



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN
FACULTE DE MECANIQUE NAVALE

Les Propulsions des super-yachts de demain pour un futur durable

Marc MAGI

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

Promoteur : Tim Cools

Année académique : 2020 -2021

Avant-propos

À travers ce mémoire, je souhaite étudier un sujet qui me tient particulièrement à cœur, la protection et la préservation de nos eaux et territoires maritimes. Le monde du yachting, qui m'a toujours attiré, associé à cette question est un sujet qui s'inscrit dans l'air du temps. De plus, cette réflexion nous permettra à tous de profiter encore longtemps de ces lieux idylliques en rêvant, un jour, d'y naviguer sur ces embarcations d'exception.

Je tiens à remercier mon promoteur de mémoire, Tim Cools pour sa disponibilité, son aide et ses conseils avisés, qui m'ont orientés et éclairés durant le processus de réflexion de ce mémoire et mon parcours scolaire à la HZS.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à m'aider dans la réflexion, la relecture, et qui ont su me rassurer lors de moments de doutes.

Merci à mes parents, mon frère et ma sœur pour leur soutien et leur amour inconditionnel lors de ces 4 années passées loin d'eux.

Merci à Ange pour son soutien psychologique,

Et surtout, merci à Chloé, sans qui ces études n'auraient peut-être pas abouti, pour son amour, sa patience et son appui son faille.

Je vous invite à embarquer dans mes réflexions et vous souhaite une bonne lecture,

Résumé

Dans un contexte de réglementations environnementales et de prise de conscience internationale autour des questions écologiques, l'industrie maritime doit également faire face à des restrictions et changer son fonctionnement. Le monde du yachting, et plus précisément les super-yachts sont aussi touchés. Pour entamer leur évolution vers des comportements plus verts, les innovations se concentrent autour de la propulsion. Face aux nombreuses possibilités qui s'offrent aux constructeurs pour utiliser des énergies plus vertes, ce mémoire a pour but de les comparer et les analyser afin de conclure sur les types de propulsion les plus efficaces et adaptés au monde du yachting pour un avenir durable.

Abstract

In a context of environmental regulations and international awareness about ecological issues, the maritime industry is facing more and more restrictions and must change its behavior. The yachting industry, and particularly super yachts are also affected by these changes. To begin their sustainable transition, most solutions focus on innovative propulsion technologies. Through all the possibilities to integrate green energies and eco-friendly innovations, this thesis gathers information on their feasibility and efficiency. It concludes on the most adapted solutions for Superyachts to be more sustainable and future proof.

Table des matières

TABLE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABREVIATIONS	XI
LEXIQUE	XIII
INTRODUCTION	1
1 PARTIE 1 : LES SUPER-YACHTS D'AUJOURD'HUI	7
1.1 <i>SUPER-YACHT ET ECOLOGIE, ANTINOMIQUES ?</i>	7
1.1.1 <i>Le marché des super-yachts</i>	7
1.1.2 <i>La surconsommation comme maître-mot</i>	9
1.1.3 <i>Le green yachting, nouveau luxe ?</i>	9
1.1.4 <i>Entre régulations et incitations, vers un avenir plus vert</i>	10
1.2 FONCTIONNEMENT ACTUEL ET AMELIORATION DU MOTEUR DIESEL	12
1.2.1 <i>Origine de la pollution des super-yachts</i>	12
1.2.2 <i>Les systèmes de réduction d'émissions des moteurs diesel</i>	14
2 PARTIE 2 : VERS DES CARBURANTS MOINS POLLUANTS	18
2.1 CARBURANTS AVEC CARBONE	18
2.1.1 <i>Liquefied Natural Gas</i>	18
2.1.2 <i>Méthanol (MeOH)</i>	21
2.2 CARBURANTS SANS CARBONE	22
2.2.1 <i>Hydrogène (H₂)</i>	22
2.2.2 <i>Ammoniac (NH₃)</i>	25
3 PARTIE 3 : COMMENT MODIFIER LA PROPULSION DES SUPER-YACHTS POUR QU'ELLE SOIT PLUS DURABLE ?	29
3.1 LES CONFIGURATIONS DE LA PROPULSION	30
3.1.1 <i>Diesel ou configuration classique</i>	30
3.1.2 <i>Diesel électrique ou électrique</i>	30
3.1.3 <i>Hybride</i>	32
3.2 LES UNITES DE PRODUCTION D'ENERGIE DURABLES	35
3.2.1 <i>Fuel cells</i>	36
3.2.2 <i>Systèmes de stockage de l'énergie</i>	37
3.2.3 <i>Énergie solaire</i>	38
3.2.4 <i>Énergie éolienne</i>	39

4	CONCLUSION.....	42
5	BIBLIOGRAPHIE	45

Table des figures

Figure 1 Mega-yacht Flying Fox.....	8
Figure 2 Emission Controlled Areas	11
Figure 3 Profil opérationnel d'un yacht	14
Figure 4 Réaction chimique dans un SCR.....	15
Figure 5 Méga-yacht NORD dans le port d'Ajaccio	16
Figure 6 Projet yacht citerne LNG	20
Figure 7 Concept Aqua propulsé à l'hydrogène	25
Figure 8 Processus Haber Bosch.....	26
Figure 9 Configuration diesel classique	30
Figure 10 Configuration diesel électrique	31
Figure 11 Mega-yacht Luminosity	31
Figure 12 Installation hybride par MTU	34
Figure 13 Fonctionnement de la pile à combustible.....	36
Figure 14 Projet ICE assisté par kite	39
Figure 15 Schéma récapitulatif de combinaisons durables	41

Liste des abréviations

OMI	Organisation Maritime International
ECA	Emission Control Areas
UE	Union Européenne
TCO	Total Cost of Ownership
UHNW	Ultra-High Net Worth
EEDI	Energy Efficiency Design Index
GT	Gross Tonnage
IAPC	International Air Pollution Certificate
PMS	Point Mort Supérieur
LEL	Lower Explosive Limit
UEL	Upper Explosive Limit
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
SO _x	Oxyde de soufre
NO _x	Oxyde d'azote

CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂ O	Molécule d'eau
PM	Particulate Matter
NH ₃	Nitruire d'Hydrogène – Ammoniac
N ₂	Diazote
ICE	Internal Combustion Engine (moteur à combustion interne)
MDO	Marine Diesel Oil

Lexique

Super-yacht : yacht de plus de 24 mètres de long

Méga-yacht : yacht de plus de 70 mètres de long

ECA : Emission Control Areas : zones maritimes établies par l'IMO dans lesquelles les contrôles des émissions de NO_x et SO_x sont plus stricts.

Eco-friendly : terme anglais utilisé pour désigner les produits respectueux de l'environnement.

Anti-fouling : peinture contenant des biocides destinée à empêcher les organismes aquatiques de se fixer sur la coque des navires.

Fuel cell : Pile à combustible qui utilise l'énergie chimique de l'hydrogène ou d'autre combustibles pour produire de l'électricité propre et efficace.

Flashpoint : température à laquelle un composé organique particulier dégage suffisamment de vapeur pour s'enflammer dans l'air.

Boil-off : évaporation naturelle des gaz dans la citerne provoquée par l'admission de chaleur extérieure.

Motor-yacht : yacht équipé par un mode de propulsion à hélice.

Introduction

Quel type de propulsion devront adopter les super-yachts de demain pour s'adapter aux réglementations environnementales tout en restant performants ?

Contexte et enjeux

Dans un contexte de réglementations environnementales et de prise de conscience internationale autour des questions écologiques, tous les secteurs sont touchés et doivent changer leurs comportements. L'accord de Paris prévoit de contenir l'augmentation de la température en dessous de 2°C par rapport aux prévisions (Europa 2016), quand l'UE vise une neutralité de ses émissions de gaz d'ici 2050 (Europa 2016a). L'industrie maritime, qui représente 3,15% des émissions de gaz à effet de serre en Europe (Europa 2019) est depuis 1973 régulée par la convention MARPOL. Cette dernière, à travers son annexe VI, limite les émissions dans l'air de polluants contenus dans les gaz d'échappement dont l'oxyde de soufre (SO_x) et l'oxyde nitreux (NO_x) avec d'autant plus de restrictions dans certaines zones (*ECA*) (IMO s. d.)

Ces réglementations touchent tous les secteurs de l'industrie maritime et notamment le yachting, qui tombe sous le coup de ces restrictions de par la taille de ses navires et l'activité de charter. Cette dernière, en plein essor, représente un marché de \$ 6.5 milliards en 2019 et devrait subir une croissance annuelle de 5,2% jusqu'en 2027 (Grand View Research 2020). Qu'ils soient en charter ou privé, les yachts et les *super-yachts*, nommés comme tels à partir d'une longueur de 24 mètres, sont un désastre écologique aussi bien dans leur construction que dans leur fonctionnement. Le nombre de *super-yachts* dans le monde est de 4 476 en 2016, avec une surreprésentation des navires à moteur, qui par définition sont plus polluants, pour 84% de la flotte par rapport aux voiliers (Camper & Nicholsons, Wealth-X 2016). Une flotte qui ne

cesse de croître, la valeur du marché devrait atteindre \$10,2 milliards d'ici 2025 à un taux de 7,8% par an (Allied Market Research 2019). Le yachting est une menace pour notre environnement, et malgré son caractère exclusif, ce marché de niche en pleine croissance se développe rapidement, tout comme les risques qui lui sont liés.

De toutes les parties prenantes de ce marché, les consommateurs sont au cœur des préoccupations des constructeurs. Les *super-yachts* étant destinés aux plus riches, ils ne seraient que 200 000 dans le monde à pouvoir s'offrir un tel luxe (Gadd, 2015a). Pourtant, leurs demandes sont essentielles pour instaurer un changement. Bien que certains super riches restent déconnectés de la réalité de la crise écologique (Kenner 2015), la majeure partie des propriétaires de yachts se soucient de l'impact environnemental lors de l'achat d'un yacht (Wagner, 2019). Que leur démarche soit sincère ou non, ces consommateurs profitent de la nature et de la mer, et souhaitent donc les préserver ne serait-ce que pour pérenniser leurs activités. Une tendance qui, ajoutée aux nouvelles normes, pousse les constructeurs et ingénieurs à repenser les futures réalisations vers des systèmes de propulsion plus efficaces comme l'hybride, des techniques de construction sans gaspillage comme l'impression 3D, ou une recherche de matériaux nouveaux comme le faux cuir ou le carbone.

En effet, toutes les périodes de la vie d'un yacht sont à étudier lorsque l'on parle de son impact écologique : du design à l'approvisionnement des matériaux, en passant par sa construction. Dans sa phase opérationnelle, le yacht contamine les océans avec ses eaux usées, ses déchets ou encore son *anti-fouling*. Ce qui nous intéresse particulièrement est son effet sur l'air de par son empreinte carbone. À titre d'exemple, selon Lynch, Long, et Stretesky (2019), un yacht de 71 mètres utiliserait 3300 tonnes d'essence par an et près de 1000 tonnes d'émissions de CO₂. Une estimation qui, pour la flotte mondiale de *super-yachts*, a un impact écologique aussi élevé que certaines nations. C'est sur cette pollution de l'air que se rejoignent les réglementations de l'annexe VI de MARPOL et la nécessité de trouver des systèmes de propulsion et d'opération qui n'émettent plus de substances toxiques. Dans une logique de toujours repousser les limites du design et du luxe qui caractérise le marché, il est aussi nécessaire pour les constructeurs de repenser le yacht de demain et de limiter ses conséquences désastreuses sur notre planète.

Dans la ligne de mire des ingénieurs et chercheurs, les recherches s'orientent notamment vers des propulsions plus efficaces. Face au moteur diesel largement utilisé dans l'industrie, les innovations se multiplient pour le faire évoluer comme pour le remplacer. Pour faire face aux réglementations, deux types de solutions sont envisagés : l'utilisation de systèmes de contrôle des gaz d'échappement ou la recherche de nouveaux carburants (Thomson, Corbett, & Winebrake, 2015). Ainsi, les possibilités sont multiples, lorsque certains moteurs diesel innovants peuvent limiter les émissions de près de 30% (Volvo Penta s. d.), d'autres ajoutent des systèmes de contrôle comme le SCR qui élimine les oxydes d'azote (Greenchem, 2017). Mais pour aller plus loin et atteindre les objectifs de réduction d'émissions, les énergies renouvelables semblent être la solution. L'utilisation d'une seule source d'énergie propre ne pourrait pas être envisagée à moyen terme face à la structure du navire et son mode de fonctionnement (Yuan, Wang, Yan, Shen, & Long, 2020). Ce sont donc l'ensemble des ressources renouvelables (hydrogène, énergie solaire, pile à combustible etc.) et leur possible combinaison à des énergies fossiles qui sont étudiées. Dans cette logique, de nombreux moteurs hybrides sont développés et semblent être la solution la plus prometteuse. Mais face à toutes les combinaisons possibles, on peut se demander quel type de propulsion ou combinaison de propulsions semble être le plus efficace pour l'industrie maritime et plus particulièrement adapté au monde du yachting, ayant ses propres spécificités.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont le but est de présenter et d'analyser les différents types de propulsion qui existent ou sont actuellement en développement et d'étudier leur implémentation, leur adaptation et leur faisabilité sur les *super-yachts*.

Plan

Pour répondre à cette question, les objectifs de la recherche seront les suivants :

1/ Quel est le fonctionnement actuel des super-yachts ?

- Étude et explication de l'écosystème du yachting et des *super-yachts*
- Implications dans le cadre de la pollution et des restrictions liées
- Explication du fonctionnement du moteur diesel
- Systèmes de contrôle des gaz d'échappement adaptables aux moteurs diesel (SCR...)

2/ Vers des carburants moins polluants

- Étude des différents carburants qui peuvent remplacer le disel marin
- Leurs avantages écologiques par rapport aux carburants classiques
- La faisabilité de leur implémentation à bord de superyachts

3/ Comment modifier la propulsion des super-yachts pour qu'elle soit plus durable ?

- Comparaison des configurations possibles de la salle des machines
- Les sources d'énergie durables et unités de production d'énergie
- Quelles implications pour les super-yachts ?

