NOx à lieu au cours de la réaction d'azote avec l'oxygène à haute température et haute température. Le fuel en général ne contient que peu d'azote mais réagit avec l'air qui est composé à près de 79% d'azote. On peut diminuer les émissions en diminuant la température de combustion en y injectant de l'eau distillé ou en utilisant un système de réduction catalytique sélective comme sur les véhicules (Chopra, 2019).

Les émissions sont régulées par les normes TIER I à III. (IMO, 2014). Cela concerne uniquement les motorisations des navires en fonction de leur année de construction. Ainsi, pour naviguer dans la zone NECA Nord-Américaine avec un navire construit après le 1er janvier 2016, il faut que sa propulsion soit conforme à la norme TIER III. Il en sera de même à partir de 2021 pour la zone NECA Nord Européenne. La norme TIER II s'applique aux navires construits après 2011 et ils doivent être en conformité pour continuer à naviguer sur les eaux du globe en dehors des zones spéciales. Entre les normes TIER I et TIER III, les émissions de NOx dans l'atmosphère ont été réduites d'environ 80% en 16 ans.

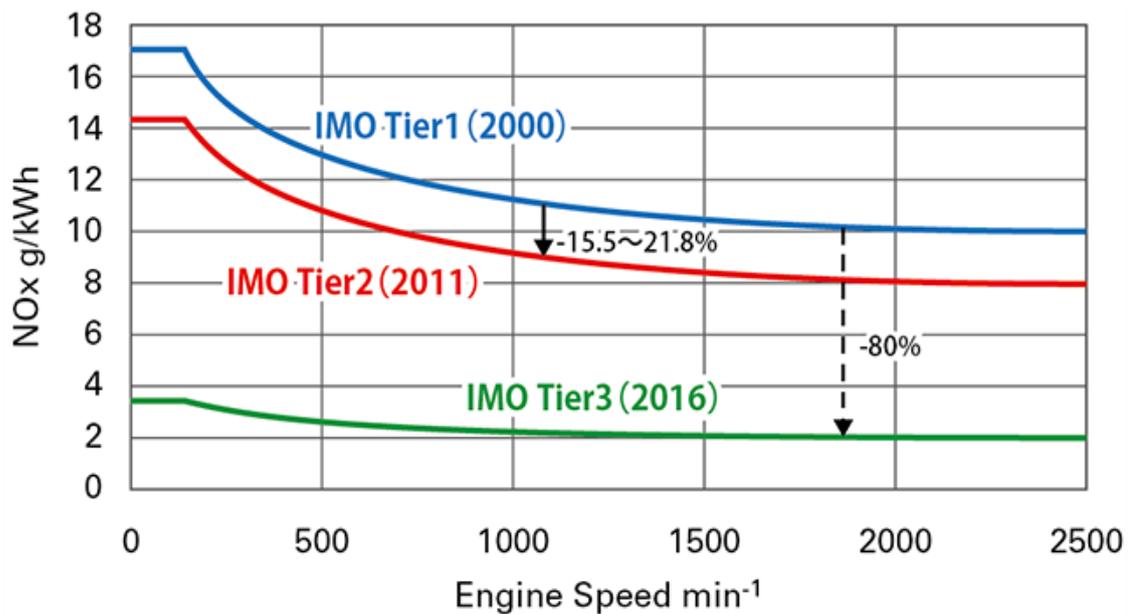


Figure 16 Evolution des émissions des NOx en fonction de la norme TIER

Source : Daihatsu diesel (2020))

Les NOx sont responsables de plusieurs impacts dont certains sont facilement observables au cours des pics de pollution en période hivernale : le smog. Ils sont également responsables des pluies acides ou encore d'impacts sévères

sur la santé humaine en provoquant des décès prématurés (Bernabeo & Raimondo, 2019).

Tableau 12 Emissions de NOx

Source : *Propre Travail à partir des données IMO et Winterhuur*

NOx	g/heures	g/KWh	g/milles nautiques	g/km
LNG	126000,00	1,97	5727,27	3092,48
HFO	953700,00	14,94	43350,00	23407,13
MGO	1013812,00	15,88	46082,36	24882,49

A 100% du régime, notre moteur tourne à la vitesse de 80 RPM. Les émissions de NOx sont conformes en mode LNG pour notre moteur à la norme TIER III car elles sont inférieures à 2g/KWh comme spécifié par le fabricant du moteur, Winterhuur. Si le moteur utilise du HFO il est bien en conformité avec la norme TIER II ce qui n'est pas le cas lorsque on utilise du MGO.

5.3.3 SOx

Les SOx émis lors de la combustion sont essentiellement liés à la teneur en soufre du carburant. Les facteurs d'émissions pris pour l'année 2030 incluaient donc la dernière mise à jour de Marpol qui limite à 0,5% de teneur en soufre en dehors des ECA, 0,1% pour les zones ECA. Ces facteurs assumaient que le HFO contenait donc 0,5% de soufre et le MGO 0,1%. Le LNG n'en contenant pas reste donc en net avantage sur ce point.

Dans cette partie, l'intérêt est donc de se focaliser sur l'évaluation des impacts des SOx. Ils sont principalement responsables de pluies acides, acidification de l'océan ou de problèmes de santé publique comme les maladies cardiaques ou respiratoires. Selon une étude norvégienne présentée au Maritime Environment Protection Council (MEPC) en 2016, si la teneur en soufre maximale n'avait pas été abaissée en 2020, il y'aurait eu près de 57 000 morts supplémentaires en raison de la pollution de l'air (IMO, 2020).



