

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de La Technologie Bejaïa
A.MIRA
Faculté de Génie Electrique
Département de Génie Electrique



Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique

Propulsion hybride navale

Présenté par

SADOUDI Loucif & *SMAHI Hichem*

Encadré par

Mr ADJATI Arezki

Membres du Jury

 *Mr KASDI*

 *Mme MOUKRANI*

Année Universitaire: 2019/2020

Remerciement

Nos remerciements vont tout d'abord à notre dieu pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour terminer ce modeste travail.

Nous voudrions adresser nos remerciements les plus profonds et les plus sincères à notre encadreur « ADJATI Arezki ». Nous tenons à témoigner de la confiance qu'il nous a accordée dès le début du mémoire, et du soutien indéfectible qu'il nous a apporté durant tout son déroulement.

Nous tenons à remercier très sincèrement l'ensemble des membres du jury qui nous font le grand honneur d'accepter de juger notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département G. Electrique pour tout le savoir que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation.

Enfin, Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A ceux qui ont fait de moi qui je suis, ceux envers qui j'ai une dette
imprescriptible " mes chères parents"*

A mes chères sœurs « Manel », « Yasmine », « Tasnim » et « Melissa » Pour leur
amour et leur incontestable appui.

A toute ma famille.

A tous mes chers amis Pour tous les instants inoubliables que j'ai passés avec
vous, je vous aime beaucoup. Et a mon binôme « Loucif ».

*Je dédie ce travail à toutes les personnes chères à mon cœur. Qu'elles trouvent ici
l'expression de toute ma gratitude et mon amour.*

HICHEM SMAHI

Dédicaces

*A mes très chers parents, intarissable source d'amour, de respect et de bonheur.
Ce travail est le vôtre et est la consécration de vos inestimables sacrifices consentis.*

A mes très chères et tendres sœurs, amour et respect pour tout ce que vous incarnez à mes yeux ;

A mes petits princes et mes petites princesses adorées, la joie et les biens aimés de leur tonton, Islam, Houda, Ciline, Iliane, Fayez et notre petit ange Adam ;

*A mon grand frère **Moukhtar**, puissions-nous partager bien plus que des parfums, témoignage de mon respect grandissant et de ma gratitude pour tout ce que as fait pour moi et pour mes réussites passées, présentes et futures ;*

*A ma chère sœur **Kahina** bien aimée de son petit frère, l'étoile qui éclaircir le ciel de notre famille avec sa sagesse, sa tendresse, son esprit responsable ;*

*A mon âme-sœur et ma chère **Mylène**, qui a portée de la joie et du bonheur dès son apparition dans ma vie, la meilleure personne que je pourrais un jour avoir, rien ne pourra m'être utile plus que le soutien moral que tu m'as accordée le long de cette période de ma vie ;*

A mes chers amis qui étaient ma lumière et mon repère Laid, Soufiane, Massi, Hichem et Hakim ;

*A mon cher ami, cousin et frère qui ne m'a jamais lâché un jour **Guillissa** ;*

*A ma chère amie et sœur **Soussou** ;*

*A mon cher ami et frère d'âme et d'arme **IDRES tarek-Aguellid**. Un frère n'est pas seulement la personne qui partage avec toi les mêmes parents, mais aussi la personne qui partage avec toi ta défaite et ta réussite, ton bonheur et ton malheur, ta joie et ta tristesse, et après tout une personne que tu trouve à tes côtés durant tes moments difficiles. Bien peu d'épreuves forgent réellement les hommes, au gré de ce que nous avons vécu et enduré, j'ai pu apprendre, de ta sagesse, les plus belles leçons de la vie. Hommages respectueux.*

Loucif SADOUDI

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : Généralités sur la propulsion hybride navale

I.1 Introduction	2
I.2 Historique de la propulsion.....	2
I.2.1 propulsion à vapeur.....	2
I.2.2 Propulsion Diesel.....	3
I.2.3 La turbine à gaz	3
I.2.4 La propulsion électrique	3
I.3 La propulsion hybride	4
I.4 Différentes structures de propulsion hybride.....	4
I.4.1 Hybridation série	4
I.4.2 Hybridation parallèle	5
I.5 Hybridation Diesel-électrique	6
I.6 Conception de la propulsion diesel-électrique	9
I.6.1 Rendement du Diesel-électrique.....	11
I.6.2 Emissions du diesel-électrique	12
I.7 Conclusion	12

Chapitre II : Maintenance des navires à fort tonnage à propulsion hybride

II.1 Introduction.....	13
II.2 Notion de sûreté de fonctionnement.....	13
II.2.1 Maintenance, surveillance et diagnostic.....	13
II.2.1.1 Maintenance.....	13
II.2.1.2 Surveillance/ détection de comportement.....	14
II.2.1.3 Diagnostic.....	14
II.2.2 Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité	14
II.2.3 Défaillance et panne	15

II.3 Choix de méthode de maintenance	15
II.4 Application de la maintenance sur la propulsion hybride navale.....	16
II.4.1 Maintenance du moteur diesel	16
II.4.1.1 Symptômes et maintenance	16
II.4.2 Maintenance du moteur électrique.....	18
II.4.2.1. Étude statistique des pannes du moteur électrique.....	18
II.4.2.2 Défauts internes et externes.....	19
II.4.2.3 Types de défauts.....	20
II.5 Symptômes et maintenance.....	20
II.6 Fortes vibrations de l'appareil propulsif accompagné de perte de puissance	21
II.7 Maintenance du système de refroidissement	22
II.8 Conclusion.....	22

Chapitre III : Caractéristique du navire TESSELA

III.1 Introduction	23
III.2 Présentation du navire	23
III.3 Caractéristiques du navire méthanier TESSALA	24
III.4 Principe de fonctionnement du Diesel-électrique	24
III.5 La chaîne propulsive du navire.....	25
III.5.1 Moteur diesel à bord.....	26
III.5.2 Générateurs	28
III.5.3 Transformateur	28
III.5.4 Convertisseur de fréquence	29
III.6 Résistance de freinage de propulsion et dispositifs de protection.....	30
III.7 Moteur électrique	31
III.8 Conclusion	32

Chapitre IV : Etude comparative et modélisation

IV.1 Introduction	33
IV.2 L'indice de la conception de l'efficacité énergétique EEDI	33
IV.3 Modélisation du moteur diesel	34

IV.3.1	Sous-système d'alimentation et de combustion du moteur diesel.....	34
IV.3.2	Sous-système d'entraînement mécanique du moteur diesel	36
IV.3.3	Sous-système électrique	37
IV.3.4	Caractéristique des paramètres du groupe diesel	38
IV.4	Modélisation de la machine asynchrone	39
IV.4.1	Hypothèses simplifications	39
IV.4.2	Modélisation triphasé	39
IV.5	Modélisation du transformateur, du réseau et de l'onduleur	41
IV.6	Elaboration d'un programme fortran pour le calcul de EEDI.....	41
IV.7	Résultats et discussions.....	43
IV.8	Conclusion	48

LISTES DES FIGURES

Figure I.1	Structure hybride série	4
Figure I.2	Structure hybride parallèle	5
Figure I.3	Installation de propulsion diesel-électrique.....	6
Figure I.4	Principe topologies de convertisseurs alternatifs pour la propulsion.....	8
Figure I.5	Propulseur de type POD.....	9
Figure I.6	Emplacement d'un « POD ».....	9
Figure I.7	Disposition des appareils dans un navire à propulsion électrique.....	9
Figure I.8	Présentation simplifié d'un système d'alimentation (1).....	11
Figure I.9	Présentation simplifié d'un système d'alimentation(2)	11
Figure II.1	Emission de fumée noir.....	17
Figure	Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances	18
Figure	Causes internes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	19
Figure II.4	Causes externes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	19
Figure III.1	Le méthanier Algérien TESSALA.....	23
Figure III.2	Schéma simplifié du processus de propulsion du moteur Diesel-électrique	24
Figure III.3	Schéma réel de la chaine propulsive du navire "Tessala".....	25
Figure III.4	Vue transversale des deux moteurs 12V-8L	26
Figure III.5	Fiche technique du transformateur de la propulsion.....	29

Figure III.6	Schéma global du convertisseur de fréquence ABB.....	30
Figure III.7	Emplacement du moteur électrique dans la chaine propulsive.....	31
Figure III.8	Caractéristiques technique du moteur électrique de propulsion.....	31
Figure IV.1	Schéma des composantes mécaniques d'un moteur diesel.....	36
Figure IV.2	Résultats de EEDI obtenue par programme fortran.....	44
Figure IV.3	Evolution de l'EEDI en fonction de la vitesse.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	avantages et inconvénients de la propulsion hybride série.....	5
Tableau I.2	avantages et inconvénients de la propulsion parallèle	6
Tableau II.1	Causes des fortes vibrations de l'appareil propulsif.....	21
Tableau II.2	Causes de surchauffe.....	22
Tableau III.1	Caractéristiques du navire méthanier.....	24
Tableau III.2	Caractéristiques générales des moteurs de bord.....	26
Tableau III.3	Système d'air de combustion des moteurs à bord	27
Tableau III.4	Consommation du carburant en fonction de la charge	27
Tableau III.5	Caractéristiques d'admission	27
Tableau III.6	Caractéristiques de l'air de démarrage	28
Tableau IV.1	CF (t-CO ₂ / t-Fuel) pour chaque type de combustible.....	34
Tableau IV.2	Caractéristiques pour deux navires ayant les mêmes performances sauf différence dans les SFCMEPF SFCMEG SFCAE	43
Tableau IV.3	Résultats du calcul du l'EEDI après correction.....	43
Tableau IV.4	Résultats du calcul de l'EEDI en fonction de la vitesse et de la charge.....	45
Tableau IV.5	Avantages et inconvénients de la propulsion mécanique par rapport à la propulsion électrique	47
Tableau IV.6	les avantages et les inconvénients de la propulsion électrique par rapport à la propulsion mécanique.....	47

Liste des annexes

Annexe 1 : Caractéristiques de navire de l'hyproc OUGARTA	I
Annexe 2 : L'annexe VI de MARPOL	I
Annexe 3 : Généralités sur le langage Fortran	III
Annexe 4 : Calcul de l'indice de la conception de l'efficacité énergétique EEDI.....	V

Notations et Symboles

GNL	:	Gaz Naturel Liquéfier
IMO	:	Schémas de numéros d'identification
MMSI	:	Maritime Mobile Service Identify (Identité dans le Service Mobile Maritime)
DWT	:	Deadweight Tonnage (le port en lourd)
MDO	:	Marine Diesel Oil
EEDI	:	L'indice de la conception de l'efficacité énergétique
EEOI	:	Energy Efficiency Operational Indicator
SEEMP	:	Ship Energy Efficiency Management Plan
LBP	:	Livre libanaise (liste des codes des monnaies, selon ISO 4217)
DS	:	Distinctive Serie
BS	:	Brevet Supérieur
WT	:	Capacité de charge
GT	:	Gross Tonnage (La jauge brute)
$V_{réf}$:	Vitesse du navire
VW	:	Vitesse d'avancement
SFCMEPF	:	La consommation spécifique du carburant des moteurs principaux
CFME	:	Facteur de carbone pour les moteurs principaux
SFCAE	:	La consommation spécifique du carburant du moteur auxiliaire
CF	:	Facteur de carbone
CFAE	:	Facteur de carbone du carburant du moteur auxiliaire
SFCMEG	:	La consommation spécifique du carburant des générateurs principaux
P_{ME}	:	puissance principale du moteur (kW);
P_{AE}	:	Puissance du moteur auxiliaire (kW);
S_{FC}	:	consommation spécifique de carburant (g / kW);

C : Combustible au facteur CO2 (g CO2 / g Fuel)

Capacité: pour navires de cargaison DWT, pour navires à passagers GT;

V_{ref} : vitesse de référence (nm / heure);

F_i : facteur de correction pour la capacité;

F_j : facteur de correction pour la performance en temps réel;

F_w : facteur de correction pour l'efficacité.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis des siècles, le transport maritime demeure le moyen le plus efficace pour les échanges commerciaux entre les pays, et aussi pour le tourisme avec les Ferrys, et ça en vue de la capacité de charge énorme qui nous permet une rentabilité meilleure que le transport aérien, et qui nous permet d'atteindre des points éloignés dans le monde que le transport terrestre ne rivalise pas du point de vue économique [1].

Ce domaine, depuis son apparition a rencontré plusieurs difficultés et défis, en partant de la vitesse et la sécurité de navigation, jusqu'à la réglementation de MARPOL sur le taux des émissions de NO_x , SO_x , et particules fines, et la problématique écologique et environnementale avec la délimitation des zones SECA, NECA, sans oublier la problématique économique qui semble un vrai défi pour réaliser tout ça. Mais l'évolution technologique que le monde actuel vit, lui a permis de surmonter ces défis, et cela par le développement des biocarburants, et l'invention des nouveaux systèmes de propulsion plus efficaces et moins polluants que les anciens systèmes pollueurs et énergivores [1].

Parmi ces nouvelles technologies, on reconnaît la propulsion hybride qui a pris sa place dans le domaine naval depuis l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et qui sera l'objet d'étude de notre mémoire.

La propulsion hybride fait parler d'elle-même ces dernières années, dans le domaine naval elle est présente sous forme de propulsion hybride série et sous-marin et, depuis peu, cette technologie a fait son apparition dans la flotte algérienne, c'est en 2016 que la compagnie algérienne "Hyproc Shipping Company" du transport maritime des hydrocarbures a mis en service ses deux nouveaux navires "Ougarta" et "Tessala" deux sister-ship de propulsion diesel-électrique équipés d'une propulsion hybride série, ce qui a fait de l'étude de ce type de propulsion aussi intéressante de proposer quelque chose de possible [2].

Dans ce qui suit notre travail, on va étudier cette nouvelle technologie, où on va essayer de relever ce qui a fait d'elle une technologie meilleure que les autres propulsions conventionnelles.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LA PROPULSION HYBRIDE NAVALE

Introduction

Depuis la nuit du temps, l'être humain avait usé et utilisé des divers moyens et méthodes afin de se déplacer et de transporter des marchandises, que ce soit par la voie terrestre avec la propulsion animale ou par la voie aquatique ou maritime avec les pirogues ou encore des bateaux ronds des phéniciens ou les galères scandinaves.