Limites

En conséquence, ce mémoire se concentrera sur l'industrie des *super-yachts* et *méga-yachts*, qui, comme énoncé précédemment, concerne respectivement les yachts de plus de 24m et de plus de 70m. Le mémoire se concentrera sur les modes de propulsion de ces yachts même si les autres phases de la vie d'un yacht sont importantes pour considérer l'ensemble de l'impact écologique d'un yacht comme le design, la construction, sélection des matériaux ou encore sa gestion au quotidien. Chacune de ces dimensions à son importance dans la transformation vers un yacht *eco-friendly*, et pourra donc être évoquée au travers de ce mémoire mais n'en sera pas le sujet principal. Par exemple, la construction d'un yacht sera évoquée pour parler de la mise en place de batteries ou de lieux de stockage de nouveaux carburants pour en étudier la faisabilité.

Intérêt pour le sujet

Ce sujet est particulièrement intéressant pour moi puisque j'ai travaillé pendant 5 ans, tous les étés, au port d'Ajaccio en tant qu'agent de port à l'accueil et amarrage de yachts. J'ai donc pu y voir l'impact de ce type de bateau, bien que peu nombreux en comparaison de grands ports de plaisance comme St-Tropez ou Porto Cervo en Sardaigne. J'ai également pu être émerveillé par les prouesses architecturales de certains navires comme par les avancées techniques de yacht plus respectueux de l'environnement comme le Savannah, pionnier dans le domaine. C'est donc dans cette logique que j'ai décidé d'étudier les différents types de propulsion les plus prometteurs qui permettront peut-être un jour de visiter nos eaux et notre nature tout en les respectant.

Sources

Les données que nous étudieront sont principalement des données qui seront collectées sur des sites de constructeurs de yacht et de moteurs, dont certains sont particulièrement innovants. En effet, face à l'émergence des préoccupations écologiques, de nombreux constructeurs se sont spécialisés dans la recherche et le développement des yachts de demain. Parmi eux, Lateral, Amer, Oceanco... qui mettent en avant leurs recherches et les avancées.

De plus, de nombreuses recherches sur le sujet sont disponibles, étudiant l'implémentation des SCR (Ruggiero, 2020), les propulsion hybrides utilisant plusieurs énergies, des études sur les émissions NO_x de certaines combinaison hybrides, ou encore sur les carburants alternatifs... Tant de papiers universitaires et recherches pratiques qui seront regroupées et sur lesquels nous nous appuierons dans ce mémoire.

Ce travail prendra donc la forme d'une recherche utilisant des données existantes à des fins d'analyse, et des conclusions théoriques en seront tirées sur sa faisabilité à bord de super-yachts.

1 Partie 1 : Les super-yachts d'aujourd'hui

1.1 *Super-yacht* et écologie, antinomiques ?

Le marché du yachting, contrairement au reste de l'industrie maritime, a la particularité d'être, par définition, destiné au loisir de ses occupants. Les déplacements ne sont donc pas nécessaires et la notion de luxe est inhérente au marché. L'histoire du yachting remonte au début du 20ème siècle avec l'essor des navires privés destinés aux plus riches. L'industrie est menée par l'opulence et une innovation constante avec, parmi les critères d'évolution, la taille des navires. Les yachts sont de plus en plus grands et imposants, atteignant jusqu'à 180 m de long pour le plus grand d'entre eux. La partie la plus dynamique du marché concerne les *super-yachts*. Selon les régions, les définitions pour ce terme diffèrent : au États-Unis, on parle de *méga-yacht* à partir de 30 mètres et de *super-yacht* à partir de 45 mètres ; en Europe, on constate l'inverse, les *super-yachts* et les *méga-yachts* concernent respectivement les bateau de plus de 30 m et 50 m (The Gentleman's Journal, Frances, & Michael Howorth, 2016). Parfois, la définition englobe les navires à partir de 24m jusqu'à 70m, définition que nous choisissons d'utiliser tout au long de ce mémoire.

1.1.1 Le marché des super-yachts

Même s'il représente un marché de niche, le marché des *super-yachts* est en perpétuelle croissance. Avec une flotte actuelle de 5718 navires en activité en 2020, le marché devrait subir une augmentation de 12% de son nombre d'ici 2025 (« The Superyacht New Build Report », n° 192). Parmi eux, les *motor-yachts* représentent toujours la majeure partie de la

flotte par rapport aux bateaux à voile. Bien que le marché se porte bien, l'accès à cette catégorie de navires reste extrêmement limité. On estime à près de 212 000 le nombre de personnes dans le monde pouvant s'offrir un *super-yacht* et avec un prix d'achat avoisinant les \$10 millions en moyenne, l'important TCO (Total cost of Ownership) reste un frein à l'achat (Camper, Nicholsons, & Wealth-X, 2016). En effet, les frais d'opération annuels d'un *super-yacht* se chiffrent à plusieurs millions d'euros par an, estimés à 10% du prix d'achat, ils comptent pour un yacht de 71 mètres : \$1,4M en salaires de l'équipage, \$1 million en maintenance et réparations, \$400 000 en carburant, \$350 000 en frais d'amarrage et \$240 000 en assurances (Gadd, 2015). Face à de tels budgets, l'activité de charter prend une place importante sur le marché. Cette dernière, permettant de louer un yacht pour une période déterminée connaît une forte croissance, le marché actuel valant \$6.83 milliards en 2020, il va subir une croissance annuelle de 6.6% d'ici 2027 (« Yacht Charter Market Size, Growth & Industry Analysis [2027] », s. d.).

La forte croissance du marché des super yachts montre l'importance qu'il faut accorder à un secteur qui, bien qu'il soit limité en nombre, peut entraîner l'ensemble de l'industrie vers de nouvelles pratiques.



Figure 1 Mega-yacht Flying Fox

Source : (Imperial Yacht Monaco, 2021)

Flying Fox, plus grand yacht proposé en charter pour 3,5M d'euro la semaine.

1.1.2 La surconsommation comme maître-mot

Dans un système luxueux où toutes les limites sont repoussées, les clients sont au cœur de toutes les préoccupations des constructeurs. Comme évoqué précédemment, ils représentent une infime partie de la population et sont nommés les UHNW *individuals*. Leurs comportements en termes de consommation peuvent parfois être associés à la surconsommation causant ainsi un désordre écologique, et ayant un impact sur l'environnement plus important que les classes moyennes et pauvres (Herve Kempf, 2007). Dans le secteur du yachting, la surconsommation peut s'associer la demande constante de confort, luxe, performance, espace... Un comportement qui s'illustre auparavant par la recherche de navires toujours plus grands et qui aujourd'hui se caractérise par l'ajout de nombreux jouets ou tenders lors de l'achat d'un yacht (« The Superyacht New Build Report », p. 110). Quoi qu'il en soit, cette consommation excessive en matériaux précieux, en loisirs (piscines, jacuzzi, cinéma...), en extras (hélicoptères, sous-marins...) et autres, illustre les excès inhérents au marché et s'oppose radicalement à une consommation juste et écologique. Il convient alors de se demander si l'industrie du yachting peut changer pour devenir plus respectueuse de l'environnement.

1.1.3 Le green yachting, nouveau luxe ?

Le constat général de la part des constructeurs est une demande croissante de la part des clients pour des technologies vertes, bien que l'utilisation de technologies encore très innovantes les effraie (Wagner, 2019; *Superyacht Forum Video*, s. d.). Selon eux, si certains acheteurs sont moins concernés par les questions environnementales, ils seront obligés de faire des choix plus durables lorsque les ports limiteront leur accès aux navires polluants, ou bien parce que la façon dont ils sont perçus socialement influe sur leurs choix, en particulier leurs choix technologiques. Une tendance qui s'explique également par l'âge rajeunissant de la clientèle visée (« The Superyacht New Build Report », 2019). De plus, l'activité de navigation récréative étant étroitement liée à la nature et à son exploration, il devient essentiel de préserver la beauté et l'intégrité des lieux visités, intérêt principal de ce moyen de transport.

Que ce soit par conscience écologique ou bien parce que l'opinion publique tolère de moins en moins les comportements polluants, les demandes des clients tendent vers l'adoption de nouveaux modes de propulsion. En conséquence, les chantiers navals et constructeurs de moteurs investissent dans la recherche et le développement de nouvelles technologies écologiques.

1.1.4 Entre réglementations et incitations, vers un avenir plus vert

En plus des demandes des consommateurs, les constructeurs sont soumis aux règles internationales et locales qui s'appliquent à toute l'industrie maritime. Parmi elles, l'IMO régule de plus en plus la pollution, et plus précisément la pollution de l'air à travers son Annexe VI depuis 1997. Les polluants visés, créés par l'industrie, sont le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (NO_x), l'oxyde de soufre (SO_x) ou encore les émissions de particules (PM Particulate Matter) (« International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) », s. d.). La substance NO_x émanant directement du moteur, ce dernier doit suivre le NO_x Emission Technical Code s'il délivre une puissance de plus de 130 kW, ce qui concerne tous les super yachts. Les émissions de SO_x sont directement liées à la qualité du carburant utilisé et à la quantité de soufre qu'il contient qui ne doit pas dépasser les 0,5%. Les yachts sont également soumis au Energy Efficiency Design Index (EEDI) qui est implémenté par phases de 5 ans, et qui requiert une réduction de 50% des émissions de CO₂ d'ici 2050 par rapport à 2008.

De plus, tous les yachts de plus de 400GT doivent tenir un IAPC (International Air Pollution Certificate) valide 5 ans (Helen Verstraelen, 2021; MARPOL, s. d.; « MARPOL environment protection regulations for yachts », s. d.).

Les NO_x, SO_x et PM sont encore plus limités dans certaines régions du monde appelées ECA où le pourcentage de soufre contenu dans le carburant est abaissé à 0,1% par exemple. Cela concerne l'Amérique du Nord, les eaux des Caraïbes des États-Unis, la mer du Nord et la zone Baltique. Alors que la Mer Méditerranée fera bientôt partie de la liste de ces zones particulières, certaines localités s'alignent sur les limitations des ECA comme les ports de l'UE, la Californie, l'Islande etc. (Helen Verstraelen, 2021).



Figure 2 Emission Controlled Areas

Source : (Helen Verstraelen, 2021)

Ces limitations concernent tout particulièrement le monde du yachting dont les destinations les plus populaires se trouvent dans ces zones. L'activité se divise principalement entre l'été passé en Méditerranée et l'hiver aux Caraïbes, avec des pays tels que l'Italie, la France ou la Grèce parmi les plus fréquentés (« Understanding Superyacht Activity With BOAT Pro AIS », s. d.).

Une fréquentation qui s'illustre par une très forte densité dans certaines régions, comme à Saint Tropez où l'on peut observer des pics à 350 navires en même temps dont une centaine de *super-yachts* (Guichard, 2019).

En plus des contraintes législatives, certains acteurs du marché pourraient pousser les yachts à devenir plus verts, comme les ports ou États du Pavillon, grâce à des incitations financières. Par exemple, Chypre, dont le pavillon est très populaire dans l'industrie du yachting (« Yacht registration—Ownership & Administration », s. d.), propose de réduire les taxes annuelles sur le tonnage des navires les moins polluants (« Cyprus tonnage tax discount for green vessels », 2021).

L'industrie des superyachts est donc à la fois incitée et forcée à se tourner vers des technologies plus respectueuses de l'environnement afin d'assurer son futur, dont la pérennité dépend désormais d'actions « vertes ». En effet, il a été noté que parmi les indicateurs de durabilité du marché, l'écologie tient une place importante et se mesure par « le nombre d'initiatives pour réduire les émissions », « le pourcentage d'énergies renouvelables par rapport à la consommation totale d'énergie » ou encore « le pourcentage de réduction d'émissions de gaz » (Hojnik, Biloslavo, Cicero, & Cagnina, 2020).

1.2 Fonctionnement actuel et amélioration du moteur diesel

1.2.1 Origine de la pollution des super-yachts

S'il apparaît que les superyachts doivent changer leur fonctionnement afin de répondre aux critères de l'IMO, il convient de se demander en quoi leur utilisation est polluante. Outre son processus de fabrication ou encore son cycle de vie, le yacht est polluant dans son ensemble et soumis à des règles par les annexes MARPOL. Comme évoqué précédemment, le yacht est le reflet d'une surconsommation qui mène à un désordre écologique, et l'intégralité de son impact sur l'environnement est difficile à quantifier. Nous choisissons, à travers ce mémoire, d'étudier la pollution de l'air qu'un *super-yacht* peut engendrer.

Concernant la pollution de l'air, les émissions liées à la navigation de loisir représenteraient 0,56% des émissions causées par l'homme (Rachel Moreau & Dr. Peter Jansen, 2009), et la consommation de carburant ainsi que les émissions de SO_x et PM des navires de plaisances seraient bien inférieures à celles des navires de commerce (Johansson et al., 2020). Si on s'intéresse spécifiquement aux superyachts, selon Kempf, un *super-yacht* de 71 m utiliserait 3300 tonnes d'essence par an et produirait 1000 tonnes de CO₂, ce qui, pour la flotte mondiale, serait équivalent à la pollution annuelle de certaines nations.

Bien que l'impact de cette pollution de l'air reste marginal, il est important de considérer l'industrie des *super-yachts* comme une partie innovante de l'industrie maritime, qui permet d'introduire de nouvelles technologies et d'en stimuler la diffusion.

Ces émissions, dans le viseur de l'Annexe VI de l'IMO, sont celles des moteurs des *super-yachts* qui sont en majorité des moteurs diesel. Les facteurs d'émissions sont alors soit liés au carburant soit à l'alimentation (Ni, Wang, & Li, 2020). Comme évoqué précédemment, le moteur diesel marin émet un certain nombre de gaz polluants : NO_x , SO_x , CO_2 et PM. En ce qui concerne son fonctionnement, le combustible est injecté dans le cylindre sous pression en fin de compression au niveau du PMS (point mort supérieur) et va s'enflammer par « auto-allumage » au contact de l'air chaud. La combustion du combustible produit la détente des gaz qui vont repousser le piston et créer le travail moteur. C'est lors de cette combustion que sont chimiquement créés les gaz d'échappement qui, lorsqu'ils sont rejetés, sont nocifs pour l'environnement comme le sulfure contenu dans le carburant qui est transformé en SO_2 et SO_3 .

Plus spécifiquement, pour le monde du yachting, le fonctionnement des moteurs dépend de l'utilisation qui est faite du yacht, qui peut être aussi diverse que le sont les propriétaires. En moyenne, les *super-yachts* passent la majorité de leur temps à l'arrêt (80%), que ce soit au port ou à l'ancre ce qui implique un impact important sur la charge des machines auxiliaires. 16% du temps est consacré à la croisière ou la traversée, et un faible pourcentage aux opérations de manœuvre et de vitesse maximale qui demandent la plus grande puissance (Figueiredo, 2018). C'est donc un profil opérationnel particulier qui concerne les yachts par rapport au reste de l'industrie maritime, bien que chaque navire puisse avoir un profil particulier. Il permet d'identifier les émissions émises par le moteur principal et les machines auxiliaires à chaque mode, mais également de mettre en avant les deux modes qui émettent le plus de CO_2 à savoir la croisière et la traversée.