Figure 17 Cinq impacts positifs de la teneur limite du fuel des navires

Source : (IMO, 2020)

5.3.4 Particules en suspensions (PM)

Tableau 13 Emissions de particules en suspension

Source : *Propre Travail I à partir des données IMO et Winterhuur*

PM	g/heures	g/kwh	g/milles nautiques	g/km
LNG	1620,00	0,03	73,64	39,76
HFO	44506,00	0,70	2023,00	1092,33
MGO	11213,20	0,18	509,69	275,21

Les particules fines par la combustion ont un impact immédiat sur la santé humaine en favorisant le cancer ou l'asthme. Elles restent longtemps en suspension dans l'air en raison de leur faible taille. On fait la distinction entre les particules inférieures à 2.5 μm (Particules fines) et celles ayant une taille entre 2,5 et 10 μm (Kim, Kabir, & Kabir, 2015).

Le LNG reste encore le carburant qui a le moins d'émissions en termes de particules fines, suivie du MGO et enfin le HFO en dernière position. Plus le carburant est impur, plus grande la quantité de particules sera émise.

5.4 L'interprétation

La première conclusion est que le LNG est en effet beaucoup moins polluant que les autres carburants mais reste cependant un carburant d'origine fossile. Les émissions de NOx sont en effet largement inférieures par rapport au MGO ou HFO. Ces deux derniers sont à peu près équivalents mais avec un dépassement de la norme TIER II pour le MGO. Cela semble être peu probable et résulte d'une approximation ou erreur dans l'étude car bon nombre de navires

utilisent du MGO comme carburant principal et sont en conformité avec la norme TIER II. Chaque navire construit après 2011 doit avoir une propulsion conforme à TIER II.

Le résultat le plus surprenant concerne les gaz à effet de serre. Le dioxyde de carbone représente près de 98% des émissions de gaz à effet de serre pour le MGO et HFO. Ces deux fuels se valent sur ce point. C'est le LNG qui est intéressant à étudier car le dioxyde de carbone ne représente que 68% des émissions. Cependant, le méthane slip représente à lui seul 31% des gaz à effet de serre du LNG. Sans ce méthane slip, le LNG aurait un net avantage sur les autres carburants en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Avec cet effet, il est quasiment au même niveau que les deux autres fuels testés. Si on arrivait à diminuer de moitié le méthane slip, on aurait un réel avantage et le LNG deviendrait alors le vrai carburant du futur. Certaines solutions pour tenter de résoudre ce problème ont été présentées

Un net avantage apparaît sur l'aspect des particules en suspensions concernant le LNG ou encore le MGO. Le HFO a les plus mauvais résultats en émettrait des taux 30 fois supérieurs que le LNG. Le MGO émet 10 fois plus de particules que le LNG. Là encore, le LNG dispose d'un net avantage.

Dans le cadre des émissions de SOx, le LNG ne contient normalement aucune trace de soufre et est donc largement avantage par rapport au MGO et HFO.

Il existe de nombreuses incertitudes comme l'origine géographique du fuel qui n'a pas été prise en compte, son pouvoir calorifique précis ainsi que la quantité d'énergie utilisée pour le transporter, raffiner ou encore changer le changer de

l'état gazeux à l'état liquide. D'autres paramètres comme les conditions atmosphériques influencent également les données de consommation du moteur. Par facilité, seules les conditions ISO ont été retenues.

La conclusion de cette étude est que le LNG n'est pas le fuel miracle car il reste une énergie fossile avec de nombreux impacts négatifs sur l'environnement, notamment en émission de gaz à effet de serres. Cependant, en termes de santé publique, il dispose d'un net avantage en raison de la diminution notable d'émissions de NOx et de SOx.

6 Alternatives et comparaison

6.1 La comparaison des résultats obtenus

Dans cette partie, nous allons essentiellement nous baser sur une étude LCA réalisée par Bengtsson, Andersson, et Fridell (2011) qui traite de la comparaison de quatre carburants qui sont ou seront utilisés à bord des navires de la marine marchande. Il s'agit d'un LCA de type comparatif. Les auteurs se sont basés par rapport à l'Annexe VI MARPOL *Prévention de la pollution de l'air par les navires*, qui est la norme des seuils de pollution atmosphérique pour les navires marchands.

Dans le LCA comparatif, les carburants comparés étaient les suivants : le Fioul lourd ou HFO, MGO, le Gas to Liquid Fuel (GTL) et LNG.

L'unité fonctionnelle choisie a été le transport d'une tonne de cargaison avec un navire de type RORO sur une période de 10 ans allant de 2010 à 2020. La zone géographique qui a été sélectionnée correspondait à la zone ECA d'Europe du Nord. Le LCA s'est concentré en 2 phases : du puits au réservoir du navire, en incluant son transport, la procédure de raffinage ou transformation et sa livraison vers le navire et ensuite la seconde phase : du réservoir du navire son hélice qui assure la propulsion même du navire.

Les premières conclusions ont montré que le HFO reste le carburant avec le meilleur rendement pour la propulsion. Le LNG était le fioul qui avait le moins d'impact en termes de réchauffement climatique mais était relativement proche du HFO et du MGO. Les auteurs ont fait la différence entre du LNG provenant de la Mer du Nord ainsi que du Qatar. Évidemment la quantité d'énergie utilisée

pour le transport était plus faible pour le premier cas, car on choisit en quelque sorte, des matières premières locales.