En général, la propulsion hybride dans le domaine des transports est une technique de propulsion utilisant plusieurs sources d'énergie, le plus souvent par une combinaison d'un moteur thermique et d'un moteur électrique.

Dans ce qui suit, des généralités sur la propulsion hybride et ses différentes structures seront exposées, ainsi que l'hybridation Diesel-électrique sujet de notre travail.

Historique de la propulsion

Propulsion à vapeur

Dans l'histoire, Robert Fulton est considéré comme l'inventeur du bateau à vapeur avant que d'autres le rejoigne avec leurs différentes machines.

En 1815, le navire « *Margery* » assure le premier service de bateaux à vapeur à travers le *Tamesis* avant d'assurer la traversée de la Manche en le baptisant par « *Elise* ». En 1916, l'Allemagne entre en compétition avec le bateau « *Prinzessin Charlott* », en 1917, l'Espagne avec le « *Real Fernondo* » qui faisait Séville-Cadis, en 1818 les italiens instaurèrent la vapeur à la navigation en Méditerranée avec le « *Fernando Primo* » [1]

Le poids des chaudières, la consommation du charbon, le volume de la machine au détriment de la cargaison et la faible formation des ouvriers présentaient les inconvénients majeurs de cette propulsion.

La fragilité des roues de pale face aux vagues de la mer, le coût du combustible et les difficultés d'approvisionnement de charbon ont conduit à un freinage du développement de la navigation en haute mer.

Propulsion Diesel

Fruit de recherches de Rudolf Diesel, le premier moteur monocylindrique remonte à 1897, un moteur de puissance de 20 chevaux à 172 tr/min à injection de combustible¹, avec un rendement de 26,2% à l'époque où la vapeur frôlait à peine les 10% et celui des essences 20% environ. L'essence de pétrole est utilisée pour les premiers allumages suivis du pétrole lourd avant d'opter pour une injection assurée par un jet d'air comprimé. Le pétrole avait permis une réduction de 10% de l'espace réservé au combustible néanmoins, son coût élevé et les soucis de ravitaillement étaient un obstacle de son remplacement. En 1930, plus de la moitié de la flotte utilisaient le diesel avec l'injection à quatre temps ou celle à deux temps. [1]

La turbine à gaz

Quelques installations de propulsion par turbine à gaz ont équipé des navires avec un principal avantage d'un faible encombrement, mais exigeant un réducteur de vitesse à deux étages. La mise au point des turbines à gaz a été laborieuse et ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale que quelques bateaux ont été équipés. La turbine à gaz comporte un compresseur, une chambre de combustion et une turbine. Le rendement de la turbine à gaz est nettement inférieur à celui du moteur diesel. Ce type de moteur est utilisé sur des unités qui n'effectuent pas de longs parcours. [1]

La propulsion électrique

L'électricité a rapidement envahi les navires, essentiellement pour sa grande flexibilité. Les premiers navires à avoir connu cette propulsion sont les navires militaires, pour des fins stratégiques, et face à leurs avantages, cette technologie à commencer à faire son apparition dans la flotte commerciale.

Les pionniers de la propulsion électrique étaient des sous-marins ; essentiellement pour la discrétion acoustique. A la deuxième guerre mondiale, les Etats-Unis d'Amérique construisent plus de 300 navires de guerre de surface et des pétroliers en turbo ou diesel-électrique. L'apparition des convertisseurs à thyristors dans les années 1970 a propulsé cette industrie. Les progrès de l'électronique de puissance ont permis, depuis, l'application de la propulsion électrique à des types de navires de plus en plus variés. [3]

De nos jours, l'électrification de la propulsion a apporté un gain considérable à la navigation, avec l'avancée de l'électronique de puissance l'inconvénient majeur pour l'électrique à savoir l'autonomie est devenu surmontable.

La propulsion hybride

Une propulsion est dite hybride quand la chaîne de propulsion contient au moins deux sources d'énergies d'ordre de grandeur équivalent, dont au moins une est réversible.

De nombreux armateurs se penchent vers la propulsion dite « Hybride », elle pourrait jumeler les avantages de deux types de propulsions où le choix des deux types de propulsion est selon le besoin en vitesse (Ferry, paquebot, yacht, ...), le besoin en charge (Cargo, coli lourd,...) ou le besoin du contenu de la cargaison (GNL, avec l'introduction du boil-off). Toutes ces combinaisons ont pour but de répondre aux nouvelles exigences de l'Organisation Maritime Internationale sur les rejets et les émissions et les lois sur la pollution atmosphérique, mais aussi d'augmenter le rendement et un gain économique.

La combinaison du moteur à combustion interne/moteur électrique est l'hybridation la plus dominante et connue dans le domaine de la propulsion. [4]

Différentes structures de propulsion hybride

La propulsion hybride est, le plus souvent, une combinaison d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. Il y a au moins trois grandes familles d'hybridation à savoir l'hybridation parallèle, l'hybridation série et l'hybridation série-parallèle [4].

Hybridation série

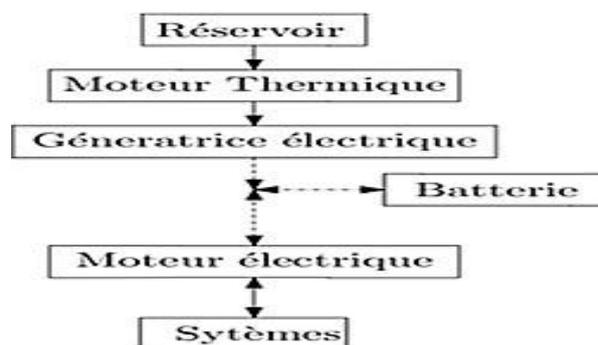


Figure I.1 : Structure hybride série [4]

Le moteur électrique entraîne la propulsion et le moteur thermique entraîne une génératrice qui recharge les batteries qui alimentent le moteur électrique. Le moteur thermique n'a donc pas de lien physique au mécanisme de propulsion, il peut donc tourner à son régime optimal et permettre une consommation en carburant moindre qu'un moteur de propulsion directe avec moins de pertes mécaniques dans la transmission.

Les moteurs utilisés ont un "couple-moteur" important et de puissance variant de 100CV à plus de 900CV, ils sont reliés à des groupes électrogènes par l'intermédiaire des batteries lithium servant de "buffer battery power" ce qui permet de réguler l'utilisation de l'énergie électrique selon les besoins en fonction de la vitesse d'évolution du navire [5].

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de la propulsion hybride série [5]

Avantages		Inconvénients
Bon rendement en régime dynamique.	Facilité de commande	Faible gain de rendement en régime stationnaire.
Mode tout électrique possible.	Bonne possibilité de récupération d'énergie.	Un coût élevé
Confortable d'utilisation.	Flexibilité d'installation.	Une masse embarquée.

Hybridation parallèle

Un dispositif électrique relie le moteur diesel et sa transmission, qui peut fonctionner comme moteur ou comme génératrice. Un système d'embrayage particulier permet d'activer ou de désactiver la propulsion électrique [4].

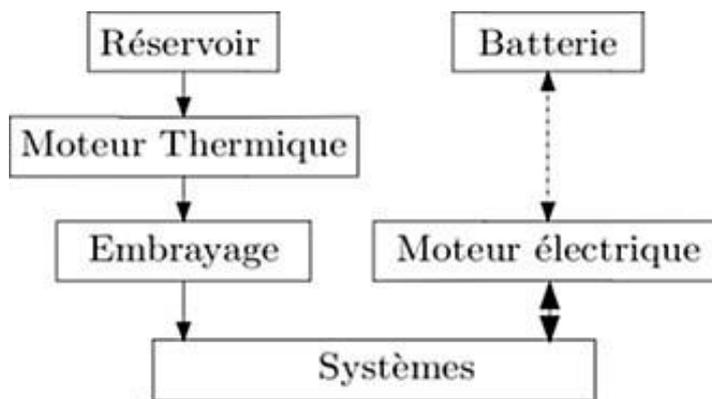


Figure I.2 : Structure hybride parallèle [4]

L'hybride parallèle contient un moteur électrique, des batteries et un moteur thermique. Il faut aussi ajouter un couplage mécanique des deux moteurs. Cela peut être un embrayage ou un train épicycloïdal.

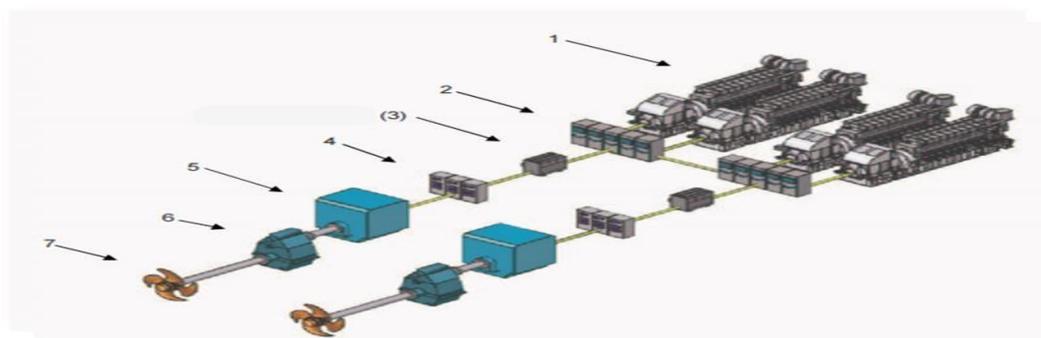
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de la propulsion hybride parallèle [5]

Avantages		Inconvénients
Bon rendement	Nécessite moins de machines tournantes	Complexe à commander
Mode tout électrique possible	-----	Complexe à implanter

Hybridation Diesel-électrique

Le système de propulsion diesel-électrique (Figure I.3) est un système de propulsion mixte qui combine des moteurs diesel et des moteurs électriques et des batteries.

L'ensemble du système fournit la puissance nécessaire au bateau pour la transmettre ensuite à la ligne d'essieux et à l'hélice. Le moteur est alimenté par un groupe électrogène proportionnel à la puissance du moteur. La puissance est variée de 10 kW à plus de 50 kW avec une tension d'utilisation de 400V triphasé. [3]



- 1 : Groupe électrogène : moteurs diesel+ alternateurs.
- 2 : Tableaux principaux
- 3 : Transformateurs d'alimentation
- 4 : Convertisseurs de fréquence / Variateurs de vitesse.
- 5 : Moteurs électriques de propulsion.
- 6 : Boîtes de vitesses (en option): dépend de la vitesse du moteur E-propulsion.
- 7 : Hélices / propulseurs.

Figure I.3 : Installation de propulsion diesel-électrique [6].

a) Moteur diesel

Le moteur à combustion interne transforme l'énergie thermique en énergie mécanique. Les vitesses de ces moteurs sont très différentes d'un moteur à un autre. En effet, plus le moteur est gros, plus la course du piston est grande, et plus le moteur est lent.

b) Les alternateurs

Les générateurs de courant électrique sont des machines synchrones à pôles saillants où le rotor est un électroaimant tournant, alimenté en courant continu, et le stator est un enroulement triphasé.

La vitesse de rotation est donnée par :

$$f = \frac{P_p \times N}{60} \quad (\text{II.1})$$

Avec P_p : le nombre de paires pôles, N : la vitesse de rotation en tour par minute.

c) Tableaux électriques et câbles

Les tableaux principaux sont reliés aux alternateurs, et doivent être divisés en plusieurs cellules ; deux à quatre, pour assurer une redondance, et parer à toute éventuelle avarie due à un court-circuit, un incendie ou une inondation, et cela en séparant les cellules d'une manière étanche, et qui assure une isolation contre le feu. [7]

Le "black-out", est l'avarie la plus grave qui peut se produire dans un système électrique de propulsion, de divers mécanismes pour l'éviter sont liés au système de distribution de la puissance, tel que le dispositif "Auto START/STOP" des générateurs, et la fonction de réduction de la propulsion et d'autres charges qui ne sont pas critiques.

Les tableaux électriques et les câbles sont protégés par une alarme de surtension et de chute de tension, une alarme d'élévation de fréquence, une mise à la terre et une protection différentielle contre le court-circuit. [7]

L'utilisation des transformateurs permet d'avoir plusieurs niveaux de voltage selon les besoins du système de propulsion et les autres charges dont celles des appareils auxiliaires.

d) Le cyclo-convertisseur

Les cyclo-convertisseurs sont des convertisseurs de type alternatif/alternatif à commutation naturelle, qui transforment une tension alternative d'amplitude et de fréquence fixes en une tension d'amplitude et de fréquence variables.

L'avantage des machines alimentées par des cyclo-convertisseurs est leur fort couple en basse vitesse avec de faibles pulsations de couple coté moteur et une excellente performance dynamique en couple et vitesse. [8]

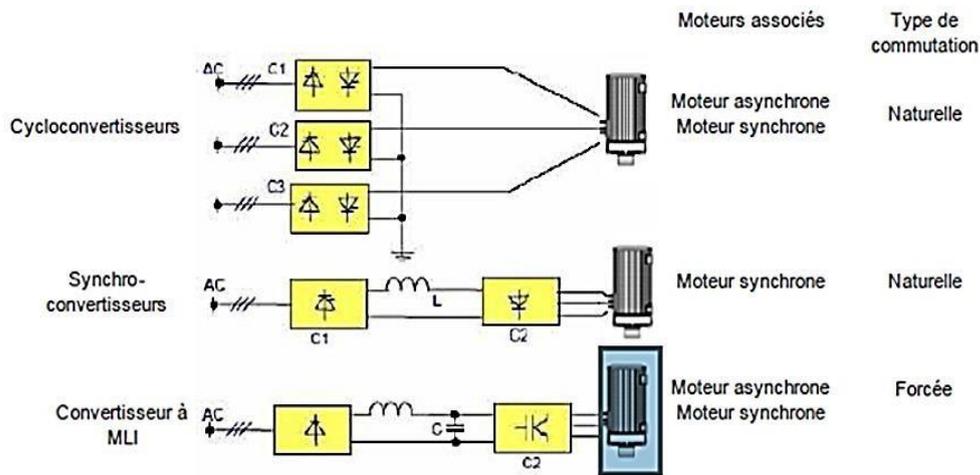


Figure I.4 : Principales topologies de convertisseurs alternatifs pour la propulsion [9]

e) Le synchro-convertisseur

Les synchro-convertisseurs sont des convertisseurs de type continu-alternatif à commutation naturelle, ils sont plus particulièrement associés à un moteur synchrone.