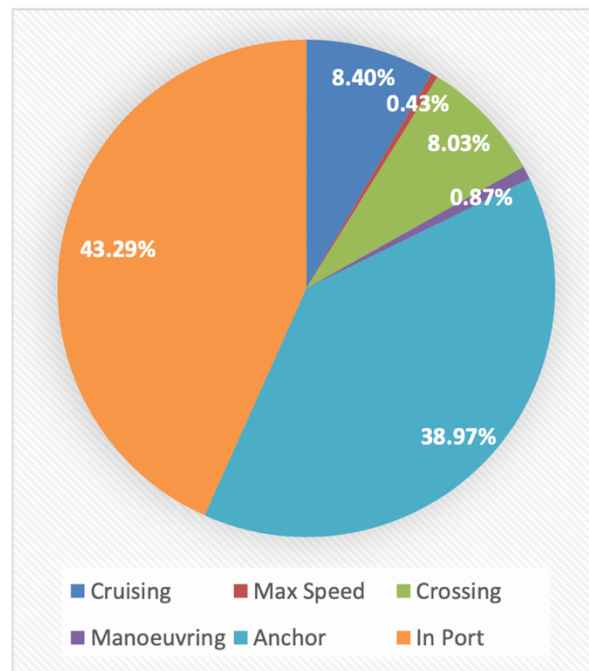


Figure 3 Profil opérationnel d'un yacht

Source : (Figueiredo, 2018)

Cette répartition permet de mieux comprendre les émissions et donc de proposer des solutions efficaces pour les limiter, qui, parfois peuvent être couplées au mode de fonctionnement actuel des moteurs diesel, sans modifier fondamentalement le système de propulsion du navire. C'est dans ce contexte que nous pouvons étudier des technologies de réduction d'émissions qui peuvent être ajoutées aux moteurs diesel classiques afin de répondre, à court terme, aux régulations.

1.2.2 Les systèmes de réduction d'émissions des moteurs diesel

Face aux régulations de l'annexe VI de MARPOL en termes de NO_x et SO_x , de nombreuses technologies de réduction d'émissions ont été étudiées. Ces dernières peuvent être implémentées directement aux moteurs diesel actuels et ne constituent pas un changement fondamental du système de propulsion, raison pour laquelle elles sont évoquées dans ce chapitre. Elles concernent principalement trois aspects à savoir l'optimisation du carburant, les technologies de contrôle pré-combustion ou les systèmes de traitement des gaz d'échappement (Deng et al., 2021).

La Selective Catalytic Reduction est l'une des technologies les plus efficaces pour réduire les émissions de NO_x (Wik & Niemi, 2016). Elle permet d'éliminer jusqu'à 95% des oxydes d'azote, bien que ses résultats, en pratique, se situent généralement entre 80 et 85% de réduction. Dans le catalyseur, une solution d'ammoniaque anhydre (NH_3), aqueux ou d'urée, réagit avec l'azote présent dans les gaz d'échappement, créant ainsi du nitrogène (N_2) et de l'eau (H_2O) (Selvam M, Vigneshwaran, Irudhayaraj, & Subbiah, 2016a).

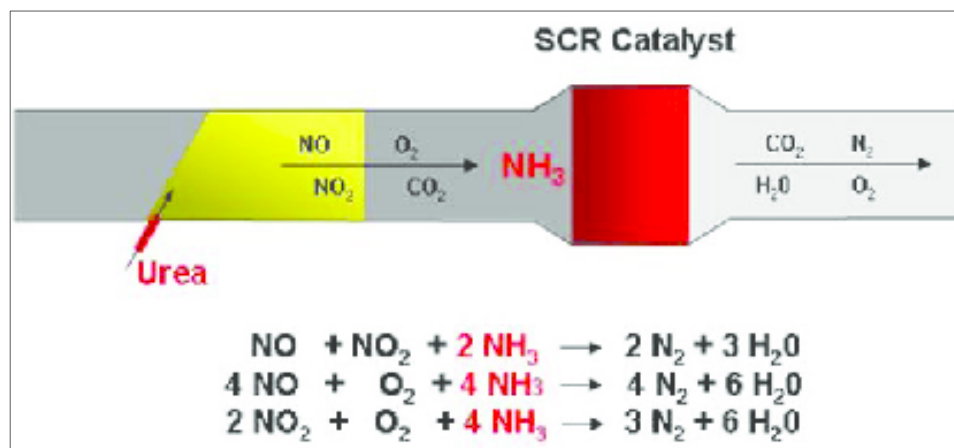


Figure 4 Réaction chimique dans un SCR

Source : (Selvam M et al. , 2016)

Malgré son efficacité, il y a certains obstacles à l'installation de systèmes SCR sur des yachts. Le premier est dû à une utilisation spécifique du moteur : la vitesse du moteur étant fluctuante sur les yachts, et souvent inactif du fait de longues périodes à l'ancre ou au port (80% de leur temps, cf Figure 3). Ce mode d'utilisation ne permet pas de maintenir la température d'échappement au niveau nécessaire au fonctionnement du système SCR. De plus, le système rend le bateau plus lourd, ce qui augmente la consommation de carburant (Anastasiya Nosova, 2020). Finalement, les systèmes SCR existants sont particulièrement grands, ce qui pose un problème dans des salles de machines qui manquent d'espace. Cette problématique est d'autant plus importante sur un yacht où l'espace est un luxe. La simulation sur un yacht de 70m montre que l'ajout d'un système de SCR et ses réservoirs d'urée imposants surchargent la salle des machines et rendent difficile l'accès à certaines parties du moteur pour la maintenance (Ruggiero, 2020).

Financièrement, l'installation d'un tel système pose, en pratique, la question du bon dosage de stockage d'urée : s'il y en a trop, le poids du navire est augmenté et par conséquent la consommation de carburant, et s'il n'y en a pas assez, la possibilité d'être à court engendre un risque d'amende importante. De plus, la taille de la salle des machines devrait être augmentée de 30% ce qui correspond à sacrifier une chambre d'invité sur un petit yacht (Anastasiya Nosova, 2020). Selon Ruggiero, l'installation du système sur un yacht de 70m nécessite l'augmentation de la hauteur de 15cm, ajoutant ainsi 8 à 10 tonnes d'acier au poids du navire. Ces investissements sont des freins possibles à l'installation d'un système SCR à bord d'un *super-yacht*.

Certains constructeurs travaillent sur des solutions compactes pour permettre une implémentation plus facile : Volvo Penta offre un système compact et flexible qui s'adapte à la configuration de l'espace des machines (Volvo Penta, 2021), MAN propose de la flexibilité pour s'adapter aux espaces restreints (MAN, 2021) et MTU a installé pour la première fois son système de propulsion IMO III sur un yacht de 80 mètres du chantier naval turc Bilgin (Katrín Auernhammer, 2019).

Le yacht NORD sorti du chantier naval Lürssen en 2021 est équipé d'un système de traitement des gaz d'échappement. Ce méga-yacht de 141 mètres combine une technologie SCR de pointe avec une configuration hybride et un réducteur de bruit compact. Cet ensemble a une efficacité de 97% sur les NO_x et renforce le confort à bord.



Figure 5 Méga-yacht NORD dans le port d'Ajaccio

Source : Images personnelles, 2021

POUR CONCLURE :

Ces réflexions nous permettent de conclure sur la nécessité pour le monde des super yachts de changer pour des solutions plus durables. D'une part, les réglementations nationales et internationales imposent des limitations sur les émissions de CO₂, NO_x, SO_x et PM. D'autre part, l'opinion publique tolère de moins en moins les excès et les choix polluants. Pour ces raisons, et pour profiter encore longtemps des espaces naturels qui les entourent, les acheteurs de yachts sont de plus en plus intéressés par des solutions vertes. Aujourd'hui, les moteurs diesel dédiés à la propulsion émettent toutes les substances toxiques controversées. Bien qu'ils soient de plus en plus performants, ils nécessitent des adaptations. Parmi les technologies proposées, certaines permettent de réduire les émissions de la salle des machines sans changer fondamentalement le fonctionnement des moteurs diesel. On retrouve, par exemple, la technologie de SCR qui diminue, en sortie du moteur, les NO_x. On a pu voir que, pour l'industrie du yachting, cette technologie était particulièrement contraignante et ne suffisait pas. C'est pourquoi nous allons étudier, dans la suite de ce mémoire, des solutions à plus long terme et qui changent le principe de fonctionnement des moteurs soit par l'utilisation de nouveaux carburants, soit par la réorganisation de la salle des machines. Les solutions qui vont être étudiées pourront cependant nécessiter l'appui de technologies additionnelles comme la SCR.

2 Partie 2 : Vers des carburants moins polluants

Pour faire face aux régulations et à la tendance écologique, les premières solutions envisagées sont de supprimer les composants responsables de la pollution. Les carburants composés de carbone sont monnaie courante dans l'industrie maritime, et les moteurs actuels des *super-yachts* sont principalement alimentés en MDO (*Marine Diesel Oil*) composé de substances nocives. Nous allons donc étudier, dans cette partie, les différents carburants qui peuvent remplacer le diesel marin classique pour un avenir moins polluant et plus durable.

2.1 Carburants avec carbone

2.1.1 Liquefied Natural Gas

Le LNG, populaire dans le secteur commercial, peut être utilisé pour suivre les régulations de l'IMO sur les émissions de SO_x et NO_x . Son utilisation permettrait, en théorie, de réduire de 20 à 25% l'empreinte carbone d'un navire par rapport à un carburant conventionnel. Bien que le LNG contienne moins de carbone par unité d'énergie par rapport aux carburants marins habituels, l'impact de son cycle de vie peut être, dans certains cas, contreproductif. Par exemple, lorsqu'il est utilisé sur un moteur 4 temps, bi-carburant à basse pression, très fréquent sur les navires de croisière alimentés en LNG, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de son cycle de vie seraient 70% supérieures au diesel marin classique (Pavlenko, 2020). Lors du processus de combustion du carburant, on note également l'apparition du *méthane slip*, une fuite dans le moteur de méthane non brûlé, gaz qui a un impact sur l'environnement 86 fois supérieur à celui du CO_2 sur une période de 20 ans (Tom Ewing, 2020).

Cependant, utilisé sur des moteurs dual-fuel à compression ou ignition, le LNG a la meilleure performance en termes d'émissions comparé aux autres carburants d'origine fossile et constitue une option à carbone bas intéressante. Parmi ses avantages, un prix relativement bas, son accessibilité, un taux de soufre plus bas et une certaine maturité technique (Jang, Jeong, Zhou, Ha, & Nam, 2021).

Parmi les inconvénients techniques du LNG, l'adaptation des moteurs existants au LNG est coûteuse et compliquée (Brynolf, Fridell, & Andersson, 2014). À cette contrainte, s'ajoute celle du stockage à bord, qui modifie totalement la structure des nouveaux navires. Conservé à une température de -163°C dans son état liquide, ses réservoirs, cylindriques, prennent en moyenne 3 à 4 fois plus de place à bord que des réservoirs de diesel (Pavlenko, 2020). De plus, le transport et la conservation sous pression et cryogénie sont coûteux et énergivores.

Dans le cas spécifique d'un yacht, ces éléments constituent un frein. La demande en espace est très importante, et il faut construire des yachts plus grands et plus chers ou réduire les espaces de vie. La deuxième contrainte est celle liée aux infrastructures d'avitaillement, peu accessibles aux yachts et dans leurs zones de villégiature, même si certains projets comme Poséidon Med II tentent de développer la disponibilité du LNG en Méditerranée (« Poseidon Med II LNG BUNKERING PROJECT. », s. d.). Aujourd'hui, selon le PDG du constructeur Lürssen, le LNG ne serait adapté qu'aux yachts qui ont un calendrier fixe avec des escales précises et un avitaillement organisé, ce qui, pour le marché et la clientèle visée, est assez rare (Lürssen Yachts, 2021).

En revanche, le LNG présente certains avantages pour le monde du yachting puisqu'il est sans odeur, ses vapeurs sont invisibles et il ne laisse pas de traces sur les ponts en teck. Un argument qui, en plus de la réduction d'émissions de CO_2 , permet d'augmenter le confort à bord (The Superyacht Group, 2021).

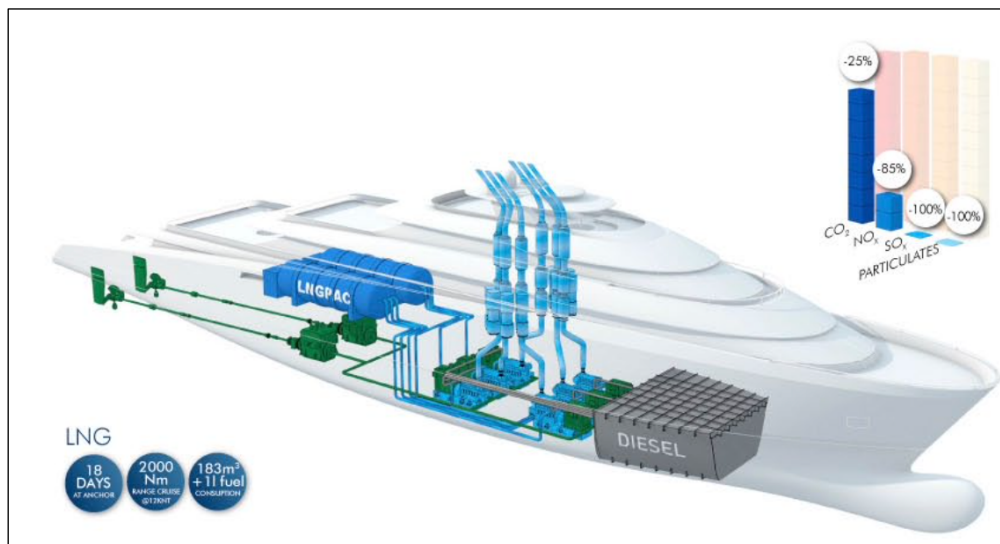


Figure 6 Projet yacht citerne LNG

Source : (Fincantieri, Pastrvich, & Wartsila, s. d.)