Il apparaît que le LNG reste le carburant qui est le moins acidifiant pour l'atmosphère, le plus propre et permet de remplir aisément les normes imposées par les ECA et TIER III tout comme les autres alternatives proposées. Certaines incertitudes existent dans cette étude et sont par ailleurs soulignées par les auteurs, notamment sur le fait que les procédures de raffinages risquent de changer d'ici à 2020 pour être conforme à la limite maximale de 0,5 % de taux de soufre contenue dans le fioul pour être conforme avec l'annexe VI de Marpol.

La conclusion finale de ce LCA réalisé en 2011 est que l'usage du LNG à bord des navires marchands permet de diminuer l'impact sur le réchauffement climatique jusque 20% par rapport au même navire propulsé avec du HFO. Néanmoins, on assume ces résultats dans une situation parfaite, c'est à dire sans pertes de LNG.

En réalité, ces résultats sont à nuancer, car si on considère que durant tout le cycle de vie, on a une perte d'environ 2% de LNG composé pour l'essentiel de CH_4 l'impact sur le réchauffement climatique sera le même qu'avec du HFO. Il est avéré qu'il est strictement nécessaire de ne plus faire fonctionner les navires avec les anciennes alternatives tels que le HFO avec ou sans scrubber ou MGO pour lutter le plus efficacement contre le réchauffement climatique. Les résultats rejoignent donc en grande partie ceux publiés dans la partie 5. Sans méthane slip, le LNG serait le fuel idéal mais actuellement, avec ce problème, il dégage autant de gaz à effet de serre que les autres.

6.2 Solutions et technologies alternatives

6.2.1 Système de lavage des fumées : Le scrubber

Le scrubber est un système permettant de limiter les émissions polluantes dans l'air. D'après DNV GL, le nombre d'installations a été multiplié par presque 10 entre 2015 et 2019.

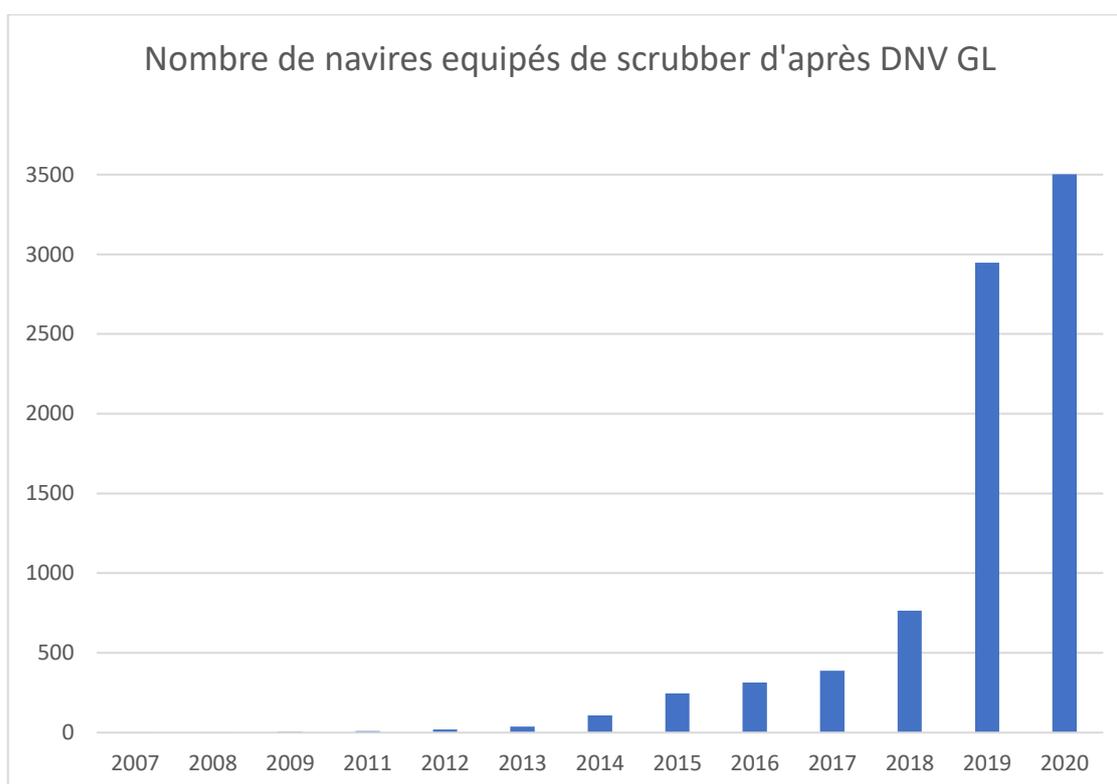


Figure 18 Nombre de navires marchands équipés d'un scrubber dans le monde

Source : *Propre Travail d'après les données DNV GL*

On trouve plusieurs facteurs à cette forte hausse au cours de ces dernières années : économiques et dans le but d'être en conformité avec l'annexe 6 marpol. Au 1^{er} janvier 2020, les carburants marins ne doivent pas contenir plus que 0,5% de teneur en soufre contre 3,5% auparavant en dehors des zones spéciales. Pour être en conformité, les navires ne peuvent utiliser que du

VLSFO de teneur maximale en soufre de 0.5% et plus cher. Il existe cependant une alternative légale qui consiste à équiper un navire avec un scrubber tout en continuant à utiliser du HFO, non désulfuré et à bas cout.