Outre les avantages de performances dynamiques, ces convertisseurs ont l'avantage d'utiliser moins de thyristors que les cyclo-convertisseurs, d'où un encombrement, un poids et un coût moindre. [8]

f) Onduleur de tension commandée MLI

Les onduleurs de tension commandés en MLI sont des convertisseurs de type continu-alternatif, à commutation forcée. De nos jours, c'est le type de convertisseur le plus convoité en raison de l'amélioration apportée sur les composants électroniques et les innovations apportées sur les topologies de convertisseurs tels que les onduleurs multi-niveaux [9].

g) Convertisseurs de fréquence

Un convertisseur de fréquence génère une tension alternative variable en amplitude (niveau de la tension de sortie) et en fréquence à partir d'une tension alternative constante.

Le convertisseur de fréquence assure une régulation de vitesse variable et en continu des moteurs triphasés. [10]

h) Le moteur électrique de propulsion

Il peut être un moteur à courant continu, mais délaissé à cause de sa maintenance continuelle, ou bien un moteur à courant alternatif asynchrones ou bien synchrones.

i) Propulseurs

Le propulseur est généralement une hélice à pas fixe, c'est le propulseur conventionnel, actuellement, une évolution a permis l'apparition d'un propulseur typique dit «POD ».Le principe d'un propulseur de type «POD» est que le moteur électrique de propulsion ainsi que ses paliers et des joints étanches sont entièrement intégrés dans une nacelle orientable fixée sous la coque à l'extérieur du navire, entraînant une hélice à pas fixe. La puissance est transmise au POD par un système de bagues et balais. [5]

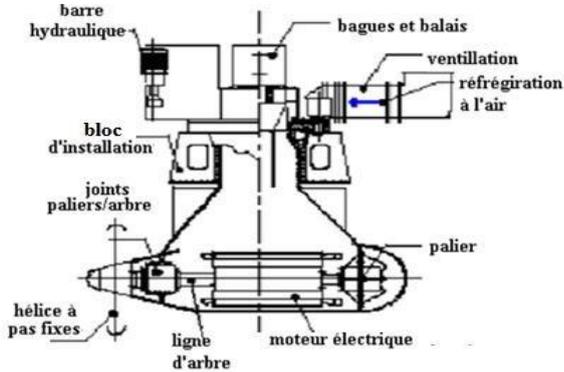


Figure I.5 : Propulseur de type POD [5].

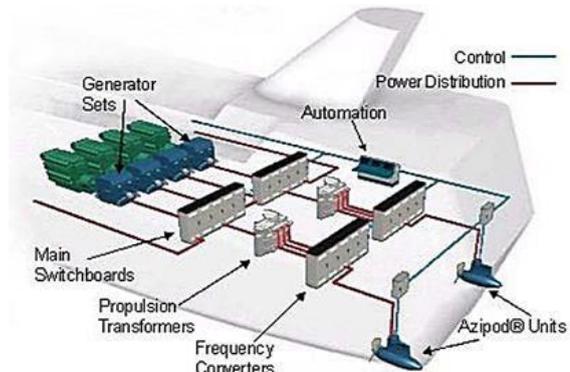


Figure I.6 : Emplacement d'un « POD » [5]

Conception de la propulsion diesel-électrique

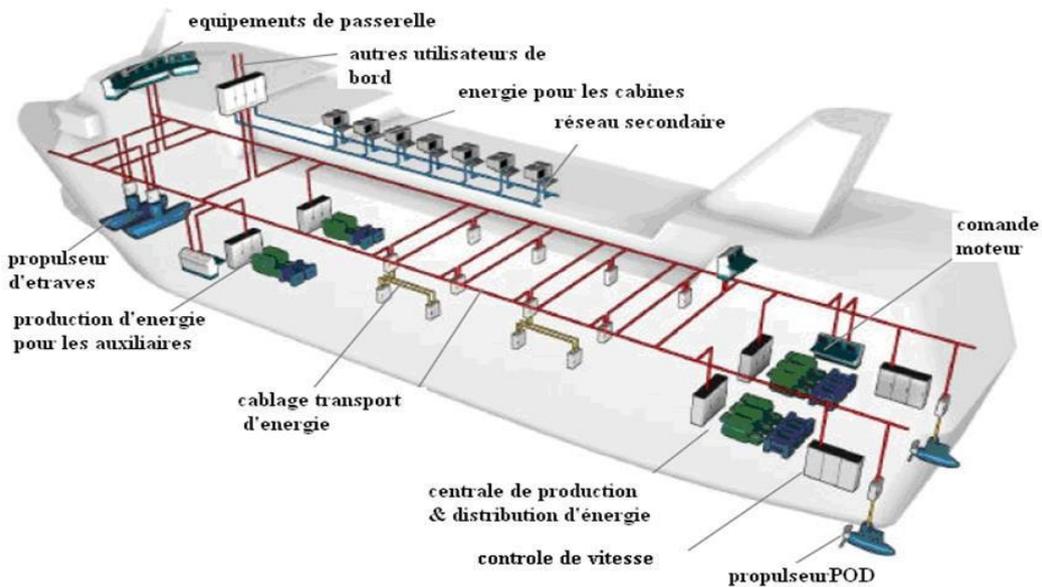
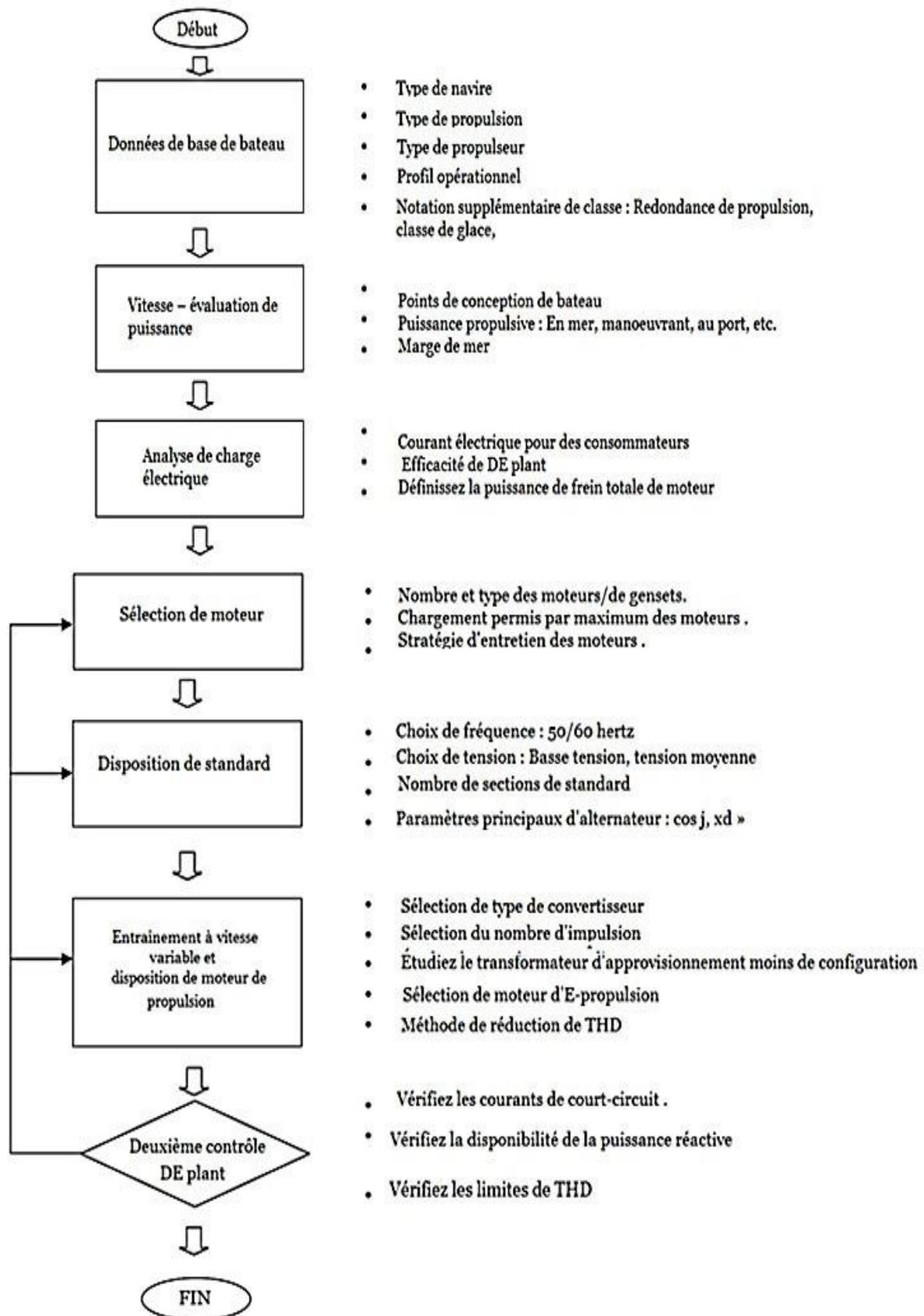


Figure I.7 : Disposition des appareils dans un navire à propulsion électrique [5].

Comment concevoir une installation de propulsion diesel-électrique:



- Type de navire
- Type de propulsion
- Type de propulseur
- Profil opérationnel
- Notation supplémentaire de classe : Redondance de propulsion, classe de glace,

- Points de conception de bateau
- Puissance propulsive : En mer, manoeuvrant, au port, etc.
- Marge de mer

- Courant électrique pour des consommateurs
- Efficacité de DE plant
- Définissez la puissance de frein totale de moteur

- Nombre et type des moteurs/de gensets.
- Chargement permis par maximum des moteurs .
- Stratégie d'entretien des moteurs .

- Choix de fréquence : 50/60 hertz
- Choix de tension : Basse tension, tension moyenne
- Nombre de sections de standard
- Paramètres principaux d'alternateur : $\cos \phi$, x_d »

- Sélection de type de convertisseur
- Sélection du nombre d'impulsion
- Étudiez le transformateur d'approvisionnement moins de configuration
- Sélection de moteur d'E-propulsion
- Méthode de réduction de THD

- Vérifiez les courants de court-circuit .
- Vérifiez la disponibilité de la puissance réactive
- Vérifiez les limites de THD

Rendement du Diesel-électrique

Un des défis les plus importants dans des applications de système de Diesel-électrique est le rendement du système. C'est pourquoi les concepteurs doivent prêter beaucoup d'attention sur cet aspect. Le rendement de ce système est un produit des rendements des parties indépendantes typiques du système en série comme le générateur électrique, le transformateur, le convertisseur de fréquence, le moteur électrique, ...etc. [11]

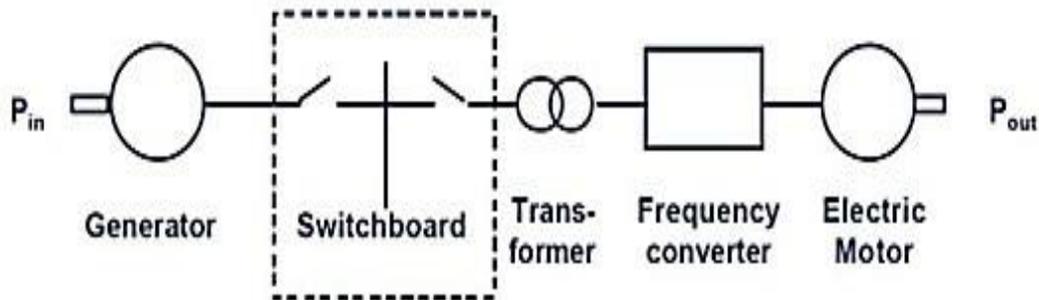


Figure I.8 : Présentation simplifiée de système d'alimentation(1) [5].

Le rendement du système est :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{ertes}} \tag{I.2}$$

Le rendement typique de chaque composant du système d'alimentation au niveau de puissance des composants de bateau :

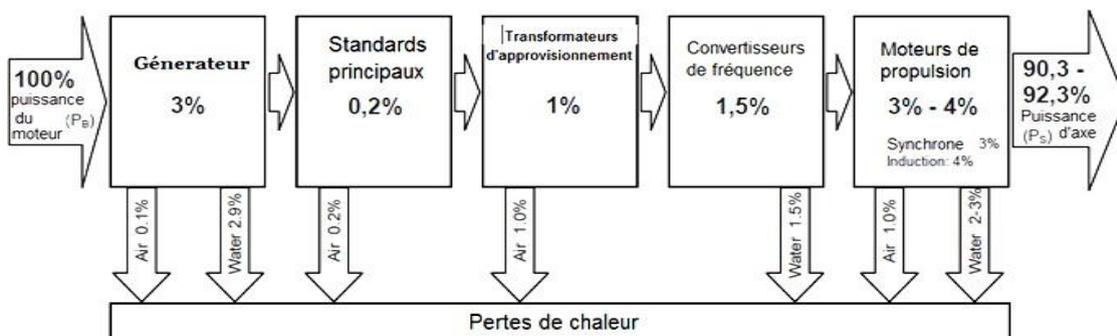


Figure I.9 : Présentation simplifiée de système d'alimentation(2) [7].

La propulsion est possible en utilisant un moteur diesel qui produit de l'énergie mécanique convertie par le groupe électrogène en énergie électrique, qui consécutivement est reconvertie par le moteur de propulsion en énergie de rotation après le passage par plusieurs dispositifs électriques. Le rendement global de propulsion est amélioré.