Des arguments qui séduisent certains concepteurs de yachts comme Fincantieri yachts et le bateau X-Vintage. Certains concepts, toujours à l'étape de projets, proposent une vision futuriste du réaménagement d'un *super-yacht* alimenté au LNG. On y voit l'espace que peuvent prendre les réservoirs de LNG sur un yacht de 99m, auxquels s'ajoutent ceux du diesel pour plus de flexibilité.

Le LNG n'a pas encore convaincu le secteur du yachting et ne semble pas être la solution idéale pour les yachts du futur en considérant toutes ses contraintes et les investissements nécessaires pour une technologie qui peut être rapidement obsolète aux vues de futures réglementations. De plus, selon (Smith & O'Keeffe, 2019), remplacer les carburants actuels par le gaz naturel d'origine fossile ne suffirait pas à atteindre les objectifs fixés par l'IMO pour 2050 (Smith & O'Keeffe, 2019).

Pour autant, il constitue, comme pour le reste de l'industrie maritime, un pas vers des carburants à carbone neutre ou zéro carbone. Les installations destinées au LNG à bord de yachts pourraient, à l'avenir et avec peu d'adaptation, accueillir des carburants d'origine non-fossile à carbone neutre comme le biogaz. D'autant plus que ces installations restent plus simples à l'utilisation comme à la maintenance que la technologie des piles à combustible associées à de l'hydrogène (The Superyacht Group, 2021).

2.1.2 Méthanol (MeOH)

Le méthanol est un carburant sans soufre qui produit moins d'émissions que les carburants marins conventionnels, mais qui est plus simple à transporter que le LNG, l'hydrogène ou l'ammoniac. En termes d'environnement, les émissions de CO₂ et de NO_x sont diminuées, quand les émissions de SO_x et PM sont nulles. Le méthanol permettrait de répondre aux exigences de l'IMO Tier III (Zincir, Deniz, & Tuner, 2019). Économiquement parlant, le méthanol est plus intéressant que les carburants classiques (Zincir et al., 2019). Le méthanol renouvelable est obtenu à partir de biomasse de deuxième génération à savoir des résidus agricoles, forestiers ou de déchets ménagers (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021). Cependant, le méthanol possède un *flashpoint* bas et est toxique et corrosif, ce qui implique de l'utiliser avec précaution (Bilgili, 2021).

En ce qui concerne son stockage à bord, le méthanol reste liquide à température et pression ambiantes, ce qui implique une facilité de transport, stockage et avitaillement comparable aux carburants actuels en considérant quelques précautions dues au *flashpoint* bas (Xing et al., 2021). Cependant, la densité énergétique du méthanol est environ deux fois moins élevée que les carburants classiques, ce qui implique d'installer des réservoirs deux fois plus grands à bord (Xing et al., 2021). De plus, les infrastructures d'avitaillement sont limitées.

Certains projets en cours viennent concrétiser l'adoption du méthanol comme carburant pour l'industrie maritime. En Norvège, la compagnie de ferry Stena Line a développé le premier navire roulier et à passagers alimenté en méthanol en 2021 (Jasmina Ovcina, 2021). Le Green Maritime Methanol Project cherche des solutions vertes pour implémenter le méthanol sur les nouveaux navires comme pour convertir les navires existants (Group & Bryony McCabe, 2019). Sur les moteurs actuels, quelques parties principales des systèmes doivent être remplacées pour s'adapter à la corrosivité du carburant (Zincir et al., 2019). En salle des machines, le méthanol peut être utilisé sur des moteurs à combustion interne comme sur un système de *fuel cells*.

Le méthanol peut donc être considéré comme un carburant intéressant pour l'industrie des *super-yachts* par sa facilité de transport et sa disponibilité actuelle en tant que produit bien connu de l'industrie chimique. De plus, il peut être utilisé sur les moteurs dual-fuel sans

d'importantes modifications. Les capacités d'avitaillement devraient, avec l'adoption du méthanol, se développer et son prix diminuer. Le constructeur de superyachts Lürssen croit en l'avenir du méthanol comme le carburant du futur pour l'industrie. Utilisé en tant que transporteur d'hydrogène pour la technologie des *fuel cells* à bord, il permettrait un transport moins contraignant que l'hydrogène ou l'ammoniac mais aussi de diminuer la part de diesel et de batterie sur un *super-yacht* (Ryan Swift, 2021). La question de son adoption dépend de la clientèle, mais les constructeurs sont confiants : lorsqu'un client opte pour une technologie, le taux d'adoption décolle rapidement.

2.2 Carburants sans carbone

2.2.1 Hydrogène (H₂)

L'hydrogène apparaît parmi les options les plus populaires pour un futur sans carbone. Élément le plus présent sur terre, il peut être produit à partir de gaz naturel (d'origine fossile) ou par électrolyse de l'eau. Aujourd'hui, la majorité d'hydrogène produit l'est par reformage à la vapeur du gaz naturel, processus qui émet beaucoup de CO₂. Pour que l'hydrogène soit écologiquement viable, l'électrolyse de l'eau est la méthode la plus prometteuse, sans carbone, ne produisant que de l'hydrogène (H₂) très pur et de l'oxygène (O₂). Cette méthode ne concerne actuellement que 4% de la production globale d'H₂, son coût étant en moyenne 3 fois plus élevé que lorsqu'il est d'origine fossile (Seediek, Elgohary, & Ammar, 2015). L'électrolyse de l'eau par la technologie PEM (*polymer electrolyte membrane*) permet de diviser l'eau de manière électrochimique en séparant l'hydrogène de l'oxygène. Pour être encore plus vert, l'électrolyseur peut être alimenté par de l'électricité issue d'énergies renouvelables solaires ou éoliennes (Shiva Kumar & Himabindu, 2019).

L'hydrogène peut être conservé de deux manières : compressé ou sous forme liquide. Dans le premier cas, le plus utilisé actuellement, l'hydrogène est conservé dans des réservoirs sous haute pression entre 200 et 800 bars, en général 250 bars dans l'industrie maritime. En considérant la faible densité énergétique par volume d'hydrogène, la pression dans le

réserveoir doit être augmentée en conséquence, ce qui implique des coûts supplémentaires. De plus, il faut considérer le volume que prend l'hydrogène comprimé, environ 10 à 20 fois plus important que le diesel.

Sous forme liquide, le volume peut être diminué, laissant des réservoirs 4 à 5 fois plus gros que des réservoirs de diesel classiques. En revanche, l'hydrogène liquide doit être conservé sous cryogénie, à une température de -253°C , processus très énergivore, complexe et coûteux (Rivarolo, Rattazzi, Magistri, & Massardo, 2021; Xing et al., 2021).

Le risque est alors de dépenser plus d'énergie à produire, transporter et conserver l'hydrogène, par rapport aux économies observées. Ce sont des inconvénients qui complexifient l'implémentation à bord de l'hydrogène surtout sur un yacht où les réservoirs remplaceraient les espaces de stockage, de réfrigérateurs ou la laverie qui permettent à un yacht d'être indépendant et de maintenir un certain niveau de confort (Boat International, 2021).

L'avitaillement est également un challenge pour l'industrie : le marché est encore peu régulé et les autorités de régulation comme les états pavillon ne semblent pas encore prêtes à s'engager. Actuellement, un navire stockant plus d'une tonne d'hydrogène ne peut pas entrer dans un port de commerce, ce qui prouve la nécessité de mettre à jour les directives en fonction de la maturité des technologies. De leur côté, les sociétés de classification Bureau Veritas et Lloyds tentent de mettre en place des standards de sécurité pour faire avancer les choses (Justin Ratcliffe, 2021).

De plus, en Europe, l'hydrogène est principalement produit en Allemagne ou dans des zones industrielles, ce qui implique le transport de grandes quantités d'un carburant difficile à conserver (que ce soit sous forme comprimée ou liquide) vers les ports (*Super-yacht forum video*, s. d.).

Si l'hydrogène est un carburant sans carbone intéressant pour l'industrie maritime, il peut être utilisé directement dans des moteurs à combustion interne ou bien dans la technologie des piles à combustibles (*fuel cells*).

Dans le cas des moteurs à combustion interne, l'hydrogène a un fort potentiel, n'émettant que du NO_x comme substance dangereuse. Cependant, sa température d'auto-allumage élevée le rend plus efficace sur les moteurs à allumage commandé (*spark ignition*). Pour les moteurs à

compression (*compression ignition*), l'utilisation de l'hydrogène pur est limitée et nécessite d'être accompagnée de diesel (Xing et al., 2021). De plus, la configuration de la salle des machines peut prendre la forme d'un moteur à combustion interne directement alimenté en hydrogène, connecté aux hélices à travers la *gearbox*.

Dans un second temps, l'hydrogène est particulièrement connu pour son utilisation directe dans le système de piles à combustible (*fuel cells*). La technologie des piles à combustible permet d'obtenir de l'énergie électrique qui va soit alimenter directement des moteurs électriques, soit compléter la charge des générateurs. Les configurations précises de ces deux modes de fonctionnement vont être étudiées dans la prochaine partie de ce mémoire.

Cette technologie est relativement mature, et de nombreux projets sont présentés pour intégrer l'hydrogène sur des yachts.

La startup française Hynova a présenté en 2020 un navire de 44 pieds soit 13 m, propulsé par un moteur électrique lui-même alimenté par une pile à combustible de 80 kW et des batteries. Il peut atteindre jusqu'à 26 nœuds, et possède une autonomie de 90 miles nautiques (Paul Molga, 2020). Ce navire relativement petit mais luxueux, est présenté comme un tender boat, annexe des superyachts. Ce projet montre donc, à petite échelle, l'implémentation réussie d'un système de propulsion basé sur l'hydrogène, et marque le premier pas vers l'hydrogène pour le yachting.

Le studio de design Sanders Sinot, en collaboration avec l'architecte naval Lateral, a dévoilé un concept à la pointe de la technologie avec des piles à combustible de 4 MW : Aqua, un yacht de 112 m entièrement propulsé à l'hydrogène. Ce dernier est stocké sous forme liquide à la température de -253°C dans deux réservoirs de 28 tonnes, et le concept met en lumière la taille et les contraintes techniques de ce stockage. En termes de sécurité, les précautions à prendre pour le stockage de l'hydrogène cryogénisé sont les mêmes que pour le LNG et les citernes sont contrôlées pour éviter les risques liés au *boil-off* (JC, 2019; Lateral Naval Architects, 2019). Si le concept est attrayant, il met en lumière le frein principal à l'adoption de l'hydrogène par les superyachts : la disponibilité en hydrogène « vert ». À titre d'exemple, la production actuelle d'hydrogène en Europe, principalement d'origine fossile, est de 26 tonnes par jour. Aqua nécessiterait 28 tonnes d'hydrogène liquide pour un plein et des ravitaillements à une fréquence de 2 semaines à 2 mois.

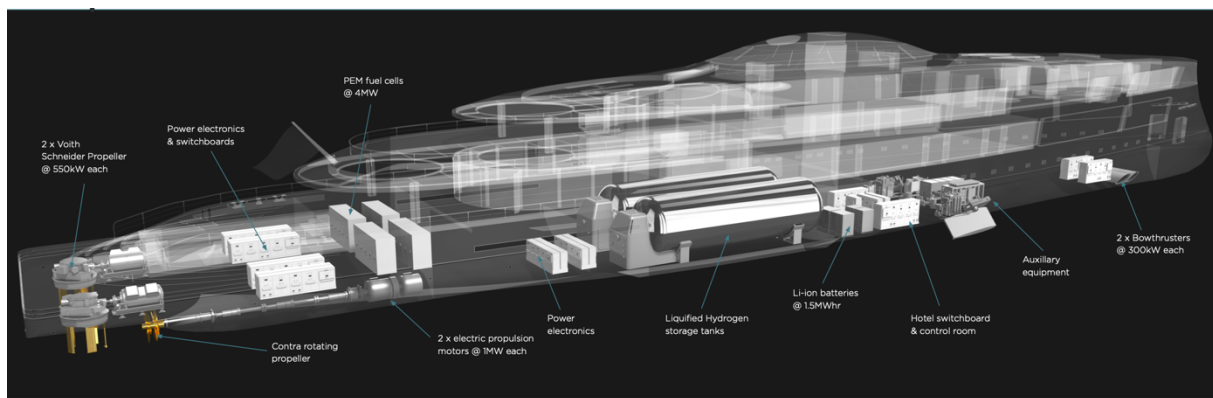


Figure 7 Concept Aqua propulsé à l'hydrogène

Source : (Lateral Naval Architects, 2019)

Bien que l'hydrogène constitue une source viable d'énergie pour la propulsion des *super-yachts*, il reste des considérations à prendre en compte en termes de stockage, de sécurité ou encore d'avitaillement. L'empreinte carbone actuelle de l'hydrogène est trop importante pour être intéressante, seul l'hydrogène vert formé par l'électrolyse de l'eau est viable. Cependant, son potentiel en tant que carburant sans carbone et sa densité énergétique font de l'hydrogène et la technologie des *fuel cells* un choix prometteur pour l'avenir de l'industrie.

Les coûts de stockage et de transport élevés nous amènent à chercher d'autres sources d'énergie transportant de l'hydrogène, comme l'ammoniac ou le méthanol.

2.2.2 Ammoniac (NH₃)

Parmi tous les produits chimiques fabriqués, l'ammoniac est celui qui possède une des plus grandes capacités de production et peut-être utilisé comme un carburant sans carbone. En effet, sans carbone ni sulfure, ses émissions de CO₂, SO_x et CO sont nulles. Concernant les émissions en CO₂ de son cycle de vie, elles dépendent des sources d'énergie utilisées pour sa production. L'ammoniac est produit par le processus Haber-Bosch dans lequel du diazote atmosphérique entre en interaction avec de l'hydrogène en utilisant un catalyseur métallique sous de fortes températures et pressions (Helen Verstraelen, 2021).