Il existe deux types de scrubber : un en circuit ouvert et l'autre en circuit fermé. Le circuit ouvert est le type le plus installé à bord et représenterait 72% des installations contre seulement 2% de circuit fermé. 22% des circuits ouverts auraient la possibilité d'être convertis en circuit fermé (Descamps, 2018). Le circuit fermé impose l'utilisation de produits chimiques, comme la soude caustique afin d'augmenter le pouvoir d'alcalinité de l'eau douce. Cela permet de limiter le fait que l'eau ne change pas de Ph trop rapidement et donc devienne acide.

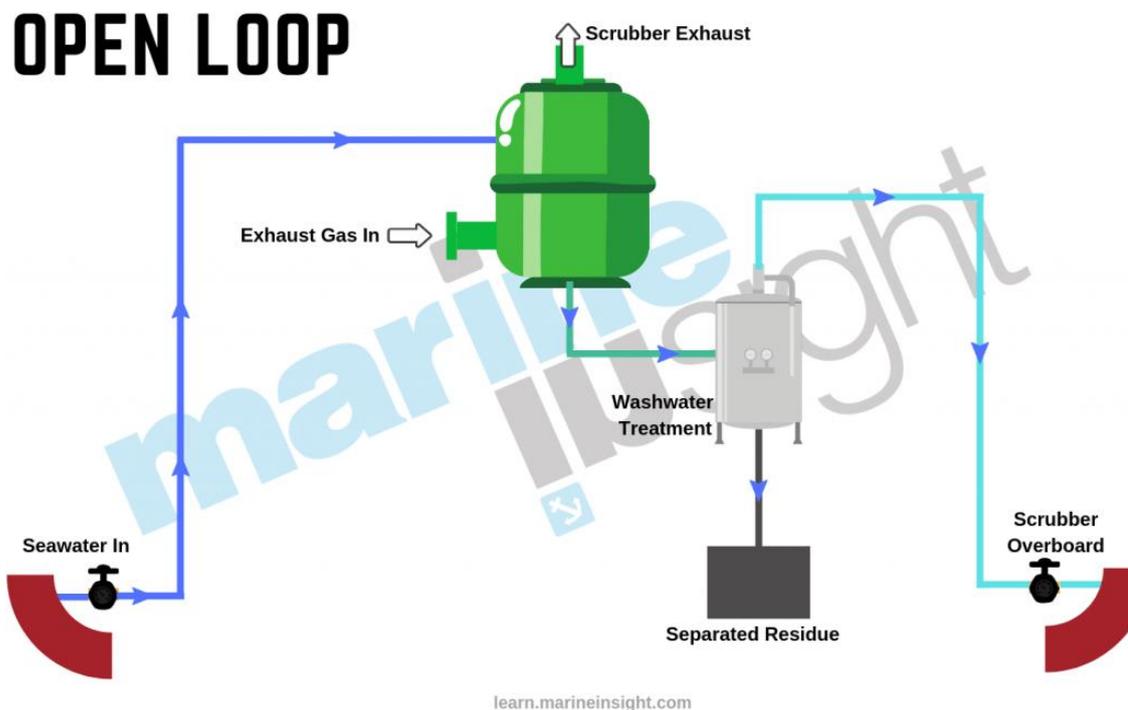
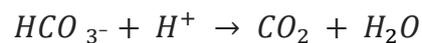
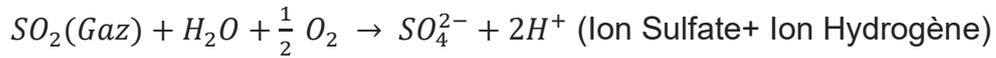


Figure 19 Schéma de principe du scrubber en circuit ouvert

Source : *Marine insight (Sethi, 2020).*

Etant donné qu'il représente la part la plus importante des scrubbers installés, nous allons nous uniquement nous concentrer sur le scrubber en circuit ouvert comme représenté dans la Figure 19. La réaction produite par ce système est la suivante (Sethi, 2020):



Malgré une limitation des émissions de soufre dans l'air, une partie est rejetée dans l'océan sous forme de sulfate. Cependant, on trouve des rejets d'autres encore plus polluants comme des métaux lourds dont le vanadium et le nickel. Ces rejets sont proportionnels à la teneur en soufre initiale du carburant. Ils sont alors déposés sur les couches de sédiments au fond (Lange, Markus, Helfst, & Mayer, 2015).

6.2.2 Le HVO

L'*hydrotreated vegetable oil* (HVO) est une alternative exploitée pour le remplacement des énergies fossiles. Il s'agit d'un biodiesel. Le HVO est constitué d'un mélange d'hydrocarbures paraffiniques, sans soufre ni hydrocarbures aromatiques (Aatola, Larmi, & Sarjovaara, 2008).

Elle est cependant peu choisie en raison de son coût plus important. De plus, les capacités de production et de stockage sont actuellement insuffisantes (DNV GL, 2019). On trouve pour le moment, un seul exemple d'utilisation, à titre expérimental par une compagnie de croisière norvégienne, Hurtigruten (Bioenergy International, 2019). Néanmoins, dans le futur, le HVO pourrait être intéressant s'il était combiné à un système de traitement des gaz

d'échappement pour être conformité avec les seuils maximums de particules fines et de NOx (Bohl, Smallbone, Tian, & Roskilly, 2018). Les émissions en dioxyde de carbone, responsable du réchauffement climatique seraient diminués jusque 90% par rapport au diesel traditionnel.