Emissions du diesel-électrique

Les bateaux avec la propulsion diesel-électrique sont en meilleure position pour atteindre l'attribut « des bateaux verts ». Par exemple, comme période de fonctionnement du moteur à vitesse constante, ils peuvent être ajustés de façon que le gaz d'échappement contient seulement un pourcentage minimum des polluants néfastes, en particulier si l'armateur décide d'employer le carburant diesel marin à faible teneur en soufre plutôt que l'huile de lourd-carburant disponible comme les résidus « de rebut » ajustent le traitement et raffiner de pétrole brut. En outre, aux charges inférieures, le moteur à vitesse constante produit moins de NOx et de CO2 qu'un moteur diesel fonctionnant à la vitesse variable [12].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la propulsion hybride d'une façon générale et le particulièrement le Diesel-électrique en abordant sa composition et les différents éléments le constituant, sa conception, son rendement et ses émission.

Sans doute, pour ce qui concerne le gain en espace et la marge réglementée par l'OMI de l'émission du NOx la propulsion et le rendement aussi élevé (jusqu'à 0.98), le Diesel-électrique reste le meilleur choix des armateurs.

CHAPITRE II MAINTENANCE DES NAVIRES À FORT TONNAGE À PROPULSION HYBRIDE

Introduction

Vu que la propulsion hybride des navires (diesel-électrique) est l'une des nouvelles technologies, il est nécessaire d'avoir de grandes connaissances sur la maintenance des deux moteurs qui constituent le moteur hybride marin (moteur diesel, moteur électrique) afin de pouvoir maintenir ce dernier.

Dans ce chapitre, nous aborderons tout d'abord les notions de base liées à la sûreté de fonctionnement et à ses enjeux. Nous verrons ensuite les types de maintenance intervenant dans la maintenance d'un moteur hybride marin en dressant une liste des défauts les plus connus.

Notion de sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisable par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances.

Maintenance, surveillance et diagnostic

La notion de maintenance revêt une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. Elle englobe en effet les concepts liés à la surveillance et au diagnostic.

Maintenance

Selon l'AFNOR (norme 13306), la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ses opérations au coût optimal.

a) Maintenance préventive

D'après l'Afnor (NF X 60-010), c'est une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est donc une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

b) Maintenance corrective

C'est une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, (Extrait norme NF EN 13306 X 60-319). Si un composant est jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement est considéré comme de la maintenance corrective [13].

IV.2.1.2 Surveillance / détection de comportement

Ceux sont des actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un bien ou d'un service et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance. Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques directement prélevées sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes.

II.2.1.3 Diagnostic

C'est une action qui consiste à identifier les causes probables de la défaillance ou de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de la dégradation à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité

La surveillance et le diagnostic constituent des leviers majeurs pour améliorer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'une entité [13].

a) Fiabilité

Aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité pour que l'entité accomplissant ces fonctions à l'instant 0 puisse les accomplisse à l'instant t.

b) **Maintenabilité**

Aptitude d'une entité à être remise en état par une maintenance adaptée afin d'accomplir des fonctions requises dans des conditions données. La maintenabilité, c'est la brièveté des pannes.

c) **Disponibilité**

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

d) **Sécurité**

Aptitude d'une entité à ne pas causer de dommages ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

Défaillance et panne

a) **Défaillance** : C'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Une défaillance est un passage d'un état à un autre par opposition à une panne.

b) **Défaillance partielle** : Défaillance à la suite de laquelle le bien ne peut accomplir qu'une partie des fonctions requises ou ne peut les accomplir qu'avec des performances limitées.

c) **Défaillance complète** : Défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.

d) **Panne** : État d'une entité inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation.

e) **Panne complète** : Une panne résulte d'une défaillance complète.

Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation d'une entité à accomplir sa fonction, elle est déclarée en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance [13].

Choix de méthode de maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du

matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production [14].

Application de la maintenance sur la propulsion hybride navale

En raison des longues distances parcourues par ces navires à grosse charge, les types de maintenance utilisés sont la maintenance préventive et la maintenance corrective et la plus part des défaillances sont issues, soit du moteur thermique, soit du moteur électrique.

Maintenance du moteur diesel

Le moteur Diesel est un système complexe composé de différents sous-systèmes. En effet, la complexité des moteurs diesel modernes contrôlés par l'électronique, avec un nombre croissant de capteurs et d'actionneurs, nécessite des systèmes de mesure et de diagnostic améliorés et automatisés, à bord des moyens de transport utilisant ces moteurs. La surveillance appropriée et la détection précoce des défauts nécessite de disposer de bons modèles de fonctionnement des composants, puisqu'il est impossible de prédire par une analyse simple l'effet d'un défaut sur les paramètres mesurés du moteur [15].

Les paramètres habituellement mesurées, sont les températures de gaz d'échappement et les diagrammes de pression du cylindre [15]. Mais même avec ces mesures, il est extrêmement difficile dans de nombreux cas d'identifier l'origine des défauts car tous ces paramètres peuvent avoir un effet similaire. Dans ce cas la maintenance préventive est un choix très efficace pour éviter le maximum de ces pannes avant qu'elles se produisent.

Symptômes et maintenance

Les anomalies courantes rencontrées dans la propulsion hybride navale sont entre autres [16]:

a) Manque de puissance du moteur

Plusieurs causes peuvent d'être derrière le manque de puissance du moteur, y parmi, Circuit d'alimentation défectueux, Filtre à gasoil colmaté, Injecteurs défectueux, Calage de la pompe...

b) Le moteur chauffe

Le moteur chauffe et le système de refroidissement dissipe cette chaleur dans l'air ambiant. Si elle atteint l'ébullition du liquide de refroidissement, c'est la surchauffe.

c) Le moteur ne crache pas d'eau par l'échappement humide

En cas de température élevée, il se peut que la pompe de refroidissement eau de mer est désamorcée après remise à l'eau du bateau d'où la nécessité de vérifier la vanne de prise d'eau ou vérifier la pompe de refroidissement. Dans le cas de dégradation du système de refroidissement, il faut vérifier le filtre eau de mer s'il est sale d'où la nécessité de le nettoyer ou de le changer ou bien de vérifier si la turbine de la pompe à eau est abimée

d) Le moteur hoquette et cale

Parmi les causes les plus fréquentes de cet incident est la présence des composants étranges dans le gazole, pour cela il faut toujours s'assurer que le gasoil utilisé est complètement pure.

e) Le moteur démarreur ne tourne pas

L'un des problèmes qu'on peut éviter tout simplement grâce à la maintenance préventive et la vérification du système de démarrage avant chaque navigation. Il faut vérifier l'alternateur et les batteries de démarrage.

f) Le moteur ne démarre pas

Après l'arrêt du moteur, on peut se trouver dans une situation où le moteur ne démarre plus. Les causes probables de cet incident sont dues à la manette de commande, présence d'air dans l'alimentation, présence d'eau ou d'impuretés dans le carburant. Pour y faire face, il faut purger au niveau du filtre à gasoil et au niveau de la pompe d'injection, si ca ne démarre toujours pas, il faut purger au niveau des injecteurs.

g) Mauvaise combustion

Si la fumée dégagée vire vers le noir, donc c'est un signe d'une mauvaise combustion, il faut donc intervenir le plus rapidement possible.



Figure II.1 : Émission de fumée noire [5]

Dans le cas d'émission de fumée noire ou de perte de puissance du moteur, il faudrait vérifier le filtre à air et l'échappement, les injecteurs ou bien dans le pire des cas un mauvais calage de la pompe d'injection [12].

h) Le moteur brûle de l'huile

Un tel incident peut être le résultat d'un vrai défaut dans le moteur, et provoque lui-même d'autres problèmes à éviter. Dans ce cas la fumée dégagée vire vers une couleur grise ou bleue. Si la pompe d'injection et les injecteurs sont bien réglés, il faut vérifier le niveau de l'huile dans le carter avant de s'alarmer sur le sort des cylindres ou des segments.

i) Vapeur d'eau

Si le moteur émet une fumée blanche, il faut vérifier au niveau de l'échangeur ou du coude d'échappement ou bien encore du joint de culasse.

Maintenance du moteur électrique

Étude statistique des pannes du moteur électrique

Les défaillances peuvent être électriques, mécaniques, thermiques ou bien encore magnétiques. Une étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) en 1995 donne des résultats qui sont présentés sur la figure (IV.2) [17].

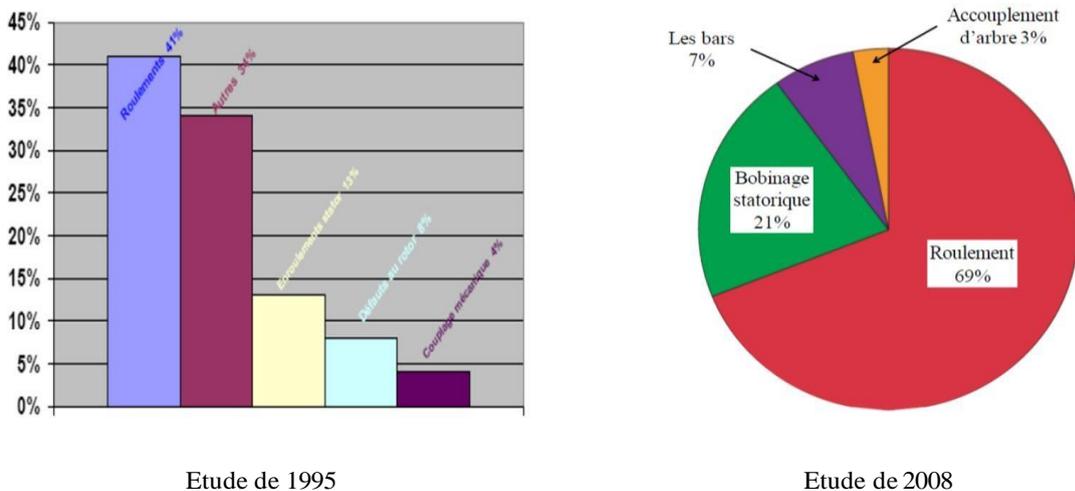


Figure II.2 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

Une autre étude statistique effectuée en 2008, sur des MAS de grande puissance travaillant dans l'industrie pétrochimique. Le résultat de cette enquête montre que 69% de défauts se situent dans les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% aux accouplements d'arbre [17].

Chapitre II Maintenance des navires à fort tonnage à propulsion hybride

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines, ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

Défauts internes et externes

Les origines des défauts sont diverses : thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental et les figures (II.3) et (II.4) résument les différents défauts.

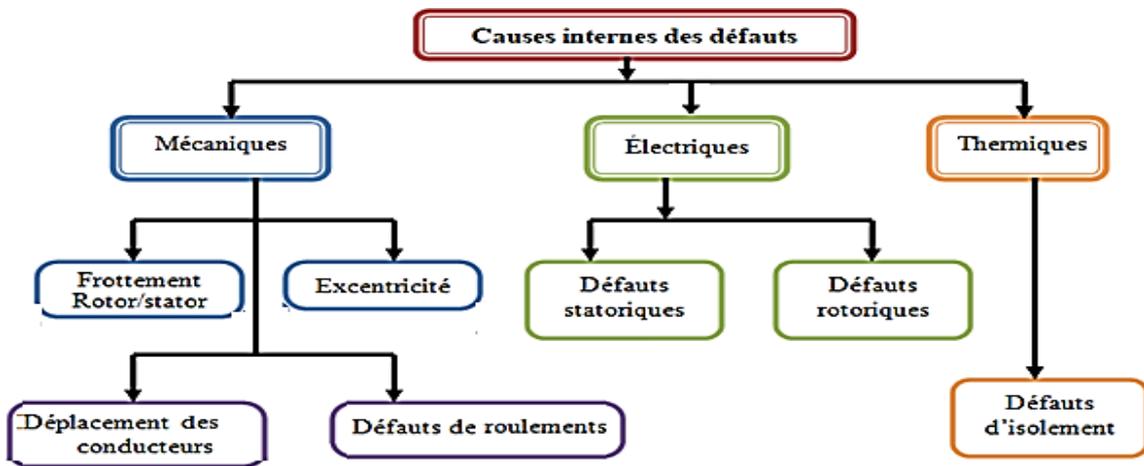


Figure II.3 : Causes internes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

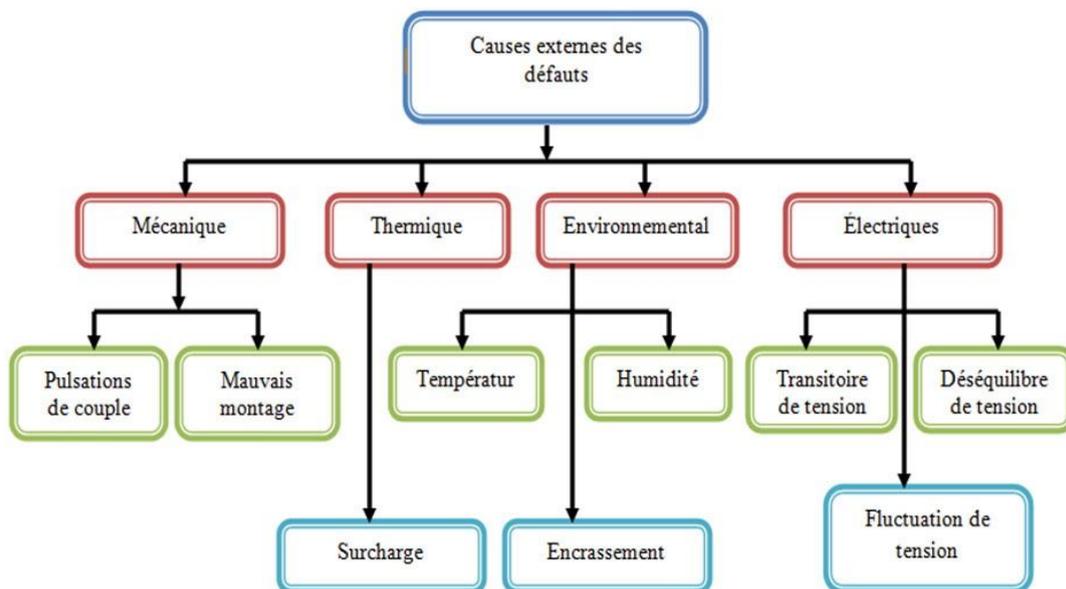


Figure II.4 : Causes externes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

Type de défauts

a) Défaillances au stator

Les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage) et environnemental (agression,...etc.).