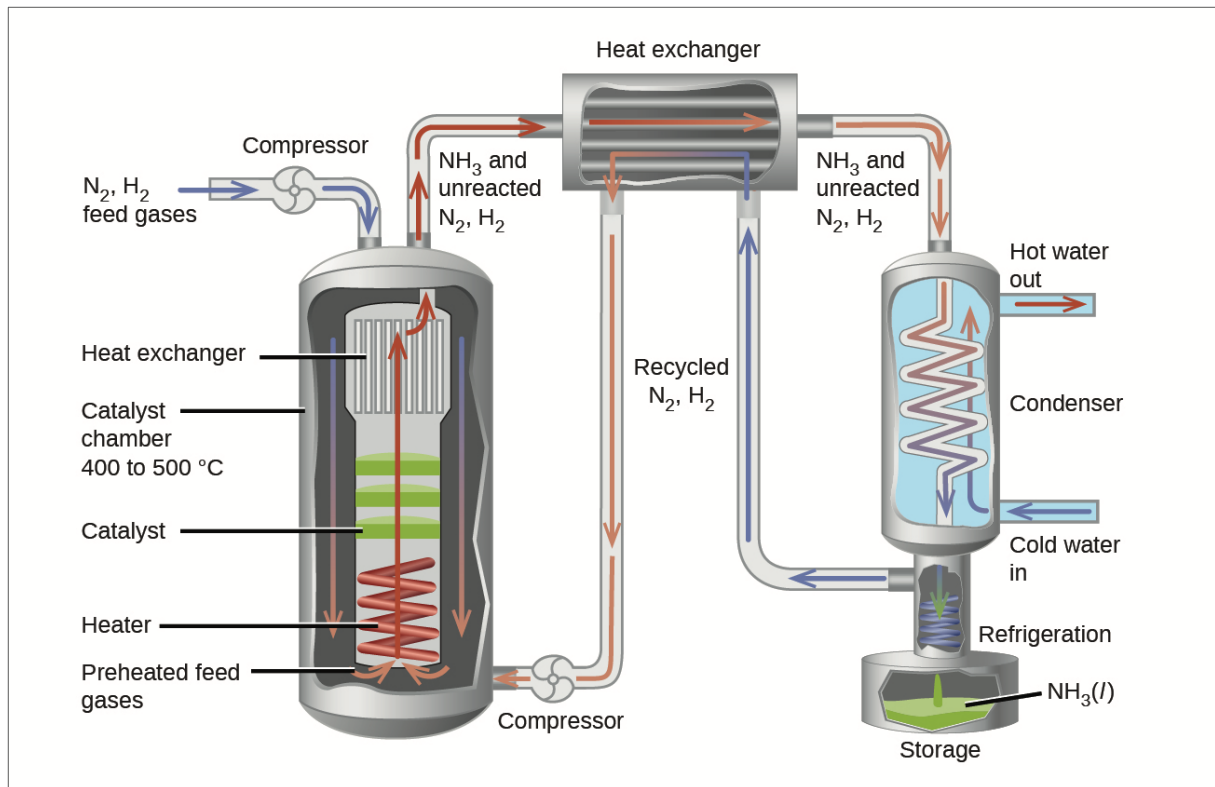


Figure 8 Processus Haber Bosch

Source : (Moore, Zhou, & Garand, 2021)

Son stockage est relativement facile puisqu'il est sous forme liquide à une température de -33°C à pression ambiante, ou à une pression de 9 bars à température ambiante (Rivarolo et al., 2021). En grande quantité, l'ammoniac est conservé à -33°C dans des réservoirs. Les petites quantités d'ammoniac sont conservées dans des réservoirs sphériques en acier inoxydable sous pression.

Dans le processus de production d'énergie, l'ammoniac est compatible en tant que carburant pour les moteurs à combustion interne, pour les systèmes *fuel cell* ou en tant que stockage indirect de l'hydrogène. En effet, de par la proportion d'hydrogène qu'il contient, il peut être considéré comme un transporteur d'hydrogène rendant ainsi plus simples et sécurisés son transport et son stockage à bord (Dimitriou & Javaid, 2020). Pour les moteurs à combustion interne, son inconvénient principal est qu'il est relativement peu inflammable oscillant entre 15 et 25% de LEL et UEL (Kokarakis John, 2020). Pour améliorer la combustion, il est nécessaire d'associer l'ammoniac à d'autres fuels qui vont servir de pilote, et ce, à une proportion de 20% de carburant. Parmi les pilotes fuel potentiels, l'association et les ratios

pour la combustion ont été étudiés avec de l'hydrogène (Wang, Zhou, & Liu, 2021) ou encore celle du gaz naturel (Oh et al., 2021).

En termes de sécurité, l'inhalation de l'ammoniac est potentiellement dangereuse bien qu'une fuite soit facilement détectable à l'odeur (Dimitriou & Javaid, 2020). De plus, lorsque mélangé à de l'eau, il est hautement corrosif et peut provoquer des brûlures (Kokarakis John, 2020).

Parmi ses propriétés, sa densité énergétique est de 18.6 MJ/kg ce qui est significativement plus bas que les carburants actuels ou que le LNG, ce qui implique des capacités de stockage plus importantes pour remplacer les carburants actuels par l'ammoniac, ou une autonomie moindre.

L'utilisation de l'ammoniac pour l'industrie maritime est donc principalement basée sur sa capacité à remplacer les carburants actuels dans les moteurs dual-fuel avec une certaine facilité de transport en comparaison à de l'hydrogène pur. C'est aussi en tant que transporteur d'hydrogène que sa composition est intéressante, permettant ainsi d'éviter les contraintes liées au stockage de l'hydrogène, qui freinent son implémentation sur les superyachts.

POUR CONCLURE :

Actuellement, l'hydrogène, l'ammoniac et le méthanol apparaissent comme les meilleurs carburants vers une industrie sans carbone. Ces trois alternatives sont plus ou moins complémentaires : les technologies de pile à combustible couplées à de l'hydrogène sont parmi les solutions les plus prometteuses, mais le transport et la disponibilité de l'hydrogène, d'autant plus lorsqu'il est vert, reste un réel challenge. L'ammoniac et le méthanol, peuvent alors être utilisés en remplacement de l'hydrogène grâce à leur teneur en cette molécule, et leur facilité de transport. De même, leur production doit être verte pour assurer une implémentation durable. L'efficacité des nouveaux carburants dépend grandement de leur processus de fabrication : certains d'entre eux émettent plus de CO₂ lors de leur production que les réductions gagnées. La recherche doit donc se concentrer sur ce point. De plus, on parle de 'e' carburant lorsqu'ils sont produits via électrolyse utilisant de l'électricité et respectivement de l'air (e-ammoniac) ou du CO₂ (e-méthanol) (Jacotine, 2021).

Si l'ammoniac est composé de plus d'hydrogène que le méthanol, il reste moins facile à transporter et stocker. C'est pour cette raison que le constructeur de super yachts Lürssen mise sur le méthanol vert comme un premier pas vers la décarbonation de ses constructions.

L'autre particularité de ces carburants se situe dans leur capacité à remplacer le diesel dans les moteurs à combustion interne, généralement dual-fuel. Cette possibilité constitue un premier pas vers l'utilisation de carburants sans carbone, sans pour autant modifier complètement la salle des machines. Cependant, elle ne résout pas le problème du stockage.

De même, la disponibilité et la multiplicité des lieux d'avitaillement dans les zones de villégiature sont des points cruciaux pour l'adoption de ces nouveaux carburants par les *super-yachts*.

D'autre part, le LNG et les biocarburants peuvent être considérés comme des carburants de transition pour une réduction des émissions, mais ne semblent pas être une solution à long terme. Ce sont pourtant des solutions matures, avec de nombreuses applications dans l'industrie, mais très peu dans celle du yachting.

3 Partie 3 : Comment modifier la propulsion des super-yachts pour qu'elle soit plus durable ?

L'orientation des *super-yachts* vers un avenir plus vert passe, d'une part, par l'adoption de nouveaux carburants sans carbone, et d'autre part, par la réorganisation de la salle des machines. Les nouveaux carburants offrent des solutions à bas carbone voire sans carbone et leur intégration peut être faite dans des configurations habituelles, avec des moteurs à combustion interne. Cependant, pour compléter ces réductions en émissions, il faut revoir la salle des machines traditionnelle et les systèmes de propulsion en place, pour des combinaisons plus efficaces. Avec la diversité des profils opérationnels des super yachts, de nombreuses variétés de production de puissance et d'architecture de propulsion se sont développées. Elles peuvent être catégorisées entre :

- Une propulsion mécanique, électrique ou une combinaison hybride des deux
- Des unités de production d'énergie dont les solutions à l'étude sont les moteurs à combustion interne, les piles à combustible, les systèmes de stockage d'énergie et de captation des énergies renouvelables ou bien une combinaison de l'ensemble.

3.1 Les configurations de la propulsion

Parmi les solutions envisagées pour réduire voire supprimer les émissions des *super-yachts*, l'organisation et l'optimisation de la salle des machines apparait comme une solution durable. Ces changements d'installations de production d'énergie peuvent prendre la forme de configuration diesel-électrique, hybride ou encore de piles à combustibles.

3.1.1 Diesel ou configuration classique

Traditionnellement, les yachts sont construits avec des moteurs diesel couplés à des générateurs diesel pour l'alimentation des systèmes auxiliaires qui assurent le confort à bord. Dans le système classique, le moteur principal alimente directement les hélices pour la propulsion. Les générateurs fonctionnent eux en permanence pour alimenter les systèmes auxiliaires quand le navire n'est pas branché aux prises de quai. Cette configuration est remise en question par le carburant qu'elle utilise doublement dans les moteurs et les générateurs et l'énergie perdue.

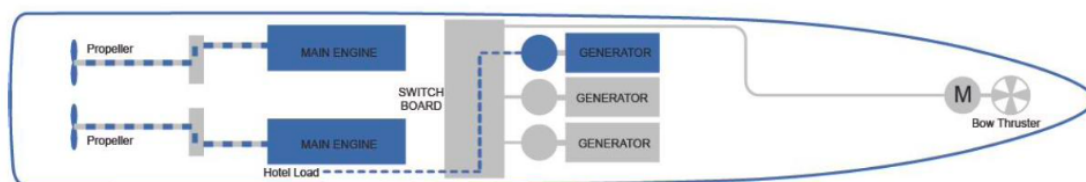


Figure 9 Configuration diesel classique

Source : (Figueiredo, 2018)

3.1.2 Diesel électrique ou électrique

Une des solutions proposées pour réduire les émissions est la configuration diesel-électrique. Dans un système électrique, la propulsion et les systèmes auxiliaires sont alimentés par un set de générateurs. Le plan de la salle des machines se compose plusieurs générateurs qui assurent directement la propulsion à travers des moteurs électriques. Cette configuration, sans transmission mécanique, permet de réduire le bruit, les vibrations et les pertes de transmission

(Figueiredo, 2018). Cependant, ce système nécessite plus de place, ce qui en fait une solution plus adaptée pour les plus grands navires.

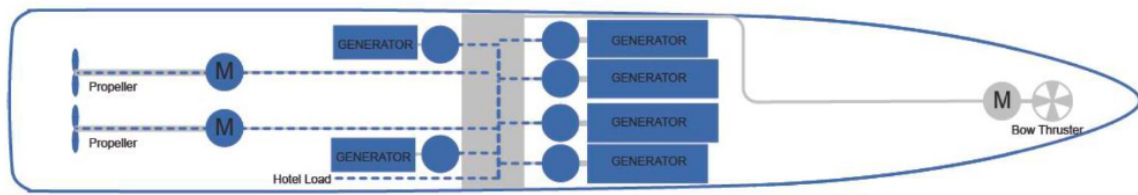


Figure 10 Configuration diesel électrique

Source : (Figueiredo, 2018)

Par exemple, le yacht LUMINOSITY de 108 mètres est le premier *méga-yacht* sorti en 2019 des chantiers navals Benetti expérimentant le système diesel électrique. La salle des machines est composée de 6 générateurs Caterpillar C32 rechargeant un pack de batteries de 35 tonnes et alimentant directement des Azipods électriques de 2200 kW chacun (Yacht France, p.79, 2021). À vitesse de croisière, ce système permettrait de réduire la consommation en carburant de 10 à 20% (Caroline White, 2021).



Figure 11 Mega-yacht Luminosity

Source : (Benetti, 2020)

3.1.3 Hybride

De nombreux navires déjà en service ou en construction ont opté pour l'hybride. Cette configuration permet de combiner les avantages du diesel et du diesel électrique dans un même système. Les générateurs et les moteurs se relaient en fonction du niveau de charge. On peut relever 3 modes principaux durant lesquels les niveaux de charges sont significatifs et sont étudiés : le Slow Power Take-In, Power Take Off (PTO) et Boost Power Take-In (Boost PTI).

Dans un moteur diesel normal, l'efficacité maximale est autour de 85% de charge. Quand la charge est au-dessous de 50%, l'efficacité diminue fortement, la combustion incomplète commence et l'impact sur l'environnement plus dangereux (Figueiredo, 2018). Ainsi, pour palier à ces pertes, la configuration hybride permet aux générateurs de prendre le relais lorsque la charge est très basse. On parle alors de Slow Power Take-In (Slow PTI). Dans ce mode, les systèmes auxiliaires ainsi que le moteur, qui agit comme un moteur électrique, sont alimentés par les générateurs. Le navire navigue alors à petite vitesse ou est en manœuvre. La charge sur les générateurs est forte, ce qui est plus avantageux par rapport à la petite charge que cela représenterait pour les moteurs.

Lorsque le navire est en mode croisière ou en transit, on utilise le mode PTO Power Take-Off. Dans un système diesel basique, la demande pour la propulsion et les systèmes auxiliaires n'est pas assez forte, ce qui laisse les moteurs et les générateurs en sous-régime. Dans le mode hybride, les moteurs diesel prennent toute la charge, ce qui résulte en une meilleure efficacité. Ils assurent à la fois la demande des systèmes auxiliaires et de la propulsion. Ce mode est particulièrement intéressant pour le profil opérationnel d'un yacht, puisqu'il passe la majeure partie de son temps à naviguer en mode croisière.

Enfin, lorsque la vitesse augmente, la demande sur les moteurs augmente. Ces derniers ne peuvent plus assurer la charge de la propulsion additionnée à celle des systèmes auxiliaires. Les générateurs sont alors actionnés en plus des moteurs diesel. Ils peuvent alors assurer une partie de la propulsion, on parle de mode Boost PTI.

De plus, des sets de batteries viennent compléter le système pour éviter l'utilisation des générateurs lors de petites charges, ou pour compenser une connexion au quai trop faible.

Cette configuration est un bon compromis pour allier les avantages du diesel comme du diesel électrique. Elle permet de trouver la bonne balance entre l'écologie et la performance. Elle offre également plus de liberté aux propriétaires qui peuvent profiter du confort de l'électrique en naviguant à petite vitesse, sans bruit ni vibrations. Parmi ses inconvénients, la mise en place et la maintenance sont complexes (Lurssen Yachts, 2021).