6.2.3 L'algocarburant

Les algocarburants sont des biocarburants de seconde génération composés essentiellement de lipides provenant des d'algues. La production à grande échelle est relativement facile et permettrait de réutiliser des eaux impropres à la consommation humaine pour leur culture (Beal et al., 2015). Après plusieurs processus de transformation, on peut obtenir un carburant. En raison de son faible cout économique et de son côté renouvelable, il présente un véritable intérêt pour être un candidat pour le carburant du futur (Adeniyi, Azimov, & Burluka, 2018).

Des essais ont été conduits par l'US Navy ainsi que Maersk pour l'utilisation d'algocarburants au début des années 2010. Actuellement, il s'agit des seuls essais sur des navires. En termes d'émissions de dioxyde de carbone, celle-ci seraient diminuées de près de 80% par rapport au HFO (SAFETY4SEA, 2012b).

En réalité, les coûts de transformation seraient plus élevés que prévus et semblent pour le moment très désavantageux par rapports aux autres solutions (Zaremba, 2019). D'autres études mettent également en doute ces réductions drastiques en terme d'émissions de dioxyde de carbone (Schlagermann, Göttlicher, Dillschneider, Rosello-Sastre, & Posten, 2012).

7 Conclusion

L'industrie maritime n'est pas sans conséquences anodines sur l'environnement ni la santé humaine. De nombreux efforts ont été fait ces dernières décennies comme l'instauration des règles Marpol ou encore l'interdiction des TBT dans l'antifouling. Elles n'interdisent pas toutes formes de pollution et de rejets mais cherchent seulement à les limiter. Il s'agit de compromis entre limiter les effets négatifs du trafic maritime et de garder des couts de transports qui ne soient pas exorbitants

La phase d'exploitation est vraiment la période la plus négative pour l'environnement, principalement en raison de la combustion de fuel. Selon le mode de propulsion choisi, ces impacts peuvent varier plus ou moins. Ainsi, un moteur diesel 2temps fonctionnant uniquement au HFO émettra bien plus de NOx qu'un navire équipé d'un moteur Dual Fuel utilisant du LNG.

Les résultats obtenus dans l'étude réalisée convergent avec ceux d'autres études publiées ces dernières années. Le MGO et le HFO émettent encore une quantité de NOx qui n'entrent pas dans le cadre de la Norme TIER III. Cependant, il semble y avoir une incohérence dans les calculs réalisés sur le fait que en utilisant du MGO, on n'entre pas non plus les critères de la norme TIER II. On est légèrement au-dessus du seuil limite. Cela semble surprenant car les facteurs d'émissions proviennent bien de l'IMO. Le LNG permet bien d'être en règle avec la norme TIER III.

Les émissions de particules en suspensions sont beaucoup plus faibles lorsque le fuel est de meilleure qualité. Ainsi on retrouve le LNG suivi du MGO et enfin du HFO.

Le réel point négatif du LNG concerne les émissions de gaz à effet de serre. Certes les émissions de CO₂ sont les plus faibles mais principalement en raison du méthane slip, on arrive au même niveau d'émissions que les autres fuels. De plus, il est nécessaire de le liquéfier pour pouvoir le stocker ce qui représente une quantité d'énergie bien plus importante que les autres carburants.

Le LNG n'est qu'un carburant transitoire entre les fuels classiques et les bio fuels comme le HVO qui semble relativement prometteur mais qui n'en est qu'à ses débuts. La baisse récente des tarifs du pétrole liés en partie à la crise du Covid 19 risquent de retarder l'introduction en masse du HVO car d'un point de vue économique, les fuels conventionnels sont actuellement plus compétitifs. Les Algocarburants n'ont pas été utilisés à grande échelle et présentent des aspects qui les rendent plus compliqués à produire que prévu initialement.

8 Bibliographie

- Aatola, H., Larmi, M., & Sarjovaara, T. (2008). Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel : Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. *SAE International Journal of Engines*, 1. doi:10.4271/2008-01-2500
- Adeniyi, O. M., Azimov, U., & Burluka, A. (2018). Algae biofuel : Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 316-335. doi:10.1016/j.rser.2018.03.067
- Alzieu, C. (2000). Environmental impact of TBT : The French experience. *Science of The Total Environment*, 258(1-2), 99-102. doi:10.1016/S0048-9697(00)00510-6
- Arai, T., Harino, H., Ohji, M., & Langston, W. J. (Éd.). (2009). *Ecotoxicology of antifouling biocides* (1. Aufl.). Tokyo 102-0073: Springer Japan KK.
- Attah, E., & Bucknall, R. (2015). An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI. *Ocean Engineering*, 110. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.09.040
- Badino, A., Borelli, D., Gaggero, T., Rizzuto, E., & Schenone, C. (2012). Noise Emitted from Ships : Impact Inside and Outside the Vessels. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 48, 868-879. doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.1064
- Barnett. (2010). *Life Cycle Assessment (LCA) of Liquefied Natural Gas (LNG) and its environmental impact as a low carbon energy source*. (University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying).
- Beal, C. M., Gerber, L. N., Sills, D. L., Huntley, M. E., Machesky, S. C., Walsh, M. J., Tester, J. W., et al. (2015). Algal biofuel production for fuels and feed in a 100-ha facility : A comprehensive techno-economic analysis and life cycle