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être des défauts d'isolant dans un enroulement, un Court-circuit entre spires, un court-circuit entre spires, un court-circuit entre phases-bâti ou un court-circuit phase-bâti [18].

b) Défauts de rotor

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, ce qui provoque des défauts thermiques, électromagnétiques, résiduels (déformation), dynamiques (arbre de transmission) et mécaniques (roulement). Les défauts qui sont les plus récurrents sont la rupture de barres et d'anneaux, l'excentricité statique et dynamique [18].

c) Défaillances mécaniques

Une dégradation au niveau des roulements peut être un défaut fréquent. Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [18].

Symptômes et maintenance

a) Le moteur ne démarre pas

Dans le cas d'un moteur hybride le problème peut venir de la génératrice ou du moteur thermique. Les causes probables est la coupure de l'alimentation due soit à la génératrice ou au moteur thermique [19].

b) Le moteur ronfle et absorbe beaucoup de courant

La consommation excessive du courant peut être un signe d'un vrai problème du moteur observé lors d'un bobinage défectueux ou un rotor qui frotte. [19]

c) Le moteur chauffe

L'échauffement du moteur peut détruire certains de ses composants ou diminuer leurs durées de vie, il faut donc agir vite. [20]

d) Le moteur démarre à vide et cale dès qu'on le charge

Les raisons les plus probables sont une coupure dans le circuit rotorique bobiné, une coupure dans le rhéostat, un mauvais contact des balais, une coupure dans le rotor à cage ou une baisse de tension du réseau d'alimentation

e) Vibrations et bruits divers

Les vibrations peuvent être un signe d'un vrai problème au moteur, grâce à l'analyse vibratoire on peut définir l'état de notre moteur en mesurant la vitesse de vibration et en calculant le niveau global des vibrations. Les causes peuvent être un mauvais état des roulements, un balourd dans le rotor, un frottement rotor contre stator ou bien encore un corps étranger dans l'entrefer. [20]

f) Echauffement des roulements

L'échauffement des roulements peut être détecté par la méthode de mesure par infrarouge. Cet incident est causé par un manque de graissage, un mauvais état des roulements ou un mauvais alignement de l'accouplement. [20]

g) Echauffement des coussinets

L'échauffement des coussinets peut être détecté par la méthode de mesure par infrarouge. Les raisons peuvent être un manque d'huile, un blocage de la bague de graissage ou un mauvais alignement de l'accouplement. [21]

Fortes vibrations de l'appareil propulsif accompagnées de perte de puissance

Les vibrations de l'appareil propulsif accompagnées de perte de puissance sont parmi les incidents les plus fréquents qu'on ne peut pas négliger, un tel incident peut être un signe d'un vrai problème ou il faut intervenir immédiatement.

Tableau (II.1) : Causes des fortes vibrations de l'appareil propulsif [22]

Causes probables	Remèdes
Cordage ou sac plastique pris dans l'hélice	Rentrer à très basse vitesse, ralenti et vérifier l'état de l'hélice.
Hélice cassée ou ébréchée	
Arbre d'accouplement génératrice-moteur thermique	Vérifier l'arbre d'accouplement.

Maintenance du système de refroidissement

Dans le cas d'un système de refroidissement défaillant, la première chose à faire est d'identifier précisément la panne. Pour cela il vaut mieux de faire un diagnostic automatique qui se fait à l'aide des différents capteurs présents dans le système moteur pour avoir un code défaut.

Un circuit de refroidissement défectueux peut donc entraîner de graves problèmes de surchauffe, ce qui peut ensuite provoquer un dysfonctionnement de nombreuses pièces mécaniques et électriques... [23].

Tableau (II.2) : Causes de surchauffe [23]

Causes probables	Remèdes
Absence d'eau douce dans le réservoir gravitationnel	Vérifier et surveiller le niveau d'eau douce dans le réservoir.
pompe à eau défectueuse	Vérifier le circuit d'eau de mer.
fuite dans les tuyauteries d'eau	Diagnostiquer la pompe à eau et la pompe à l'huile.
Blocage du circuit d'eau de mer	vérifier et surveiller le niveau d'huile de lubrification qui participe également à la réfrigération
Huile insuffisante dans le circuit d'huile	Vérifier les tuyauteries d'eau
Pompe à huile défectueuse	Vérifier les filtres (d'eau, d'huile)
Sonde de température défectueuse	Diagnostiquer la sonde de température

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner une idée générale sur les notions de sûreté de fonctionnement, et les défauts les plus fréquents des deux moteurs principaux de la constitution du moteur hybride des navires à fort tonnage, ainsi que les solutions et les recommandations à suivre afin de pouvoir appliquer une maintenance réussie, et les types de maintenance à suivre.

Il est à noter que le domaine de maintenance des navires à fort tonnage est plus vaste, ce qui nécessite des études plus approfondies à faire à l'avenir, afin d'assurer une navigation plus rassurante.

CHAPITRE III

CARACTÉRISTIQUES DU NAVIRE TESSALA

Introduction

Après avoir passé en revue, dans le précédent chapitre, les bases théoriques des propulsions, de leurs modes de fonctionnement, de leurs différents types en citant les avantages et les inconvénients de chacun. Nous procéderons, dans le présent chapitre, à une étude du cas d'un navire méthanier algérien doté d'une propulsion hybride de type « série ». Ce navire est rattaché à la compagnie Hyproc SC.

Présentation du navire

Le navire Tessala, un GNL battant pavillon algérien, fleuron de la flotte, a été construit en 2016 par le chantier naval Sud-Coréen Hyundai. Equipé d'une technologie première en Algérie. C'est un méthanier de 291m de long pour 46 m de large et un tirant d'eau de 9,1m, avec une vitesse de croisière de 12.5 nœuds et une vitesse maximale de 22 nœuds. [2]



Figure III.1 : Le méthanier Algérien TESSALA [24]

Caractéristiques du navire méthanier TESSALA

Tableau III.1: Caractéristiques du navire méthanier TESSALA[2]

IMO	9761243	Indicatif d'appel	7 TGI
Nom	TESSALA	Drapeau	Algérie(DZ)
Type de navire générique	Danger pour les pétroliers D (Reconnaissable)	Longueur totale × Largeur extreme	291 × 46 m
Type de navire détaillé	Méthanier	DWT d'été	94 575 t
Statu	Actif	Jauge brute	112 867
MMSI	605076060	Année de construction	2016

Principe de fonctionnement du Diesel-électrique

La propulsion est de type hybride « série ». Les moteurs thermiques alimentés en Gaz et MDO entraînent des génératrices, ces dernières fournissent l'énergie électrique nécessaire pour la propulsion et les autres accommodations du navire. Notons que la propulsion est de type hybride « série ». Sur la chaîne propulsive, l'énergie produite est abaissée par un transformateur puis traitée et régulée par un convertisseur de fréquence afin d'alimenter les moteurs électriques de propulsion. [5]

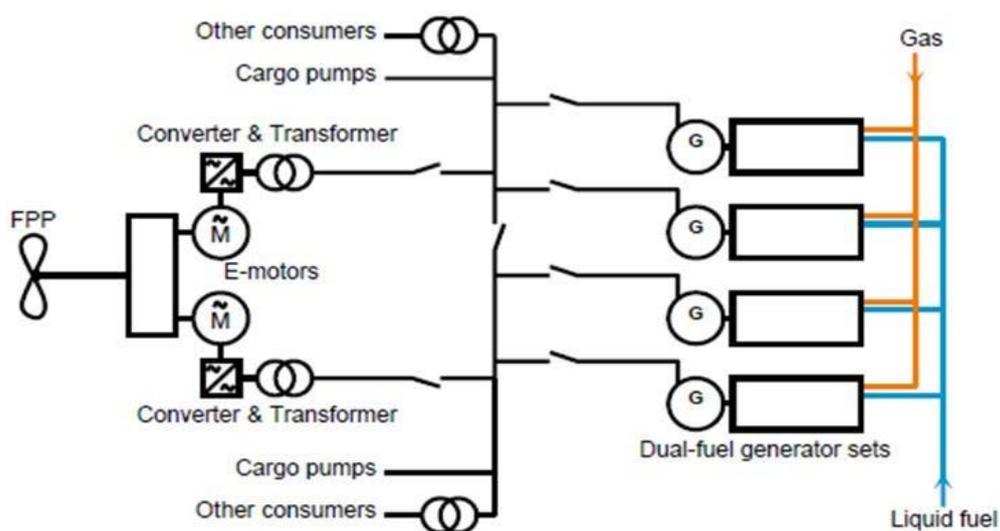


Figure III.2: Schéma simplifié du processus de propulsion du moteur Diesel-électrique. [2]

La chaîne propulsive du navire

Nous allons élaborer chaque partie, chaque élément de la chaîne propulsive, des moteurs générateurs aux moteurs électriques, afin d'éviter toute redondance, nous allons évoquer uniquement les éléments qui conduisent à la propulsion du navire.

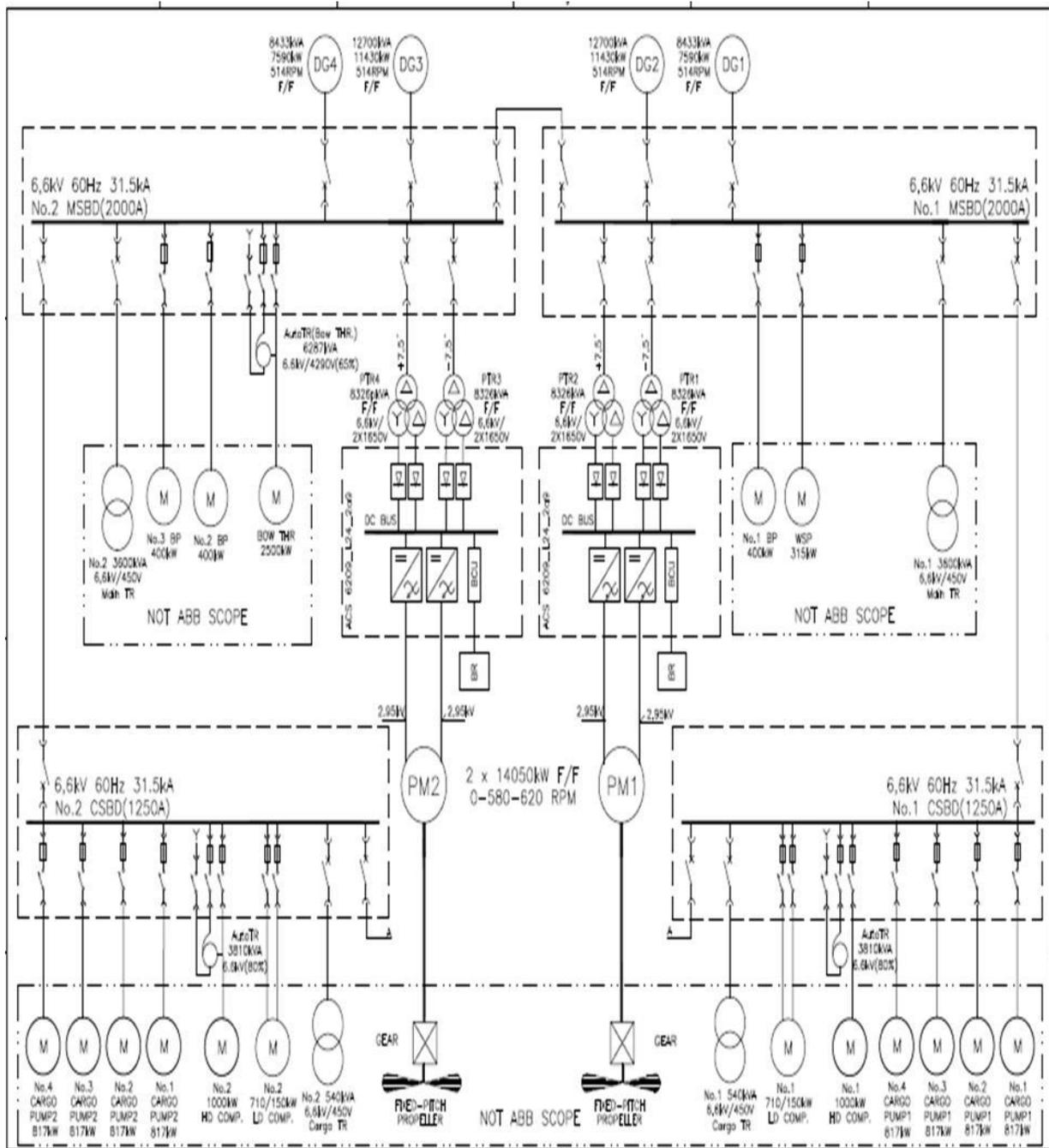


Figure III.3: Schéma réel de la chaîne propulsive du navire "Tessala"[2]

Moteur Diesel à bord

Il existe à bord quatre Diesel-Générateur couplés à des générateurs électriques, les premier et quatrième moteur ont de type Wartsila-Hyundai 8L50DF développant 7800kW, les deuxième et troisième moteurs, quant à eux, sont de type Wartsila-Hyundai 12V50DF et développent 11700 kW. Tous les moteurs fonctionnent en mode Diesel (MDO) ou gaz, le choix du mode de fonctionnement est dicté par l'IAS (Integrated Automation System). Les quatre moteurs sont turbocompressés et sont à injection directe [22].

a) Moteurs Wärtsilä-Hyundai 12V50DF x 2 (No.2 & 3), 8L50DF x 2 (No.1 & 4)