Parmi les yachts qui ont adopté ce mode de fonctionnement, le navire Savannah est le premier *super-yacht* qui, depuis 2015, fonctionne en mode hybride. Sa vitesse de croisière de 12 nœuds est assurée par 3 générateurs Caterpillar qui chargent aussi des batteries Lithium-Ion. Le moteur principal, un Wärtsilä 9L20 fournit la puissance pour atteindre une vitesse maximale de 17 nœuds (Wärtsilä, s. d.). Ce navire de 83 mètres est une prouesse technique qui a obtenu le premier prix du « World Superyacht Award » en 2016 (Torterat, 2016).

Preuve que l'hybride a conquis le monde du yachting, des *super-yachts* sont construits en série avec des configurations hybrides. Les constructeurs Sunseeker et San Lorenzo proposent certains de leurs modèles avec ces arrangements. Le Sunseeker 133 est équipé de 2 moteurs MTU série 2000 de 1432kW chacun, ainsi que d'outils de transmission, de batteries, de convertisseurs et systèmes de contrôle (Sunseeker, 2019). San Lorenzo a lancé le modèle SL 106 en collaboration avec e-Motion, spécialisé dans l'hybride. Les arrangements que propose e-Motion sont pensés pour être modulables dans l'espace et le temps. Les changements sont possibles pour un futur encore plus vert et l'intégration de *fuel cells* envisagée pour remplacer les moteurs diesel dans ces systèmes.

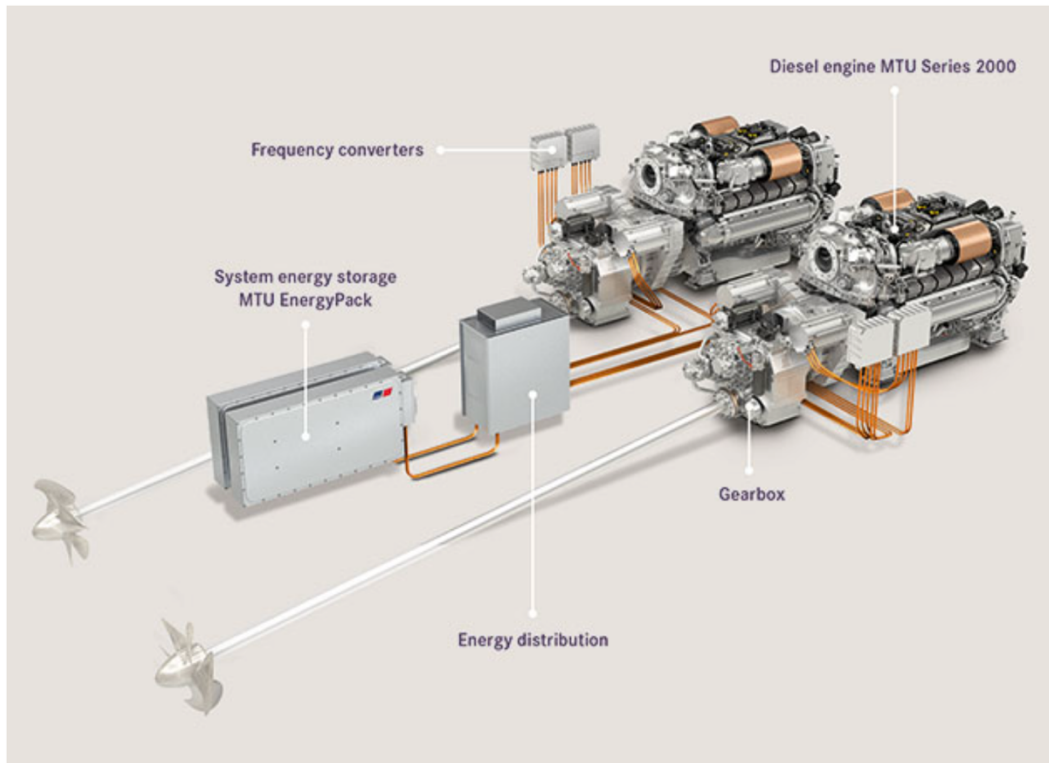


Figure 12 Installation hybride par MTU

Source : (Haines, 2019)

L'hybride et l'électrique apparaissent comme des solutions très populaires au sein de l'industrie puisque plus de 500 *super-yachts* hybrides ou purement électriques sont actuellement en service ou en construction. Cependant, les économies en carburant et en émissions sont encore à débattre car elles dépendent grandement du profil opérationnel de chaque yacht, qui reste très variable (Boat International, 2021). De plus, l'adoption du système électrique ou hybride doit également prendre en compte les risques liés aux batteries.

Le coût de ces nouvelles technologies reste un frein à leur adoption. Le poids que représente la salle des machines sur le coût total d'un yacht est moins important pour les plus grands yachts (+100 mètres), que pour des plus petits yachts (entre 35 et 50 mètres).

L'investissement dans des technologies plus chères et encore en développement pour le secteur des « petits » *super-yachts* est trop important pour pousser à l'achat. Il est donc plus facile de les intégrer dans le secteur des *méga-yachts* de plus de 100 mètres, ce qui explique que la majorité de ces navires en construction aient déjà adopté le diesel-électrique ou l'hybride. (*Superyacht forum video*, s. d.).

Cependant, si ces solutions, fréquemment adoptées dans l'industrie, ne suppriment pas entièrement l'utilisation d'un moteur diesel, elles permettent de mettre en place, petit à petit, la propulsion électrique. Cette dernière est particulièrement efficace d'autant plus avec le développement de technologies de pointe comme les hélices Azipods. Cette technologie est un système de propulsion compact sans engrenage qui offre une excellente manœuvrabilité (Ghassemi & Ghadimi, 2008). De plus, ces configurations sont modulables et adaptables à de nouveaux carburants, ce qui permet encore de diminuer les émissions. Ainsi, au lieu de considérer une configuration diesel-électrique, on peut remplacer le diesel dans les moteurs à combustion interne par du LNG ou un carburant sans carbone. De même, l'installation peut être améliorée en utilisant des piles à combustible alimentées en hydrogène ou méthanol pour la production d'électricité. On peut alors parler de configuration électrique. Des améliorations qui, petit à petit, amènent à une décarbonation de la salle des machines et donc, de la propulsion.

Outre les choix de configuration, les émissions peuvent être limitées à court terme en choisissant des moteurs et des générateurs plus adaptés aux yachts. Ils sont souvent surdimensionnés, fonctionnent à petite charge et consomment plus. Il convient alors d'étudier les besoins des futurs acheteurs et l'utilisation qu'ils feront de leur yacht pour choisir le bon compromis en termes de taille et de puissance. En plus d'être plus écologiques, ces choix permettent de limiter les coûts de maintenance à bord.

3.2 Les unités de production d'énergie durables

En plus du choix de la configuration de la salle des machines, des économies en carburant et des baisses d'émissions peuvent être obtenues en choisissant les unités de création d'énergie les plus adaptées. Dans un système classique, l'énergie est produite dans les moteurs à combustion interne ou dans les générateurs qui utilisent actuellement du diesel comme carburant. Ces unités restent très polluantes, ce qui nous pousse à chercher d'autres sources de production d'énergie, notamment électrique. Parmi elles, les *fuel cells*, les systèmes de stockage de l'énergie comme les batteries ou encore l'énergie électrique obtenue directement des énergies renouvelables.

3.2.1 Fuel cells

Le fonctionnement de la pile à combustible est simple : la combustion d'un combustible (l'hydrogène) et la réduction d'un comburant (l'oxygène) permettent, au travers de deux électrodes séparées par un électrolyte, de créer de l'énergie électrique, de l'eau H_2O et de la chaleur (Energy.gov, s. d.). Parmi les technologies de pile à combustible existantes, la PEM FC (membrane à échange de protons) et la MCFC (à carbonate fondu) sont les options les plus prometteuses pour l'industrie maritime de par la disponibilité de leurs composants et leur haute efficacité (Welaya, El Gohary, & Ammar, 2011).

Les challenges les plus importants pour l'industrie du yachting sont la puissance demandée par rapport à la taille et au poids de la technologie, sa résistance aux chocs et sa tolérance à la salinité (Welaya et al., 2011).

Un avantage réside également dans la facilité d'implémentation du système. Les fuel-cells sont modulables ce qui permet d'en ajouter si le besoin en énergie est plus grand et inversement. Les piles sont facilement interchangeables ce qui ne produit pas de panne totale si l'une d'entre elle ne fonctionne plus.

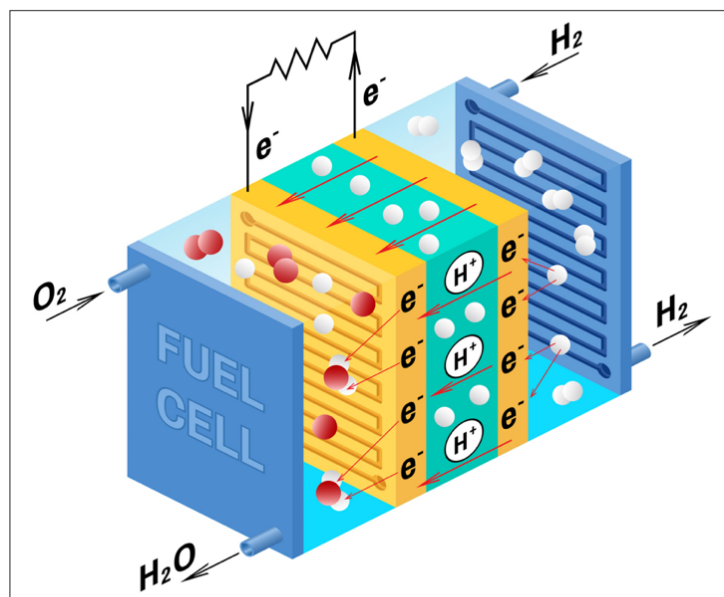


Figure 13 Fonctionnement de la pile à combustible

Source : (Airbus, 2020)

Aujourd'hui, l'utilisation la plus probable des *fuel cells* pour les super-yachts se limite aux machines auxiliaires en remplacement des générateurs diesel seuls ou dans une configuration hybride. Dans ce dernier cas, une propulsion sans émission peut être envisagée lors des manœuvres au port ou en vitesse de croisière dans des zones protégées (Justin Ratcliffe, 2021).

3.2.2 Systèmes de stockage de l'énergie

Les systèmes hybrides et diesel-électrique se basent sur l'intégration de batteries qui stockent l'énergie produite. Les batteries permettent alors d'assurer la navigation sur de courtes distances, ce qui assure un mode sans émissions. Ces batteries, généralement des batteries Lithium-Ion, stockent d'importantes quantités d'énergie, qui se comptent en MWh pour les *super-yachts*. Les batteries au lithium, dont le stockage est de plus en plus dense, représentent un réel risque d'explosion lorsqu'elles sont en surchauffe. Des considérations sont à prendre compte quant à la sécurité de la salle des machines et des batteries et doivent faire l'objet d'arrangements (Ruggiero, 2021). De plus, il faut prendre en compte leur coût de production ainsi que l'impact sur l'environnement de leur fabrication. De nombreuses études assurent que les réserves de lithium sont suffisantes pour assurer la production de batteries pour les transports électriques (Oliveira et al., 2015). Cependant, la fabrication de batteries lithium est toujours un processus très énergivore. De nouveaux matériaux doivent être utilisés pour réduire l'impact sur l'environnement, principalement lié à l'appauvrissement des ressources et à la toxicité pour l'homme. Parmi ces matériaux aujourd'hui utilisés, on trouve le cobalt, le cuivre, le thallium et l'argent (Kang, Chen, & Ogunseitan, 2013).

La dangerosité de l'installation de batteries à bord ainsi que leur impact sur l'environnement sont des éléments à ne pas négliger lorsqu'un système électrique est envisagé. Cependant, elles permettent plus d'efficacité et d'assurer des périodes de navigation moins polluantes. Les batteries, couplées aux systèmes de production électrique (générateurs, piles à

combustible, énergie solaire ou éolienne), peuvent alimenter les moteurs électriques ou les systèmes auxiliaires à bord des *super-yachts*.

3.2.3 Énergie solaire

Au vu du profil opérationnel des superyachts, l'utilisation des énergies renouvelables comme source d'énergie propre peut être envisagée. Le soleil et le vent, largement disponibles en mer, peuvent être captés par les technologies actuelles.

De par sa présence constante en mer, on peut considérer le soleil comme une source potentielle d'énergie à travers l'installation de panneaux photovoltaïques. Leur efficacité a été étudiée dans de nombreuses recherches (Figueiredo, 2018; Jacotine, 2021b).

L'efficacité actuelle des panneaux solaires en termes de conversion de l'énergie solaire en électricité est de 21%. De plus, ils sont sensibles à la température ambiante : lorsqu'elle est supérieure à 25°C, la puissance de sortie est réduite à un certain pourcentage par degré supplémentaire, selon la composition du panneau. À l'inverse, lorsque la température diminue, la puissance augmente de ce même pourcentage (Jacotine, 2021b). De plus, les performances théoriques des panneaux solaires ne prennent pas en compte la variation des radiations au cours de la journée et de l'année, ainsi que l'angle d'incidence. Ils sont donc bien moins intéressants en pratique.

De par ces contraintes, l'énergie solaire n'est envisagée qu'en tant que source d'énergie auxiliaire. À titre d'exemple, un yacht de 65 m constitué de générateurs de 200kW, en présence de clients, demande 4500kWh/jour en considérant l'air conditionné, la laverie, les stabilisateurs, chauffe-eaux etc. Sur ce même yacht, 407 m² de surface sont disponibles pour accueillir des panneaux solaires, tandis que la surface nécessaire pour fournir cette quantité d'énergie est de 3 240 m² soit 8 fois plus grande, en considérant des conditions météorologiques optimales (Jacotine, 2021b). D'autant que les calculs théoriques ne prennent pas en compte certains éléments comme la dynamique du yacht, la poussière ou encore les nuages, la pluie et la température.

En considérant la large surface nécessaire aux panneaux photovoltaïques et leur faible rendement, leur utilisation sur des *super-yachts* en remplacement de générateurs diesels n'est pas envisagée. Ils pourraient être utilisés en complément, dans une configuration hybride.

3.2.4 Énergie éolienne

L'énergie éolienne possède aussi des avantages, notamment sa forte présence en mer. Utilisée depuis des millénaires pour propulser les navires, elle revient aujourd'hui grâce à des technologies très efficaces en complément des moteurs. On parle alors de *Wind Assisted Ship Propulsion* (WASP). Ces solutions peuvent prendre la forme de rotors, kites, voile-ailes ou voiles rigides (Chou, Kosmas, Acciaro, & Renken, 2021).