- assessment. *Algal Research*, 10, 266-279. doi:10.1016/j.algal.2015.04.017
- Bengtsson, S., Andersson, K., & Fridell, E. (2011). A comparative life cycle assessment of marine fuels: liquefied natural gas and three other fossil fuels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225(2), 97-110. doi:10.1177/1475090211402136
- Bernabeo, & Raimondo. (2019). Health and Environmental Impacts of Nox : An Ultra-Low Level of Nox (Oxides of Nitrogen) Achievable with A New Technology. *Global Journal of Engineering Sciences*, 2(3). doi:10.33552/GJES.2019.02.000540
- Bernstein, L., Pachauri, R. K., Reisinger, A., Bernstein, L., Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Équipe de rédaction principale, & Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). *Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse : un rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Consulté à l'adresse http://books.scholarsportal.info/viewdoc.html?id=/ebooks/ebooks0/gibson_cpp/c/2014-01-22/1/10785011
- Bioenergy International. (2019, 2 novembre). Hurtigruten tests marine HVO that could enable shipping to reduce emissions. Consulté à l'adresse <https://bioenergyinternational.com/storage-logistics/hurtigruten-tests-marine-hvo-that-potentially-could-change-the-shipping-industry>
- Bohl, T., Smallbone, A., Tian, G., & Roskilly, A. P. (2018). Particulate number and NO trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications. *Fuel*, 215, 90-101. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.023
- Boustead, I. (1996). LCA — how it came about: The beginning in the U.K. *The*

International Journal of Life Cycle Assessment, 1(3), 147-150.

Doi:10.1007/BF02978943

BP. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*.

Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels : Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol.

Journal of Cleaner Production, 74, 86-95. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.052

Chopra, K. (2019, 20 octobre). 10 Technologies/Methods for Controlling NOx & SOx Emissions from Ships. Consulté à l'adresse

<https://www.marineinsight.com/tech/10-technologiesmethods-for-controlling-nox-sox-emissions-from-ships/>

Ciambrone, D. F. (1997). *Environmental life cycle analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers.

Confuorto, N. (2020, 16 mai). Scrubbing Systems & Using HFO as a fuel. Consulté à l'adresse https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

https://safety4sea.com/scrubbing-systems-using-hfo-as-a-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=bbb9ee6dfef227987b6952dca374a64b1b149604-1590657836-0-Afje2cruD8jXqagNV-9-cfxMBfwXewKu66BLVs2tdNhrItWZ11Xj-UkrBEnB8SwWAN3Us4VftmwBRxYp6u9-kaA_d4ihzJVrp3GLcbJVwG5hhodcQHd4JgujSJF9mLyHcEqRmFvLRjhr40qUpnK5WIUeMw8kfrJf-vx-4QKyEHq3tLGxwni0cHIU_BZLOI_UuTEMI3OH3c-HXjqZDQkI5bH3oKalv1VFRDARXXpS30j4geh8fL-j3eAU1n4sbQpQKLpOjvxz6TMHCSjSDVEKEIVLKSeF_hi5Fdf07wbYUH-rnYx9pARGfr6EkfWq1m5xv1E7FbQhh7zFaspV9zW2lo

Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2008). Emissions Tradeoffs among Alternative

Marine Fuels : Total Fuel Cycle Analysis of Residual Oil, Marine Gas Oil, and

Marine Diesel Oil. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4),

538-542. doi:10.3155/1047-3289.58.4.538

Daihatsu diesel. (2020). Nitrogen Oxides (NOx) Regulations. Consulté à l'adresse <http://www.dhtd.co.jp/en/products/marine/nox.html>

Descamps, A. (2018, 16 octobre). Soufre 2020 : Scrubbers, condamnés à court terme mais plébiscités. *Le journal de la Marine Marchande*. Consulté à l'adresse <http://www.journalmarinemarchande.eu/actualite/shipping/scrubbers-condamnes-a-court-terme-mais-plebiscites>

DNV GL. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. Consulté à l'adresse https://sea-Ing.org/wp-content/uploads/2019/09/19-09-16_Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report.pdf

Evans, S. M., Leksono, T., & McKinnell, P. D. (1995). Tributyltin pollution : A diminishing problem following legislation limiting the use of TBT-based anti-fouling paints. *Marine Pollution Bulletin*, 30(1), 14-21. doi:10.1016/0025-326X(94)00181-8

Faroon, O., & Ruiz, P. (2016). Polychlorinated biphenyls : New evidence from the last decade. *Toxicology and Industrial Health*, 32(11), 1825-1847. doi:10.1177/0748233715587849

FIRST MARINE GAS TURBINE IN SERVICE. (2009). *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 60(1), 66-86. doi:10.1111/j.1559-3584.1948.tb02754.x

Freidig, A. P., Verhaar, H. J. M., & Hermens, J. L. M. (1999). Comparing the Potency of Chemicals with Multiple Modes of Action in Aquatic Toxicology : Acute Toxicity Due to Narcosis versus Reactive Toxicity of Acrylic Compounds. *Environmental Science & Technology*, 33(17), 3038-3043. doi:10.1021/es990251b