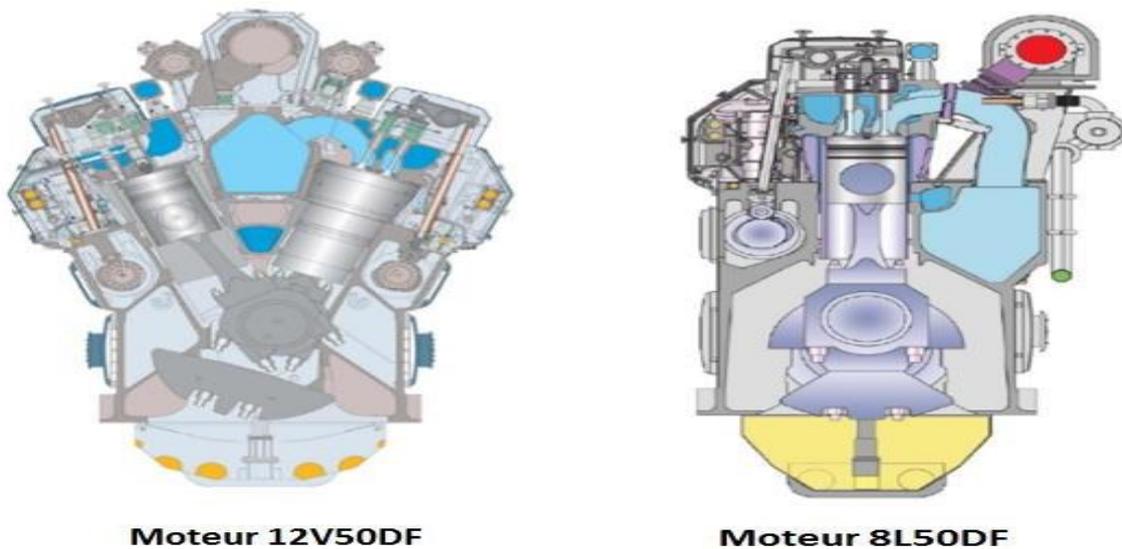


Figure III.4: Vue transversale des deux moteurs 12V-8L [22]

b) Caractéristiques techniques des moteurs Diesel à bord

- Moteur - générateur

Tableau III.2 : Caractéristiques générales des moteurs de bord [2]

	Unité	12V50DF	8L50DF
		Gaz	Diesel
La vitesse du moteur	Tr/min	514	514
Puissance de sortir du moteur	KW	11700	7800
Alésage du cylindre	mm	500	500
Course du cylindre	mm	580	580
Pression moyenne efficace	Bar	20.0	20.0
Vitesse moyenne du piston	m/s	9.9	9.9

- **Système d'air de combustion**

Tableau III.3: Système d'air de combustion des moteurs à bord [2]

	Unité	12V50DF		8L50DF	
		Gaz	Diesel	Gaz	Diesel
Débit, 100% de charge	Kg/s	18.3	22.5	12.2	15.0
Température à l'admission du turbocompresseur, max.	° C	45	45	45	45
Température après le refroidisseur d'air, nom(TE 601)	° C	45	50	45	50

Remarque: Au gaz, le pouvoir calorifique inférieur (LHV) 49620 KJ/kg.

- **Consommation de carburant**

Tableau III.4: Consommation du carburant en fonction de la charge [2]

	Unité	12V50DF		8L50DF	
		Gaz	Diesel	Gaz	Diesel
Consommation d'énergie totale à 100% de charge	kJ/kWh	7296	-	7296	-
Consommation d'énergie totale à 75% de charge	kJ/kWh	7620	-	7620	-
Consommation d'énergie totale à 50% de charge	kJ/kWh	8258	-	8258	-
Consommation de gaz combustible à 100% de charge	kJ/kWh	7258	-	7258	-
Consommation de gaz combustible à 75% de charge	kJ/kWh	7562	-	7562	-
Consommation de gaz combustible à 50% de charge	kJ/kWh	8153	-	8153	-
Consommation de fioul à 100% de charge	g/kWh	1.0	189	1.0	189
Consommation de fioul à 75% de charge	g/kWh	1.5	192	1.5	192
Consommation de fioul à 50% de charge	g/kWh	2.4	204	2.4	204

- **Système de gaz de combustible**

Tableau III.5 : Caractéristiques d'admission [2]

	Unité	12V50DF	8L50DF
		Gaz	Gaz
Pression de gaz à l'entrée du moteur, min.	barA	4.72	4.72
Pression de gaz à l'unité de soupape de gaz, min.	barA	5.92	5.92
Température du gaz avant l'unité de soupape de gaz.	° C	0-60	0-60

- **Système Air de démarrage**

Tableau 6: Caractéristiques de l'air de démarrage [2]

	Unité	12V50DF		8L50DF	
		Gaz	Diesel	Gaz	Diesel
Pression, nom. (PT 301)	bar	30	30	30	30
Pression au moteur au démarrage, min. (20°C)	bar	10	10	10	10
Pression, max. (PT 301)	Bar	30	30	30	30
Limite inférieur de pression dans les bouteilles d'air de démarrage	Bar	18	18	18	18
Consommation pour un démarrage à 20 °C (démrriage réussi)	Nm 3	6.0	6.0	6.0	6.0
Consommation pour un démarrage à 20 °C (avec Slowturn)	Nm 3	7.2	7.2	5.8	5.8

Générateurs

Quatre Diesel-générateurs principaux sont fabriqué par HYUNDAI-ELECTRIC et placés chacun avec son moteur, à fréquence de 60 Hz, et une rotation de 514 tr/min ainsi que 14 pôles chacun, ils offrent une puissance réactive de 12700 kVA ainsi qu'une intensité de 1111 A pour les Diesel-générateurs 2 et 3, et 8400 kVA pour une intensité de 735 A pour les Diesel-générateurs 1 et 4, avec une tension alternative de 6600 V. Ces Diesel-Générateurs sont des machines synchrones, circuit ouvert, et refroidis en boucle fermée, les machines ont un exciteur monté sur l'arbre sur le côté intérieur du bouclier d'extrémité sans entraînements. Le courant alternatif triphasé qu'ils génèrent est rectifié et alimente l'enroulement du rotor de la machine principale. [2]

Transformateur

Le transformateur de propulsion sert à abaisser la tension de 6600V à 1650V, pour les besoins des éléments propulsifs, hormis son utilité de transformation, il sera aussi d'isolant et de protection électrique des appareils en aval.

La surveillance la température de fonctionnement du transformateur est impérative. Le dispositif de surveillance de la température doit arrêter le transformateur si la température de déclenchement est atteinte. [2]



3 – Phase – Transformer

Type : RESIBLOC®	No. : 14220151060-01	IEC 60076-11
Rated power :	8326 // 4163 / 4163	kVA
Rated voltage :	6600 // 1644 / 1650	V
Rated current :	728,3 // 1462 / 1457	A
Year of manuf. :	2015	Vector group : D(+7,5')yn11d0
Frequency :	60 Hz	Total weight : 13,6 t
Protection class :	IP44	Impedance : *) %
Type of cooling :	AFWF	Dur. of sh.-cir. max. : 2 s
Winding material :	Al//Al/Al (HV/LV)	Sym. short-circ. cur. : 6,1//15,4/15,3 kA
Insulation class :	F//F/F (HV/LV)	
Max. system voltage :	7,2 // 3,6 / 3,6	kV
Insulation level :	LI 60 AC 20 // LI 40 AC 10 / LI 40 AC 10	kV
Environmental-/Climatic-/Fire Class :		E2/C2/F1
Ambient temp. max.	50 °C	
Lloyd's Test HAM 1572457-1	10.	15

Figure III.5 :Fiche technique du transformateur de propulsion [2]

Convertisseur de fréquence

Du fabricant ABB, L'ACS 6300 est un convertisseur de fréquence à source de tension pour les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones à haute puissance. Le variateur dispose d'un bus CC commun permettant la configuration de solutions à un ou plusieurs moteurs. Le variateur est constitué d'unités d'armoire standard et optionnel e. Chaque unité est dédiée à une fonction spécifique.

Les éléments de base sont active rectifier unit (ARU), line supply unit (LSU), capacitor bank unit (CBU), un système de refroidissement water (cooling unit WCU) et un control unit (COU). [2]

- **A- Water Cooling Unit (WCU)**

Le système de refroidissement par eau en boucle fermée transfère les pertes de chaleur des principaux composants électroniques de puissance du (par exemple, ponts redresseurs, modules de phase onduleur, condensateurs de liaison CC) vers l'extérieur. [2]

Les pompes redondantes font circuler le liquide de refroidissement à travers les tuyaux d'alimentation (1) vers les composants électroniques de puissance et transférer les pertes de chaleur à travers les tuyaux de retour (2) et l'échangeur de chaleur eau-eau (2).

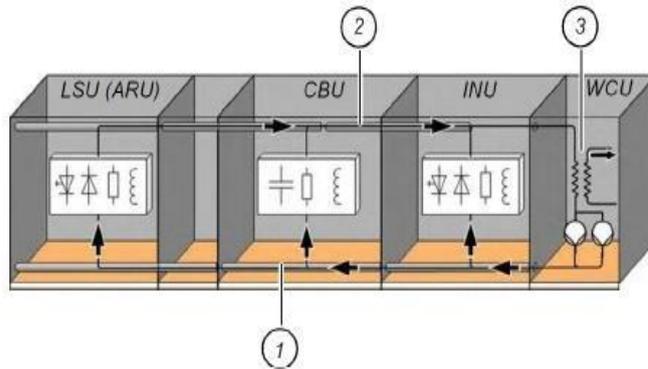


Figure III.6 : Schéma global du convertisseur de fréquence ABB [2]

▪ B- Control Unit (COU)

L'unité de contrôle (COU) intègre le matériel pour les fonctions de contrôle, de surveillance et de protection du variateur, ainsi que interfaces de communication avec le panneau de commande local et matériel de contrôle à distance. Selon le concept de commande du système d'entraînement, le matériel de contrôle à distance comprend un système de contrôle de niveau supérieur et / ou des postes opérateurs distants. Le nombre de COU dans le lecteur dépend de la configuration et l'application du lecteur. [2]

Résistances de freinage de propulsion et dispositifs de protection

a) Capteurs de température

Avant le déblocage, les signaux de température du PT100 doivent être vérifiés. Le déblocage n'est autorisé que pour les signaux de température $< 70\text{ °C}$. Si les capteurs de température PT100 indiquent une température supérieure à 70 °C même après la période de refroidissement (blocage), c'est une indication pour un système de refroidissement par air insuffisant. [2]

b) Protection contre les surintensités

L'unité de résistance est conçue pour résister à max. courant de crête de 880 A. La protection contre les surintensités doit être assurée par la commande/protection du système de propulsion. Si des valeurs de courant supérieures à 880A sont détectées, l'unité de résistance doit être éteinte immédiatement. [2]

Moteur électrique

Incontestablement considéré comme la pièce maîtresse de l'équipement propulsif, élément critique très surveillé. Le moteur électrique indique à la fois la fin de la chaîne énergétique mais également le début des résultats de tout un processus électromécanique, c'est l'un des derniers éléments qui précède le processus de rotation de l'hélice. [2]

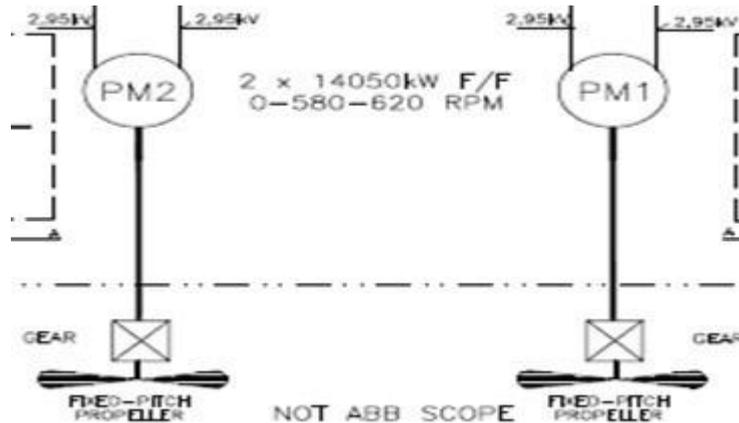


Figure III.7 : Emplacement du moteur électrique dans la chaîne propulsive [2]

C'est un moteur de propulsion de type Asynchrone à cage d'écureuil. Il est conçu pour un fonctionnement à vitesse variable, et est alimenté par un convertisseur de fréquence.

Deux moteurs de propulsion sont présents, chacun avec une entrée d'entraînement pour le réducteur. Ceux-ci sont situés dans le plancher de la salle des machines. La sortie du réducteur entraîne l'arbre de l'hélice et l'hélice à pas fixe. Avec 3000 V et une fréquence de 49 Hz à 585 tr/min, le moteur délivre une puissance de 12850 kW avec un rendement de 89%.

Maker:	ABB
Type:	AMI 1000X10L BSFTMIM
Type unit:	Squirrel cage motor
No. of sets:	2
Rated output:	12850 kW
Voltage:	3000 V
Frequency:	49 Hz (max. 54.5 Hz)
Speed:	585 rpm (max. 650 rpm)
Current:	2830 A (max. 2842 A)
Power factor:	0.89
Efficiency:	97.7 %
Method of cooling:	IC 86W
Cooling water temperature:	38 °C (max. 50 °C)

Figure III.8 : Caractéristiques technique du moteur électrique de propulsion [2]

La lubrification du moteur électrique de propulsion est garantie par deux unités de lubrification à bord, une par moteur de propulsion. Chaque l'unité de lubrification comprend deux pompes de lubrification, une en service, une en stand-by, une pompe élévatrice pour palier, pas de redondance et une pompe autoélévatrice pour roulement, pas de redondance.

Les refroidisseurs sont équipés de compensateurs pour empêcher le transfert de vibration entre le refroidisseur et le système de tuyauterie [2].

Pour la mise en marche du moteur électrique de propulsion, il faut éteindre le chauffage d'appoint, activer le système d'huile de lubrification séparé pour les paliers lisses, ouvrir l'alimentation en eau pour le refroidisseur air-eau, mettre en marche le moteur du ventilateur pour l'unité de ventilation, fermer le disjoncteur du stator et enfin mettre en marche. [2]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu étudier, plus en détail, les appareils à l'origine de la propulsion du navire hybride « Tessala ». Cette dernière, s'avère être différente de la propulsion conventionnelle, à bien des égards, aussi elle a fait l'objet d'une étude détaillée sur le principe de fonctionnement de sa chaîne propulsive.