Figure 14 Projet ICE assisté par kite

Source : Red Yacht (s. d.)

Par exemple, des voile-ailes ont été choisies sur le bateau laboratoire Energy Observer, pour leurs économies en carburant potentielles de 18 à 42% (Group & Martin Richter, 2021). Les ailes peuvent être vues comme des moteurs alimentés par le vent, et deux fois plus efficaces que des voiles classiques (Boat International, 2021). Les kites utilisés comme aide à la propulsion deviennent également une solution intéressante. Les essais sur les navires commerciaux sont nombreux et la technologie mature. Pour les superyachts, le projet ICE présente un *motor-yacht* de 64 mètres assisté par un kite de 157m² (Verdon, 2020).

Bien qu'efficace, l'énergie éolienne ne peut servir que de source d'énergie complémentaire à un moteur ou à des *fuel cells* sur un *super-yacht*, permettant de réduire entre 1 et 32% de la consommation de carburant (Xing et al., 2021). Pour être utilisée pour la propulsion seulement, la question revient alors à un débat de fond : celui de choisir un voilier, moins polluant par définition, ou un *motor-yacht*. Cette possibilité revient à l'acheteur, et est une question de goût.

Les technologies captant les énergies renouvelables, en plus d'être peu efficaces, nécessitent d'être parfaitement positionnées pour générer le maximum d'énergie. Des contraintes qui ne permettent pas, à l'heure d'aujourd'hui de considérer le soleil et le vent comme des sources d'énergie dédiées à la propulsion, mais plutôt comme des sources complémentaires d'énergie. Elles ne sont pour l'instant pas autonomes en tant que source de propulsion, et nécessiteront toujours, sur le moyen terme, l'appui de moteurs à combustion interne ou de *fuel cells*.

Cependant, il existe des recherches pour utiliser les nombreuses technologies évoquées dans ce chapitre. Parmi elles, *Energy Observer* est l'exemple même de cette route vers la décarbonation utilisant des énergies renouvelables. Ce catamaran laboratoire de 30m de long a pour objectif d'être autonome en énergie et de ne produire aucune émission, particule fine ou bruit (Energy Observer, 2021). Pour cela, une combinaison d'énergies sans carbone est mise en place sur ce navire et étudiée à chacun de ses voyages. Le catamaran est équipé de 130m² de panneaux solaires installés sur les ponts et capte l'énergie éolienne grâce à des ailes verticales rigides. De plus, le navire à propulsion électrique est alimenté par des batteries et des piles à combustible. Les batteries lithium-ions stockent de l'énergie à court terme pour deux réseaux différents : un premier à 400 V pour la propulsion, la compression de l'hydrogène et l'électrolyse et un second à 24V pour la vie à bord. Dans ce système, l'hydrogène est utilisé comme un moyen de stockage à long terme de l'énergie et un électrolyseur fabrique le carburant à partir d'eau dessalinisée (CEA, 2017). Cet ensemble de technologies sans carbone testé en conditions réelles permet d'étudier la faisabilité d'un yacht zéro-émissions.

POUR CONCLURE :

Ces configurations nous mènent vers une conclusion certaine de ce à quoi ressemblera le *super-yacht* de demain : il combinera plusieurs les technologies qui permettent d'atteindre l'objectif zéro-émissions dans sa propulsion. L'adoption régulière de technologies telles que l'électrique ou l'hybride est un grand pas qui permettra, petit à petit de remplacer les moteurs à combustion interne par des unités de production plus durables comme les *fuel cells*. Tous les éléments étudiés sont combinables pour obtenir des résultats encore plus intéressants. Les carburants peuvent être utilisés directement dans les moteurs à combustion interne comme dans des *fuel cells*. Accompagnée de batteries, de panneaux solaires ou de technologies de captation du vent, chacune de ces sources d'énergie alimentée en carburant peut être soutenue dans une configuration hybride ou électrique encore plus *eco-friendly*.

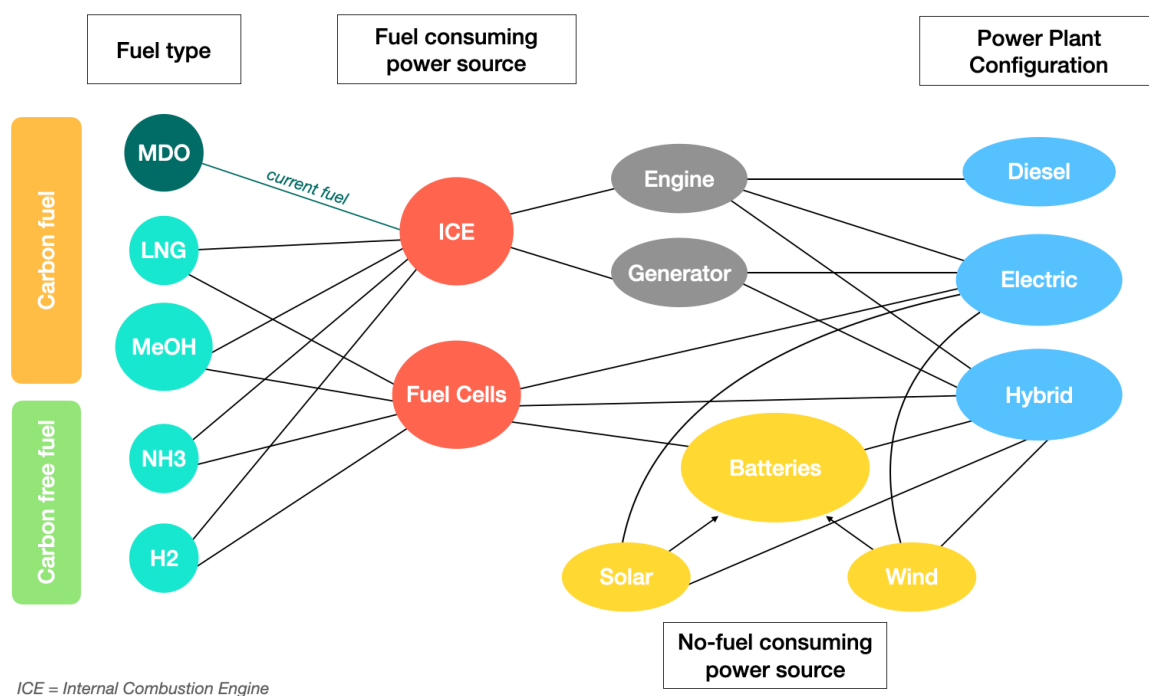


Figure 15 Schéma récapitulatif de combinaisons durables

Source : Travail personnel, 2021

4 Conclusion

Avec des règles IMO plus strictes, la pression des médias et de l'opinion publique et une tendance des *super-yacht* à découvrir des destinations plus exotiques et des mers lointaines, le changement s'installe dans l'industrie. Les navires deviennent de plus en plus écologiques et l'industrie s'ouvre à de nouveaux systèmes de propulsion, avec un objectif ultime sans émission.

Les premières conclusions de ce mémoire se manifestent par l'utilisation de nouveaux carburants pour éliminer les substances nocives traditionnellement présentes dans le diesel marin. L'hydrogène est particulièrement intéressant bien que compliqué à transporter et à stocker. Des contraintes qui nous poussent à considérer l'ammoniac et le méthanol comme les carburants du futur, en plus de l'hydrogène.

En plus des carburants, la salle des machines peut être modifiée. Les configurations électrique et hybride se développent dans l'industrie. Pour atteindre l'objectif de la décarbonation, ces configurations doivent utiliser des sources d'énergie plus durables comme les piles à combustible alimentées en hydrogène, ou les énergies renouvelables.

Finalement, la propulsion des super-yachts du futur se situe dans un mix autour de toutes ces innovations pour atteindre l'objectif zéro-émissions. Dans un cercle vertueux de fabrication de carburants verts (méthanol vert, hydrogène vert), et d'utilisation de ceux-ci dans des technologies durables (*fuel cells*), combiné à la captation d'énergies renouvelables et de batteries, les efforts vers une salle des machines totalement verte se concrétisent.

L'adoption de nouvelles technologies apporte également son lot de risques supplémentaires. Dans le cas des nouveaux carburants, le transport et le stockage doivent être assurés avec précaution, et les réglementations ne sont pas assez développées pour couvrir leur déploiement. Les systèmes innovants comme les batteries impliquent aussi des précautions. Certaines technologies, comme les piles à combustible ne sont pas encore assez matures et performantes pour assurer la propulsion des *super-yachts* mais sont une solution d'avenir. Dans toutes ces

propositions, un sujet n'a pas été évoqué à travers ce mémoire mais doit être soulevé : l'adaptation et l'acceptation du changement par les membres d'équipage. Les nouvelles technologies demandent plus de compétences et de nouvelles connaissances quand certains peuvent être encore réticents à travailler sur des systèmes innovants. C'est un point important à prendre en compte puisque ce sont des acteurs de la filière qui peuvent, ou non, faire avancer les choses. Leur avis est donc essentiel, même si certains constructeurs proposent d'assurer l'accompagnement et la maintenance de ces technologies de pointe encore méconnues. De plus, ils peuvent participer à la réduction des émissions du navire par une gestion efficace des systèmes.

Enfin, ce mémoire avait pour but d'étudier les solutions pour une propulsion plus durable bien que des améliorations peuvent aussi être considérées en termes d'alimentation des machines auxiliaires. De plus, d'autres éléments peuvent être pris en compte en dehors de la salle des machines pour réduire les émissions comme des protocoles de gestion de l'énergie, le design de la coque, son aérodynamisme ou bien son poids etc. De sa construction, avec des matériaux innovants comme le carbone et l'utilisation de l'imprimante 3D, à sa mise en service, avec la gestion des déchets et autres, comme à son recyclage, l'ensemble de la vie d'un yacht peut être étudié et intégré dans des processus écologiques. La gestion de la pollution d'un *super-yacht*, en considérant les autres annexes de la réglementation MARPOL peut être un sujet complémentaire à celui de la propulsion dans le contexte de l'annexe VI. C'est en proposant des solutions écologiques concrètes dans leur gestion que les *super-yachts* de demain pourront continuer d'admirer la beauté des paysages qui les pousse à prendre le large.

5 Bibliographie

Airbus. (2020, 15 octobre). Hydrogen fuel cells, explained. *Airbus*. Consulté le 20 août 2021, à l'adresse <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2020/10/hydrogen-fuel-cell-cross-industry-collaboration-potential-for-aviation.html>

Anastasiya Nosova. (2020). How new environmental requirements affect the superyacht industry. *ItBoat*. Consulté le 11 août 2021, à l'adresse <https://itboat.com/en/articles/5641-how-new-environmental-requirements-affect-the-superyacht-industry>

Anonymous. (2016a, 23 novembre). Accord de Paris. *Action pour le climat—European Commission*. Text, . Consulté le 3 mars 2021, a à l'adresse https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr

Anonymous. (2016b, 23 novembre). 2050 long-term strategy. *Climate Action—European Commission*. Text, . Consulté le 3 mars 2021, b à l'adresse https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

Benetti. (2020). FB272 | Benetti Yachts. Consulté le 21 août 2021, à l'adresse <https://www.benettiyachts.it/yachts/custom/fb272/>

Bilgili, L. (2021). Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110985.
doi:10.1016/j.rser.2021.110985

Boat International. (2021 juin). Future Fuels.

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

Camper, Nicholsons, & Wealth-X. (2016). *THE STATE OF WEALTH, LUXURY AND YACHTING*.

Caroline White. (2021, 4 août). Step on board the 108 metre « glass palace » Benetti superyacht Luminosity. Consulté le 21 août 2021, à l'adresse <https://www.boatinternational.com/yachts/editorial-features/luminosity-benetti-superyacht>

CEA. (2017, 13 avril). Le catamaran Energy Observer. *CEA/De la recherche à l'industrie*. Articles & Dossiers:Les recherches du CEA sur, CEA. Consulté le 23 août 2021, à l'adresse <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energies-renouvelables/recherches-CEA-energy-observer.aspx>

Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A Comeback of Wind Power in Shipping : An Economic and Operational Review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology. *Sustainability*, 13(4), 1880. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/su13041880

Current flag trends for yachts—Yacht registration—International Yacht Solutions—Ownership & Administration—Rosemont International. (s. d.). Consulté le 10 août 2021, à l'adresse <https://yachtownership-solutions.com/en/yacht-registration/current-flag-trends-for-yachts>

Cyprus tonnage tax discount for green vessels. (2021, 20 janvier). *Seatrade Maritime*. Consulté le 10 août 2021, à l'adresse <https://www.seatrade-maritime.com/environmental/cyprus-tonnage-tax-discount-green-vessels>

Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., & Chen, Z. (2021). A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Science of The Total Environment*, 766, 144319.

doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144319

Dimitriou, P., & Javaid, R. (2020). A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 7098-7118.

doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.209

Emissions from planes and ships : Facts and figures (infographic) | News | European Parliament. (2019, 5 décembre). Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20191129STO67756/emissions-from-planes-and-ships-facts-and-figures-infographic>

Energy Observer. (2021). Energy Observer. *Energy Observer*. Consulté le 23 août 2021, à l'adresse <https://www.energy-observer.org/fr/>

Energy.gov. (s. d.). Fuel Cells. *Energy.gov*. Consulté le 19 août 2021, à l'adresse <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

Figueiredo, L. M. de. (2018). *The Yacht of 2030*. (Delft University of Technology).

Fincantieri, Pastrvich, & Wartsila. (s. d.). X-vintage Projet. Consulté à l'adresse https://www.fincantieriyachts.it/media/product_files/x-vintage-x-web.pdf

Gadd, M. (2015a, 31 janvier). Infographic reveals the real cost of owning a superyacht. *Mail Online*. Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse https://www.dailymail.co.uk/travel/travel_news/article-2934289/Infographic-reveals-real-cost-owning-superyacht.html

Gadd, M. (2015b, 31 janvier). Infographic reveals the real cost of owning a superyacht. *Mail Online*. Consulté le 9 août 2021, à l'adresse

https://www.dailymail.co.uk/travel/travel_news/article-2934289/Infographic-reveals-real-cost-owning-superyacht.html

Ghassemi, H., & Ghadimi, P. (2008). Computational hydrodynamic analysis of the propeller–rudder and the AZIPOD systems. *Ocean Engineering*, 35(1), 117-130.

doi:10.1016/j.oceaneng.2007.07.008

Group, T. S. & Bryony McCabe. (2019, 18 mars). Dutch shipyards investigate sustainable fuel alternative—SuperyachtNews. *Superyacht News*. Consulté le 16 août 2021, à l'adresse

<https://www.superyachtnews.com/technology/dutch-shipyards-investigate-methanol-as-alternative-fuel>

Group, T. S. & Martin Richter. (2021, 28 janvier). Wind-assisted propulsion systems—SuperyachtNews. *Superyacht News*. Consulté le 19 août 2021, à l'adresse

<https://www.superyachtnews.com/fleet/wind-assisted-propulsion-systems>

Guichard, B. (2019). L'aire marine, (45), 4.