- GE Aviation. (2017). Two 30 MW GE Gas Turbines Propel Queen Mary 2, the World's Largest Transatlantic Liner. Consulté à l'adresse <https://www.geaviation.com/sites/default/files/30mw-queen-mary-case-history.pdf>
- Hellenic Shipping News Worldwide. (2020, 14 février). VLSFO: Better Quality But Watch For Critical Parameters. Consulté à l'adresse <https://www.hellenicshippingnews.com/vlsfo-better-quality-but-watch-for-critical-parameters/>
- Herdzik, J. (2018). Methane Slip During Cargo Operations on LNG Carriers and LNG-Fueled Vessels. *New Trends in Production Engineering*, 1(1), 293-299. doi:10.2478/ntpe-2018-0036
- Hönig, V., Prochazka, P., Obergruber, M., Smutka, L., & Kučerová, V. (2019). Economic and Technological Analysis of Commercial LNG Production in the EU. *Energies*, 12(8), 1565. doi:10.3390/en12081565
- Hua, J., Cheng, C.-W., & Hwang, D.-S. (2019). Total life cycle emissions of post-Panamax containerships powered by conventional fuel or natural gas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(2), 131-144. doi:10.1080/10962247.2018.1505675
- Huan, T., Hongjun, F., Wei, L., & Guoqiang, Z. (2019). Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers. In A. Serpi & M. Porru (Éd.), *Propulsion Systems*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.82154
- Hunt, R. G., Franklin, W. E., & Hunt, R. G. (1996). LCA — How it came about: — Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 4-7. doi:10.1007/BF02978624

Hwang, Jeong, Jung, Kim, & Zhou. (2019). Life Cycle Assessment of LNG Fueled Vessel in Domestic Services. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 359. doi:10.3390/jmse7100359

Il était une fois l'ISO. (s. d.). Consulté le 28 février 2019, à l'adresse <https://www.iso.org/fr/the-iso-story.html#0>

ILO. (2006). Convention du travail maritime.

IMO. (2001). Convention internationale sur le contrôle des systèmes antisalissure nuisibles sur les navires. Consulté le 24 mars 2020, à l'adresse [http://www.imo.org/fr/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-\(AFS\).aspx](http://www.imo.org/fr/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-(AFS).aspx)

IMO. (2015). *Third IMO GHG Study 2014 Executive Summary and Final Report*.

IMO. (2020). « OMI 2020 » : Réduction des émissions d'oxydes de soufre des navires. Consulté le à l'adresse <http://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>

International Maritime Organization. (2017). *MARPOL Annex VI and NTC 2008 : With guidelines for implementation*. IMO publication (Fourth edition, 2017 edition.). London: IMO International Maritime Organization.

ISEMAR. (2018 novembre). Les émissions du transport maritime : Questions économiques et technologiques. Consulté à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Note-de-synth%C3%A8se-ISEMAR-%C3%A9missions-du-transport-maritime-questions-%C3%A9conomiques-et-technologiques.pdf>

ISO 14000 Management environnemental. (s. d.). Consulté le 28 février 2019, à l'adresse <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>

- ITOPF. (2019). Oil Tanker Spill Statistics 2019. Consulté le à l'adresse
<https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- Jashuah. (2012) "Crude Oil Prices from 1861 to 2011 (1861-1944 WTI, 1945-1983 Arabian Light, 1984-2011 Brent) (Yearly Average in US Dollars per Barrel)," à l'adresse
https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Crude_oil_prices_since_1861.png.
- Johnsen, T., & Fet, A. (1998). *Screening Life Cycle Assessment of M/V Color Festival*. Aalesund College, DNV.
- Joint Research Centre (European Commission). (2016). Guide for interpreting life cycle assessment result. EU publications.
- Jolliet, O., Saadé-Sbeih, M., Crettaz, P., Jolliet-Gavin, N., Shaked, S., Soucy, G., & Houillon, G. (2017). *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*.
- Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143.
doi:10.1016/j.envint.2014.10.005
- Kingston, P. F. (2002). Long-term Environmental Impact of Oil Spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(1-2), 53-61. doi:10.1016/S1353-2561(02)00051-8
- La France poursuit son action en faveur d'une zone ECA en Méditerranée. (2019, 18 janvier). *Mer et Marine*. Consulté le 5 mai 2019, à l'adresse
<https://www.meretmarine.com/fr/content/la-france-poursuit-son-action-en-faveur-dune-zone-eca-en-mediterranee>
- Lange, B., Markus, T., Helfst, L., & Mayer, D. (2015). *Impacts of Scrubbers on the environmental situation in ports and coastal waters*.
- Lataire, E. (2019). *Propulsion (Part II)*.