CHAPITRE IV

ETUDE COMPARATIVE ET MODÉLISATION

Introduction

Les règles et les exigences en matière de pollution atmosphérique sont en vigueur et généralisées depuis 2005.

La propulsion diesel-électrique qui fait l'objet de notre étude, est-elle une alternative crédible, respectueuse de l'environnement ?

Voilà les questions auxquelles nous essayerons de répondre dans ce chapitre. Nous allons proposer une étude comparative par calcul de l'indice de la conception de l'efficacité énergétique EEDI pour deux différents systèmes de propulsion (Un moteur diesel électrique de dual fuel et un moteur diesel conventionnel), en appliquant la méthodologie de calcul de EEDI.

Le calcul est effectué par un programme fortran. Les mêmes conditions de voyage, de distance, de vitesse d'avancement, LBP, DS, BS, WT, GT, V_{réf}, VW et déplacement sont pris pour les deux navires, et avec les caractéristiques SFCMEPF, SFCMEG et SFCAE différentes, en vue de mesurer et d'évaluer la réduction des émissions de CO₂ des activités d'exploitation sur les navires.

L'indice de la conception de l'efficacité énergétique EEDI

EEDI est un outil de mesure de l'efficacité énergétique qui s'applique dans le domaine du transport maritime dans le but de mesurer et d'évaluer la réduction des émissions de CO₂ des activités d'exploitation sur les navires tels que l'équipement et les moteurs. De plus, il s'agit d'un indice pour évaluer l'efficacité des équipements en utilisant un calcul.

D'autre part, l'Organisation Maritime Internationale a également établi une série de règlements sur la gestion de l'efficacité énergétique des navires grâce à EEDI pour la conception de nouveaux navires, "EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator)" pour les navires existants, et "SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan)" pour tous les navires avec 400 tonnages bruts au-dessus.

Une quantité d'émission de gaz de CO₂ par kilomètre de capacité du navire doit être aussi faible que possible. Cela conduit à ce que l'EEDI diminue la valeur significative, créant ainsi des navires plus éco énergétiques. [23]

La formule générale du calcul EEDI est indiquée ci-après:

$$EEDI = \frac{\text{émission de CO}_2}{\text{Travail de transport}} \quad (\text{IV.1})$$

D'une manière générale, EEDI est principalement une quantité d'émissions de gaz CO₂ provenant de nouveaux navires divisée par son transport de capacité de cargaison.

Tableau IV.1 : CF (t-CO₂ / t-Fuel) pour chaque type de combustible.

Type du combustible	Référence	Teneur en carbone	CF(t-O ₂ /t-combustible)
1-Diesel/Gas-oil	ISO8217classesDMXàDMB	0,8744	3,206
2-Fuel-oil léger(LFO)	ISO8217classesRMAàRMD	0,8594	3,151
3-Fuel-oil lourd(HFO)	ISO8217classesRMEàRMK	0,8493	3,114
4- Gaz de pétrole liquéfié(GPL)	Propane Butane	0,8182	3,000
		0,8264	3,030
5-Gaz naturel liquéfié(GNL)		0,7500	2,750
6-Méthanol		0,3750	1,375
7-Éthanol		0,5217	1,913

Le (EEDI) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$EEDI = \frac{CO_{2\text{ système de propulsion}} + CO_{2\text{ Auxiliaire}} - \text{réduction des émissions de CO}_2}{DWT \times \text{Vitesse}} \quad (\text{IV.2})$$

Modélisation du moteur diesel

Sous-système d'alimentation et de combustion du moteur diesel

Pour le premier sous-système associé à la suralimentation et la combustion, quelques hypothèses doivent être préalablement posées dont les modèles thermochimiques et thermodynamique resteront implicites et la composition chimique du combustible, qui influence leur capacité d'ignition, ainsi que la dynamique d'alimentation d'air dans le moteur sont considérées constantes. Les calculs du taux de variation de combustible, du débit

massique, du rendement indiqué et du couple moyen effectué sur l'arbre modéliseront l'alimentation et la combustion du moteur diesel.

Le taux de combustible effectif (q_{eff}) dépend du taux d'entrée de combustible (q_d), puis des dynamiques de l'actionneur et du processus de combustion (Uhlen 1994).

$$q_{eff} = \frac{e^{-\tau_d \cdot s}}{1 + \tau_c \cdot s} \quad (IV.3)$$

Où q_d : taux d'entrée de combustible [l/s], q_{eff} : taux de combustible effectif [l/s], τ_d : délai temporel de combustion [s], τ_c : constante de temps représentant l'actionneur et le processus dynamique de combustion [s].

La puissance thermique issue des processus d'alimentation et de combustion est définie par le produit entre le pouvoir calorifique et le débit massique de combustible. La puissance mécanique déployée par le moteur équivaut à la puissance thermique multipliée par le rendement indiqué:

$$P_m = \eta_i \times P_{therm} = \eta_i \times P_{ci} \times m_f \quad (IV.4)$$

Où, le débit massique est calculé en multipliant le taux effectif de combustible par la densité du carburant qui vaut 839 kg/m³ (ou 0,839 kg/l). Pour le diesel, le pouvoir calorifique vaut 42780 kJ/kg.

En pratique, le rendement dépend du coefficient d'excès d'air qui résulte de l'effet d'alimentation de l'air et dont la valeur nominale vaut 1,2. Un excès d'air facilite le mélange entre l'air et le combustible, puis permet d'enflammer les gouttelettes non mélangées lors de l'injection. Toutefois, le taux d'entrée d'air dépend de paramètres empiriques tels que la caractéristique du mélange air-combustible souhaitée. Une adaptation de la fiche technique du moteur diesel permet d'exprimer le rendement en fonction de la puissance :

$$\eta_i = 7 \times 10^{-6} \times P_m^2 - 6.9 \times 10^{-3} \times P_m + 40.983 \quad (IV.5)$$

Pour cette expression, la puissance est exprimée en kW et le rendement en pourcentage. Cette équation ne s'applique qu'aux moteurs non suralimentés. Le couple moteur moyen équivaut à la puissance motrice divisée par la vitesse de rotation de l'arbre du moteur :

$$\Gamma_{mm} = \frac{P_m}{\omega_d} = \frac{\eta_i \times P_{ci} \times m_f}{\omega_d} \quad (IV.6)$$

Où Γ_{mm} : couple moteur moyen effectué sur l'arbre [Nm.], P_m : Puissance mécanique développée par le moteur [W], ω_d : vitesse de rotation de l'arbre du moteur [rad/ s], η_i : rendement indiqué du combustible, P_{ci} : pouvoir calorifique du combustible [kJ/kg], m_f : débit massique du combustible [kg/s].

Les expressions (IV.4) et (IV.5) permettent de dresser le profil de consommation d'un moteur diesel en particulier qui sera détaillé dans les sections suivantes. Dans le cadre de cette étude, le couple moteur équivaut au couple moyen. Cette variable représente une entrée du système de transmission mécanique du moteur diesel.

Sous-système d'entraînement mécanique du moteur diesel

La seconde partie, associée à la mécanique, modélise les contraintes appliquées au moteur et à la transmission. Le modèle mécanique tient compte de l'inertie des pièces rotatives comprises dans le moteur, le système d'embrayage, le volant d'inertie et la génératrice. Le couplage entre l'arbre du moteur et la machine synchrone se caractérise par des facteurs de rigidité k_{cd} et d'amortissement b_{cd} alors que le frottement au niveau du système d'embrayage, du volant d'inertie et de la génératrice se traduit par des facteurs d'amortissement b_d , b_c , b_{vi} et b_{gs} .

Le couple moteur Γ_m résultant de la combustion entraîne la rotation de l'arbre du moteur diesel ω_d . Il est transféré au système d'embrayage Γ_{cd} qui entraîne à son tour la rotation de l'arbre de la génératrice synchrone ω_{gs} . Ce mouvement est également contraint par le couple résistant dans l'entrefer de la génératrice Γ_r qui représente le couple de charges.

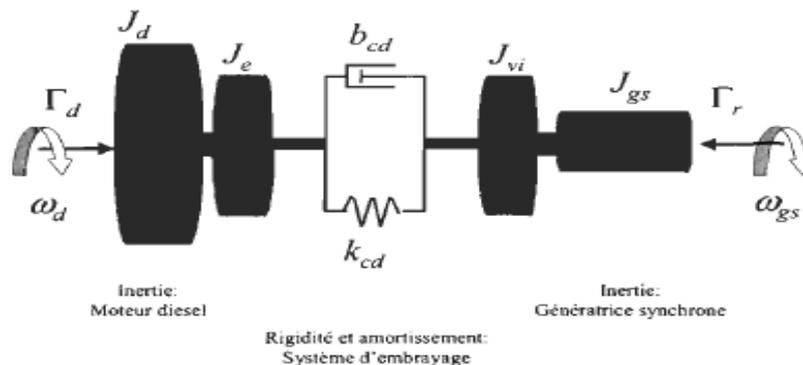


Figure IV.1 : Schéma des composants mécaniques d'un moteur diesel : Transfert de vitesse entre le moteur diesel et la génératrice synchrone [25]

Les équations suivantes représentent le système d'état :

- Couplage :

$$\theta_d = \omega_d - \omega_{gs} \tag{IV.7}$$

- Moteur :

$$(J_d + J_e)\dot{\omega} = \Gamma_m - (b_d + b_e)\omega_d - \Gamma_{cd} \tag{IV.8}$$

- Génératrice:

$$(J_{vi} + J_{gs}) \dot{\omega}_{gs} = \Gamma_{cd} - (b_{vi} + b_{gs}) \omega_{gs} \Gamma_r \quad (IV.9)$$

Où

$$\Gamma_{cd} = k_{cd} \theta_{cd} + b_{cd} \dot{\theta}_{cd} \quad (IV.10)$$

θ_{cd} : angle de torsion du couplage entre l'arbre du moteur et celui du générateur [rad]; ω_d : vitesse de rotation de l'arbre du moteur [rad/s]; ω_{gs} : vitesse de rotation du rotor de la génératrice synchrone [rad/s]; $J_d + J_e$: inertie totale du moteur diesel incluant les contributions du système d'embrayage et du volant d'inertie [Kgm²]; $J_{vi} + J_{gs}$: inertie totale de la roue d'inertie et de la génératrice synchrone [Kgm²]; $b_d + b_e$: amortissement par frottement total incluant les contributions du moteur, du système d'embrayage et de la roue d'inertie [Nms/rad]; $b_{vi} + b_{gs}$: amortissement par frottement total de la roue d'inertie et de la génératrice synchrone [Nms/rad]; k_{cd} , b_{cd} : rigidité et amortissement du couplage du groupe diesel [Nm/rad], [Nms/rad]; r_{cd} : couple transféré au système d'embrayage [Nm]; r_m : couple mécanique [Nm]; r_r : couple dans l'entrefer de la génératrice [Nm].

En résumé, le modèle mécanique du système d'embrayage permet d'évaluer la vitesse de rotation de l'arbre du moteur diesel et celle du rotor de la génératrice synchrone à partir du couple moteur et du couple électromagnétique de la génératrice.

Sous-système électrique

Le modèle électrique du groupe diesel se résume à l'évaluation du couple résistant de la génératrice synchrone en régime permanent, de la fréquence électrique et de la puissance électrique active. La demande du réseau est considérée comme purement résistive.

D'abord, l'évaluation du couple électromagnétique se base sur un modèle simplifié de la machine synchrone, celui de Behn-Eschenburg.

$$T_{em} = \frac{3P}{\omega_e} \frac{E \sin \theta}{X_s} \quad (IV.11)$$

Où ω_e représente la pulsation électrique:

$$\omega_e = \omega_{gs} p \quad (IV.12)$$

Avec p : nombre de paires de pôles; E : Tension interne générée sur une phase de la génératrice synchrone [V]; V_s : tension à la sortie d'une phase [V]; θ : angle de phase entre E et V_s [rad]; X_s : réactance du circuit équivalent pour une phase de la génératrice synchrone [Ω].

Dans ce cas-ci, le courant I_s est en phase avec V_s . Selon le schéma vectoriel pour une génératrice synchrone alimentant une charge résistive :

$$\sin \theta = \frac{X_s I_s}{E} \quad (\text{IV.13})$$

Ainsi

$$T_{em} = \frac{3 \times P}{\omega_e} \times V_s \times I_s \quad (\text{IV.14})$$

Dans cette dernière expression, la valeur du courant I_s dépend de la puissance demandée. Il est à noter que ce modèle n'est valable que si la charge est équilibrée sur les trois phases. Cette charge étant estimée purement active, elle peut être modélisée par trois résistances en parallèle. Pour un système hybride, la puissance demandée au diesel dépendra de la charge et de la puissance produite par le moteur électrique.

$$\begin{aligned} P_{diesel} &= P_{dem} \\ P_{diesel} &= 3 \times V_s^2 \times Y \end{aligned} \quad (\text{IV.15})$$

Où l'admittance Y représente la charge variable

Caractérisation des paramètres du groupe diesel

Lors de la modélisation d'un moteur diesel, plusieurs hypothèses simplificatrices peuvent être posées notamment pour définir la combustion et évaluer les pertes par frottement.

En pratique, il s'avère impossible de calculer avec précision les paramètres d'un moteur en fonctionnement. Ainsi, les caractéristiques doivent être mesurées par des essais sur un moteur fonctionnant en mode autonome. L'évaluation des paramètres du système modélisé est effectuée par rapport à des dispositifs existants.

Dans le modèle d'alimentation et de combustion, les constantes de temps sont estimées à partir de certaines caractéristiques du moteur comme la vitesse et le nombre de cylindres. D'abord, le temps mort (τ_d), ou délai de combustion, correspond à la durée entre l'instant où le taux de combustible effectif commence à varier (q_{eff}) et celui où le couple maximal est atteint à la fin du cycle.