Haines, J. (2019, 18 janvier). Sunseeker and MTU go hybrid. *Motor Boat & Yachting*.

Consulté le 21 août 2021, à l'adresse <https://www.mby.com/news/sunseeker-mtu-go-hybrid-100350>

Helen Verstraelen. (2021). Ecology MARPOL VI.

Herve Kempf. (2007). *How the Rich are Destroying the Earth*.

Hojnik, J., Biloslavo, R., Cicero, L., & Cagnina, M. R. (2020). Sustainability indicators for the yachting industry : Empirical conceptualization. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119368. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119368

Imperial Yacht Monaco. (2021). FLYING FOX. *Imperial Yachts*. Consulté le 19 août 2021, à l'adresse <https://www.imperial-yachts.com/charter/superyachts-for-charter/flying-fox>

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). (s. d.).

Consulté le 10 août 2021, à l'adresse

[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

Jacotine, M. (2021a, 22 avril). Future Proof. *OnlyCaptains*. Consulté à l'adresse

<https://onlycaptains.com/2021/04/22/future-proof/>

Jacotine, M. (2021b, 14 juillet). OnlyCaptains | Shedding Some Light On Solar Energy For Superyachts. *OnlyCaptains*. Consulté à l'adresse

<https://onlycaptains.com/2021/07/14/shedding-some-light-on-solar-energy-for-superyachts/>

Jang, H., Jeong, B., Zhou, P., Ha, S., & Nam, D. (2021). Demystifying the lifecycle environmental benefits and harms of LNG as marine fuel. *Applied Energy*, 292, 116869.

doi:10.1016/j.apenergy.2021.116869

Jasmina Ovcina. (2021, 24 juin). Stena Germanica runs on recycled methanol. *Offshore Energy*. Consulté le 16 août 2021, à l'adresse <https://www.offshore-energy.biz/stena-germanica-runs-on-recycled-methanol/>

JC. (2019). Aqua, un concept-yacht fantaisiste qui fonctionne à l'hydrogène signé Sinot. *The Good Life*. Consulté le 18 août 2021, à l'adresse

<https://thegoodlife.thegoodhub.com/diaporama/aqua-un-concept-yacht-fantaisiste-qui-fonctionne-a-lhydrogene-signe-sinot/>

Johansson, L., Ytreberg, E., Jalkanen, J.-P., Fridell, E., Eriksson, K. M., Lagerström, M., Maljutenko, I., et al. (2020). *Model for leisure boat activities and emissions – implementation for the Baltic Sea*. Numerical Models/Chemical Tracers/Surface/Baltic Sea. doi:10.5194/os-2020-5

Justin Ratcliffe. (2021). Insight : Is Hydrogen the transport fuel of the future? Consulté le 18 août 2021, à l'adresse <https://www.superyachttimes.com/yacht-news/hydrogen-fuel>

Kang, D. H. P., Chen, M., & Ogunseitan, O. A. (2013). Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste. *Environmental Science & Technology*, 47(10), 5495-5503. American Chemical Society.

doi:10.1021/es400614y

Katrin Auernhammer. (2019). First IMO III yachts built in Istanbul. Consulté le 11 août 2021, à l'adresse <https://www.mtu-solutions.com/trmea/en/stories/marine/yachts/first-imo-iii-yachts-built-in-istanbul.html>

Kenner, D. (s. d.). No. 2015/2, November 2015 Theme : Consumption & Change, 18.

Kokarakis John. (2020, 9 avril). The case of ammonia as a marine fuel. *SAFETY4SEA*.

Consulté à l'adresse <https://safety4sea.com/cm-the-case-of-ammonia-as-a-marine-fuel/>

Lateral Naval Architects. (2019). AQUA | Lateral. *Lateral Superyachts*. Consulté le 18 août 2021, à l'adresse <https://www.lateral.engineering/projects/aqua/>

Lürssen Yachts. (2021). *Lürssen Live ! - Futures technologies de propulsion*. Consulté à

l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=gnuLB_YkVdM&t=1868s

Luxury Yacht Market Size and Share | Industry Analysis Report, 2025. (s. d.). *Allied Market Research*. Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse <https://www.alliedmarketresearch.com/luxury-yacht-market>

Lynch, M., Long, M., & Stretesky, P. (2019). Measuring the Ecological Impact of the Wealthy : Excessive Consumption, Ecological Disorganization, Green Crime, and Justice, 232949651984749. doi:10.1177/2329496519847491

MAN. (2021). MAN modular exhaust after treatment system (SCR system) | MAN Engines. Consulté le 11 août 2021, à l'adresse <https://www.engines.man.eu/global/en/fascination-and-technology/scr-system/SCR-System.html>

MARPOL environment protection regulations for yachts. (s. d.). Consulté le 10 août 2021, à l'adresse <https://www.boatinternational.com/yachts/luxury-yacht-advice/marpol-environment-protection-regulations-for-yachts--541>

Moore, J., Zhou, J., & Garand, E. (2021). D37.5 Haber-Bosch Process. Consulté à l'adresse <https://wisc.pb.unizin.org/chem109fall2021ver02/chapter/haber-bosch-process/>

Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, 118477. doi:10.1016/j.fuel.2020.118477

Oh, S., Park, C., Kim, S., Kim, Y., Choi, Y., & Kim, C. (2021). Natural gas–ammonia dual-fuel combustion in spark-ignited engine with various air–fuel ratios and split ratios of ammonia under part load condition. *Fuel*, 290, 120095. doi:10.1016/j.fuel.2020.120095

Oliveira, L., Messagie, M., Rangaraju, S., Sanfeliix, J., Hernandez Rivas, M., & Van Mierlo, J. (2015). Key issues of lithium-ion batteries – from resource depletion to environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 108, 354-362. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.021

Paul Molga. (2020, 9 décembre). Hynova va produire le premier yacht à hydrogène au monde. *Les Echos*. Consulté le 18 août 2021, à l'adresse <https://www.lesechos.fr/pme-regions/innovateurs/hynova-va-produire-le-premier-yacht-a-hydrogene-au-monde-1272374>

Pavlenko, N. (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel, 40.

Poseidon Med II LNG BUNKERING PROJECT. (s. d.). Consulté le 11 août 2021, à l'adresse <https://www.poseidonmedii.eu/>

Prevention of Air Pollution from Ships. (s. d.). Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>

Qu'est-ce que le système SCR? | GreenChem AdBlue4you. (2017, 21 février). *Greenchem*. Consulté à l'adresse <https://fr.greenchem-adblue.com/system-scr-fr/>

Rachel Moreau & Dr. Peter Jansen. (2009). NAUTICAL ACTIVITIES: WHAT IMPACT ON THE ENVIRONMENT? A LIFE CYCLE APPROACH FOR "CLEAR BLUE" BOATING, 66.

Red Yacht. (s. d.). Ice Kite – Red Yacht Design. Consulté à l'adresse <https://redyachtdesign.com/project/kite/>

Rivarolo, M., Rattazzi, D., Magistri, L., & Massardo, A. F. (2021). Multi-criteria comparison of power generation and fuel storage solutions for maritime application. *Energy Conversion and Management*, 244, 114506. doi:10.1016/j.enconman.2021.114506

Ruggiero, V. (2020). Study on the evolution of large yacht project and construction as consequence of environmental rules. *Procedia Manufacturing*, International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (ISM 2019), 42, 30-34. doi:10.1016/j.promfg.2020.02.020

Ruggiero, V. (2021). New approach to the fire risk and firefighting in small ships, as consequence of latest developments in Industry 4.0 for the use of hybrid propulsion. *Procedia Computer Science*, Proceedings of the 2nd International Conference on Industry 4.0 and

Smart Manufacturing (ISM 2020), 180, 4-12. doi:10.1016/j.procs.2021.01.121

Ryan Swift. (2021, 9 avril). Lürssen to begin testing new methanol power plant. *Asia-Pacific Boating*. Consulté à l'adresse <https://asia-pacificboating.com/blue-planet-lurssen-methanol-hydrogen-fuel-cell/>

Seediek, I., Elgohary, M., & Ammar, N. (2015). The hydrogen-fuelled internal combustion engines for marine applications with a case study. *Brodogradnja*, 66, 23-38.

Selvam M, M., Vigneshwaran, M., Irudhayaraj, R., & Subbiah, P. (2016a). Emission Control Diesel Power Plant for Reducing Oxides of Nitrogen through Selective Catalytic Reduction Method using Ammonia. *Indian Journal of Science and Technology*, 9.

doi:10.17485/ijst/2016/v9i1/85777

Selvam M, M., Vigneshwaran, M., Irudhayaraj, R., & Subbiah, P. (2016b). Emission Control Diesel Power Plant for Reducing Oxides of Nitrogen through Selective Catalytic Reduction Method using Ammonia. *Indian Journal of Science and Technology*, 9.

doi:10.17485/ijst/2016/v9i1/85777

Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454.

doi:10.1016/j.mset.2019.03.002

Smith, T., & O’Keeffe, E. (2019). Reducing the maritime sector’s contribution to climate change and air pollution, 82.

Sunseeker. (2019, 16 janvier). SUNSEEKER INTERNATIONAL AND ROLLS-ROYCE TO PRESENT FIRST PRODUCTION YACHT WITH MTU HYBRID POWER IN 2020.

Sunseeker. Consulté à l’adresse <https://www.sunseeker.com/en-GB/2019/01/16/sunseeker-international-rolls-royce-present-first-production-yacht-mtu-hybrid-power-2020/>

Superyacht forum video. (s. d.).

The Gentleman’s Journal, Frances, & Michael Howorth. (2016). This is what goes into creating the world’s biggest superyachts. *The Gentleman’s Journal*. Consulté le 9 août 2021, à l’adresse <https://www.thegentlemansjournal.com/article/goes-creating-worlds-biggest-superyachts/>

The Superyacht Group. (2021). The potential of LNG fuel for superyachts—SuperyachtNews. *Superyacht News*. Consulté le 11 août 2021, à l’adresse <https://www.superyachtnews.com/technology/the-potential-lng-fuel-for-the-superyacht-industry>

The Superyacht New Build Report. (2019)., 192, 110.

The Superyacht new build report. (s. d.).

Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153-167. doi:10.1016/j.enpol.2015.08.027

Tom Ewing. (2020). IMO emissions report raises new concerns about methane slip. *Professional Mariner*. Consulté à l'adresse <https://www.professionalmariner.com/imo-emissions-report-raises-new-concerns-about-methane-slip/>

Torterat, C. (2016, 26 mai). Savannah, le meilleur superyacht au monde en 2016. *Bateaux.com*. Consulté le 21 août 2021, à l'adresse <https://www.bateaux.com/article/23259/savannah-meilleur-superyacht-monde-2016>

Understanding Superyacht Activity With BOAT Pro AIS. (s. d.). Consulté le 10 août 2021, à l'adresse <https://www.boatinternational.com/yacht-market-intelligence/understanding-superyacht-activity-with-boat-pro-ais--42829>

Verdon, M. (2020, 16 mars). This Futuristic New Superyacht Is Powered by a Giant Kite That Sails 600 Feet Above the Water. *Robb Report*. Consulté à l'adresse <https://robbreport.com/motors/marine/project-ice-superyacht-kite-sail-2905438/>

Volvo Penta. (2021). IMO Tier III and EU Stage V marine solutions | Volvo Penta. Consulté le 11 août 2021, à l'adresse <https://www.volvopenta.com/marine/commercial-solutions/imo-iii-and-stage-v/>

Volvo Penta IPS propulsion system | Volvo Penta. | Volvo Penta. (s. d.). Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse <https://www.volvopenta.com/marine/products/volvo-penta-ips/>

- Wagner, A. (2019a, 20 septembre). Five Key Trends Influencing the Global Yachting Industry. *Wealth-X*. Consulté à l'adresse <https://www.wealthx.com/intelligence-centre/exclusive-content/2019/luxury-yacht-market-trends/>
- Wagner, A. (2019b, 20 septembre). Five Key Trends Influencing the Global Yachting Industry. *Wealth-X*. Consulté à l'adresse <https://www.wealthx.com/intelligence-centre/exclusive-content/2019/luxury-yacht-market-trends/>
- Wang, Y., Zhou, X., & Liu, L. (2021). Theoretical investigation of the combustion performance of ammonia/hydrogen mixtures on a marine diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14805-14812. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.233
- Wärtsilä. (s. d.). Savannah—Yacht Reference case—Wärtsilä. *Wartsila.com*. Consulté le 21 août 2021, à l'adresse <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/yachts/savannah>
- Wealth-X-and-Camper-Nicholsons-State-of-Luxury-Yachting-Report-2016.pdf. (s. d.). Consulté à l'adresse <https://valuwalkpremium.com/wp-content/uploads/2016/04/Wealth-X-and-Camper-Nicholsons-State-of-Luxury-Yachting-Report-2016.pdf>
- Welaya, Y. M. A., El Gohary, M. M., & Ammar, N. R. (2011). A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3(2), 141-149. doi:10.2478/IJNAOE-2013-0057
- Wik, C., & Niemi, S. (2016). Low emission engine technologies for future tier 3 legislations—Options and case studies. *Journal of Shipping and Trade*, 1(1), 3. doi:10.1186/s41072-016-0009-z
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation : Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126651

Yacht Charter Market Size & Trends Analysis Report, 2020-2027. (s. d.). Consulté le 3 mars 2021, à l'adresse <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/yacht-charter-market>

Yacht Charter Market Size, Growth & Industry Analysis [2027]. (s. d.). Consulté le 9 août 2021, à l'adresse <https://www.fortunebusinessinsights.com/yacht-charter-market-105123>

Yacht France. (2021 juillet). Top 100 Les plus grands yachts du monde, (179), 79.

Yuan, Y., Wang, J., Yan, X., Shen, B., & Long, T. (2020). A review of multi-energy hybrid power system for ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110081. doi:10.1016/j.rser.2020.110081

Zincir, B., Deniz, C., & Tunér, M. (2019). Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1006-1019. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.044