- Laubier, L. (2004). La marée noire de l'Erika : conséquences écologiques et écotoxicologiques. Bilan d'un programme de recherche. *Natures Sciences Sociétés*, 12(2), 216-220. EDP Sciences.
- LCA framework (ISO 14040, 2006). | Download Scientific Diagram. (s. d.). Consulté le 28 février 2019, à l'adresse https://www.researchgate.net/figure/LCA-framework-ISO-14040-2006_fig1_320183756
- Le Journal de la Marine Marchande. (2019, 16 mai). Un autre pays adhère à la Convention de Hong Kong. Consulté à l'adresse <http://www.journalmarinemarchande.eu/filinfo/un-autre-pays-adhere-a-la-convention-de-hong-kong>
- Ling-Chin, J., & Roskilly, A. P. (2016). A comparative life cycle assessment of marine power systems. *Energy Conversion and Management*, 127, 477-493.
doi:10.1016/j.enconman.2016.09.012
- MAIB. (2019). *Report on the investigation of the contact and grounding of the ro-ro passenger ferry Pride of Kent Calais, France 10 December 2017.*
- Meadows, D. H., & Club of Rome (Éd.). (1972). *The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.* New York: Universe Books.
- Mobley, R. K. (Éd.). (2001). *Plant engineer's handbook.* Boston: Butterworth-Heinemann.
- NGO Shipbreaking Platform. (2017). *NGO Shipbreaking Platform Annual Report 2017.* NGO. Consulté à l'adresse <https://www.shipbreakingplatform.org/wp-content/uploads/2018/07/Annual-Report-2017-Final-Spreads.pdf>
- NGO Shipbreaking Platform. (2019). Accueil. Consulté le à l'adresse <https://www.shipbreakingplatform.org/>

Organisation des déchets municipaux Comment évaluer les impacts

environnementaux au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie (LCA). (2005

février). ADEME. Consulté à l'adresse

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/25165_acv_impacts.pdf

Piatt, J. F., Lensink, C. J., Butler, W., & Nysewander, D. R. (1990). Immediate Impact

of the « Exxon Valdez » Oil Spill on Marine Birds. *The Auk*, 107(2), 387-397.

doi:10.2307/4087623

Reduce: The Coca-Cola Company. (2018). Consulté le 21 février 2019, à l'adresse

<https://www.coca-colacompany.com/stories/reduce>

Ross, D. (1987). *Mechanics of underwater noise*. Los Altos, Calif.: Peninsula.

SAFETY4SEA. (2012a, 7 novembre). Ships' Garbage Management under Revised

MARPOL Annex V. Consulté à l'adresse <https://safety4sea.com/ships-garbage-management-under-revised-marpol-annex-v/>

SAFETY4SEA. (2012b, 27 janvier). Cargo boat and US navy ship powered by algal

oil in marine fuel trials. Consulté à l'adresse <https://safety4sea.com/cargo-boat-and-us-navy-ship-powered-by-algal-oil-in-marine-fuel-trials/>

Schlagermann, P., Göttlicher, G., Dillschneider, R., Rosello-Sastre, R., & Posten, C.

(2012). Composition of Algal Oil and Its Potential as Biofuel. *Journal of Combustion*, 2012, 1-14. doi:10.1155/2012/285185

Schultz, M. P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance

and powering. *Biofouling*, 23(5), 331-341. doi:10.1080/08927010701461974

SETAC 1993 LCA framework | Download Scientific Diagram. (s. d.). Consulté le 28

février 2019, à l'adresse https://www.researchgate.net/figure/SETAC-1993-LCA-framework_fig4_296839700

Sethi, S. (2020, 17 mars). A Guide To Scrubber System On Ship. Consulté le à l'adresse <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

Shama, M. A. (2005, October). Life cycle assessment of ships. In *Maritime transportation and exploitation of ocean and coastal resources: Proceedings of the 11th international congress of the international maritime association of the mediterranean* (pp. 1751-1758)

Ship and Bunker. (2020). Average Bunker Prices. Consulté le à l'adresse <https://shipandbunker.com/prices/av>

Soares, C. G., & MARTECH. (2014). *Maritime technology and engineering : Proceedings of MARTECH 2014, 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering, Lisbon, Portugal, 15-17 October 2014.*

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Avery, K., M.Tignor, et al. (2007). Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Vol. 1).

Still, K. R., Arfsten, D. P., Jederberg, W. W., Kane, L. V., & Larcom, B. J. (2003). Estimation of the Health Risks Associated with Polychlorinated Biphenyl (PCB) Concentrations Found Onboard Older U.S. Navy Vessels. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18(10), 737-758.
doi:10.1080/10473220301444

the Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka-1000, Bangladesh, Rahman, A., Karim, Md. M., & the Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka-1000, Bangladesh. (2015). Green Shipbuilding and Recycling : Issues and Challenges. *International Journal of Environmental Science and*

Development, 6(11), 838-842. doi:10.7763/IJESD.2015.V6.709

The Maritime Executive. (2019). TSHD Samuel de Champlain : A First LNG Vessel for France. Consulté à l'adresse <https://www.maritime-executive.com/corporate/tshd-samuel-de-champlain-a-first-lng-vessel-for-france>

TMO REGIONS. (2015). *Observatoire des ports de plaisance Résultats de l'enquête « Dragage »*. Mission de la navigation de plaisance et des loisirs nautiques.

Viard, A., Hénault, C., Rochette, P., Kuikman, P., Flénet, F., & Cellier, P. (2013). Le protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles : Méthodes d'inventaire et leviers de réduction. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 20(2), 108-118. doi:10.1051/ocl.2013.0501

Wärtsilä. (2020). Combustion Engine vs Gas Turbine : Advantages of Modularity. Consulté le à l'adresse <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-advantages-of-modularity>

Weaver, C. S., & Turner, S. H. (1994). Dual Fuel Natural Gas/Diesel Engines : Technology, Performance, and Emissions (p. 940548). Présenté à International Congress & Exposition. doi:10.4271/940548

Zaremba, H. (2019, 2 août). Is Algal Biofuel A Lost Cause? Consulté à l'adresse <https://oilprice.com/Alternative-Energy/Biofuels/Is-Algal-Biofuel-A-Lost-Cause.html>