Selon une loi empirique de Haddad et Watson, le délai de combustion est donné par :

$$\tau_d = \frac{60 S_T}{2 \Omega_d n_c} + \frac{60}{4 \Omega_d} \quad (\text{IV.16})$$

Où S_T : nombre de temps du moteur; Ω_d : vitesse de rotation du moteur [rpm] ; n_c : nombre de cylindres.

En effet, un moteur diesel peut prendre plus de 8 secondes pour démarrer. La constante de temps associée à l'actionneur et au processus dynamique de combustion (τ_c) devrait correspondre à une valeur inférieure à cette durée.

Modélisation de la machine asynchrone

Hypothèses simplifications

Pour simplifier la présentation des relations régissant le fonctionnement et la stratégie de commande du moteur asynchrone, on suppose les hypothèses suivantes

- On néglige la saturation, ce qui permet de définir les inductances.
- On ramène le rotor au stator, c'est-à-dire qu'on suppose que le rotor est triphasé comme le stator, que ses enroulements comptent le même nombre de spires.
- On suppose que les bobines du stator et du rotor sont bipolaires et que leurs phases créent des flux à répartition sinusoïdale.
- On ne tient compte que des fondamentaux des grandeurs alternatives.

Modélisation triphasé

▪ Equation électrique

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = R \cdot i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{IV.17})$$

Pour les trois phases on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée

$$[V_{abc}] = R[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (\text{IV.18})$$

▪ Equation magnétique

Chaque flux comporte une interaction avec de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

$$\begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m & l_s & m & m & m & m \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m & m & m & m & l & m \\ m^3 & m^1 & m^2 & m^r & m^r & l^r \\ 2 & 3 & 1 & r & r & r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{pmatrix} \quad (IV.19)$$

Où : l_s : est l'inductance propre d'une phase statorique ; l_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique ; m_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ; m_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques et m_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (IV.20)$$

Avec $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle du couplage stator-rotor ; θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes rotoriques et les axes statoriques qui sont choisi comme axes de référence.

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad (IV.21)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_{rabc}] + [M_{sr}][i_{sabc}] \}$$

▪ **Equation mécanique**

L'expression de l'équation mécanique est :

$$C_e = C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega \quad (IV.22)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = P \begin{bmatrix} i_{as} & i_{bs} & i_{cs} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (IV.23)$$

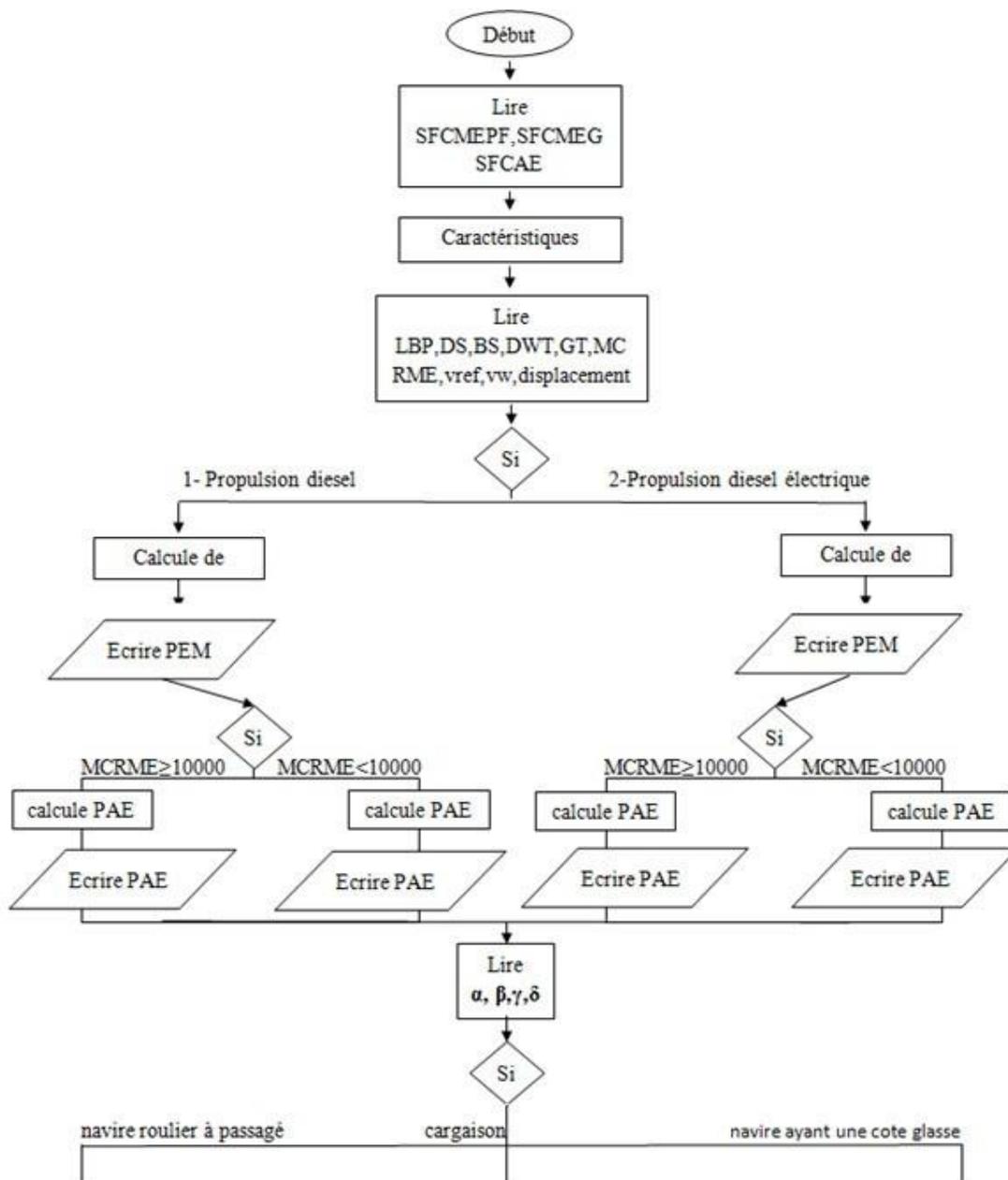
Avec J : Moment d'inertie du rotor ; f : Coefficient de frottement visqueux ; C_e : Couple électromagnétique ; C_r : Couple résistant et P : Nombre de paire de pole.

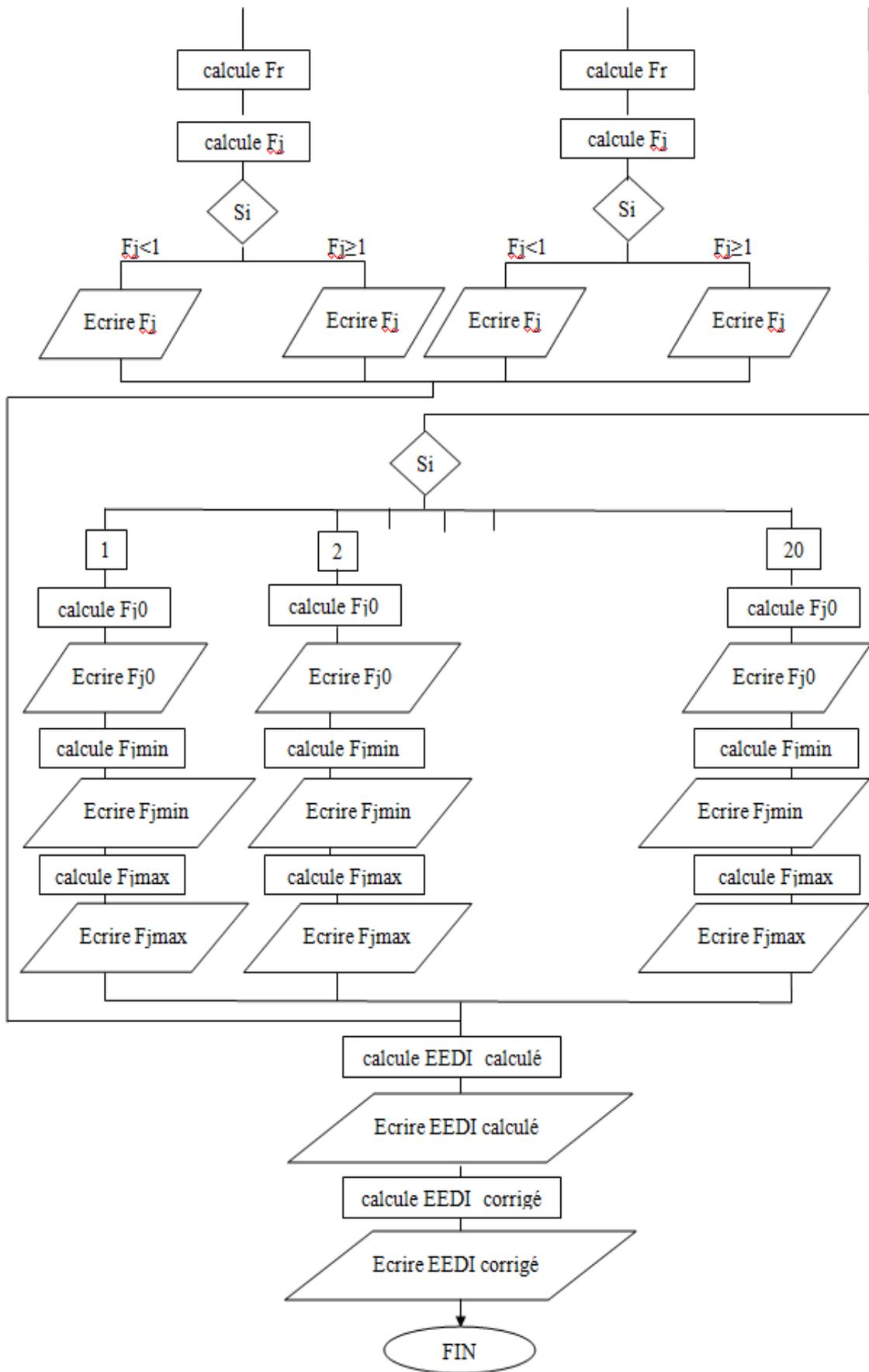
Modélisation du transformateur, du réseau et de l'onduleur

Pour les besoins de simulation, le transformateur, le réseau électrique qui peut être considéré comme l'association en série d'une résistance et une inductance avec une source de tension sinusoïdale, avec une conductance et une capacité dans le sens transversal qui sont souvent négligeables.

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement avec des interrupteurs supposés parfaits et des sources supposées parfaites.

Elaboration d'un programme fortran pour le calcul de EEDI





Résultats et discussions

La comparaison est faite entre deux navires, soit le navire « Ougarta » qui n'est que le sister-ship du « Tessala ». Le Calcul d'EEDI des deux navires est effectué en utilisant le logiciel FORTRAN.

Les résultats de calcul de l'EEDI pour les deux types de propulsion Diesel-électrique et diesel conventionnel, sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2: Caractéristiques pour deux navires ayant les mêmes performances sauf différence dans les SFCMEPF SFCMEG SFCAE.

Caractéristiques	Navire Diesel-Électrique	Navire Diesel Conventionnel
SFCMEPF	8	30
SFCMEG	140	180
SFCAE	40	80
LBP	180	180
DS	11,42	11,42
BS	30	30
DWT	27500	27500
GT	23059	23059
MSRME	10500	10500
V_{ref}	14,8	14,8
VW	12,8	12,8
Déplacement	39408	39408

Tableau IV.3: Résultats du calcul de l'EEDI après correction

EEDI	Diesel-électrique	Diesel conventionnel
Calculé	8,44	10,37
Corrigé	8,61	10,58

Après l'exécution du programme FORTRAN, on a obtenu la figure suivante :

```

D:\Veux\eedi.exe
veuillez introduire les donnees suivante
SFCMEPF,SFCMEG,SFCOE
189,0,0
*****
introduisez le donnees du navire suivantes
LBP,DS,BS,DWT,GT,MCRME,vref,vw,dspilacement
*****
284,11.77,46.6,94574.5,112867,39000,10,10,128534.5
*****
choisissez type de propulsion
1 pour diesel
2 pour diesel-electrique et TAV
*****
2
noter que MCRME superieure ou egale a 10000
*****
PME= 32370.000000
PAE= 0.000000E+00
*****
fv= 1.000000
choisissez le type du navire POUR CALCULER FJ
1 pour les navire roulier a passager
2 pour les navire roulier a cargaison
3 pour les navire ayant une cote glasse
4 pour d autre navire
4
choisissez le type du navire
1 pour navire citerne
2 navire vraquier
3 navire divrese marchandise
4 navire transport de gaz
5 porte contenaire
1
fjo= 0.000000E+00
fj= 4.884039E-01
fio= 0.000000E+00
fi= 2.168247
EEDIcalculé= 11.191200
EEDIconnige= 2.520850
Press any key to continue

```

Figure IV.2 : Résultats de EEDI obtenue par programme fortran

Les résultats de calcul pour différentes vitesses et différentes charges sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Résultats du calcul de l'EEDI en fonction de la vitesse et de la charge

Vitesse(kt)	EEDI pour 100%Dwt	EEDI pour 75%Dwt	EEDI pour 50%Dwt
1	45,3753	46,09555	48,97652
2	22,68765	23,04777	24,48826
3	15,1251	15,36518	16,32551
4	11,34383	11,52389	12,24413
5	9,07506	9,21911	9,7953
6	7,56255	7,68259	8,16275
7	6,48219	6,58508	6,99665
8	5,67191	5,76194	6,12207
9	5,0417	5,12173	5,44184
10	4,53753	4,60956	4,89765
11	4,12503	4,1905	4,45241
12	3,78127	3,8413	4,08138
13	3,49041	3,54581	3,76742
14	3,24109	3,29254	3,49832
15	3,02502	3,07304	3,2651
16	2,83596	2,88097	3,06103
17	2,66913	2,7115	2,88097
18	2,52085	2,56086	2,72092
19	2,38817	2,42608	2,57771
20	2,26877	2,30478	2,44883
21	2,16073	2,19503	2,33222
22	2,06251	2,09525	2,22621

L'évolution de l'EEDI en fonction de la vitesse est représentée dans le graphe suivant :

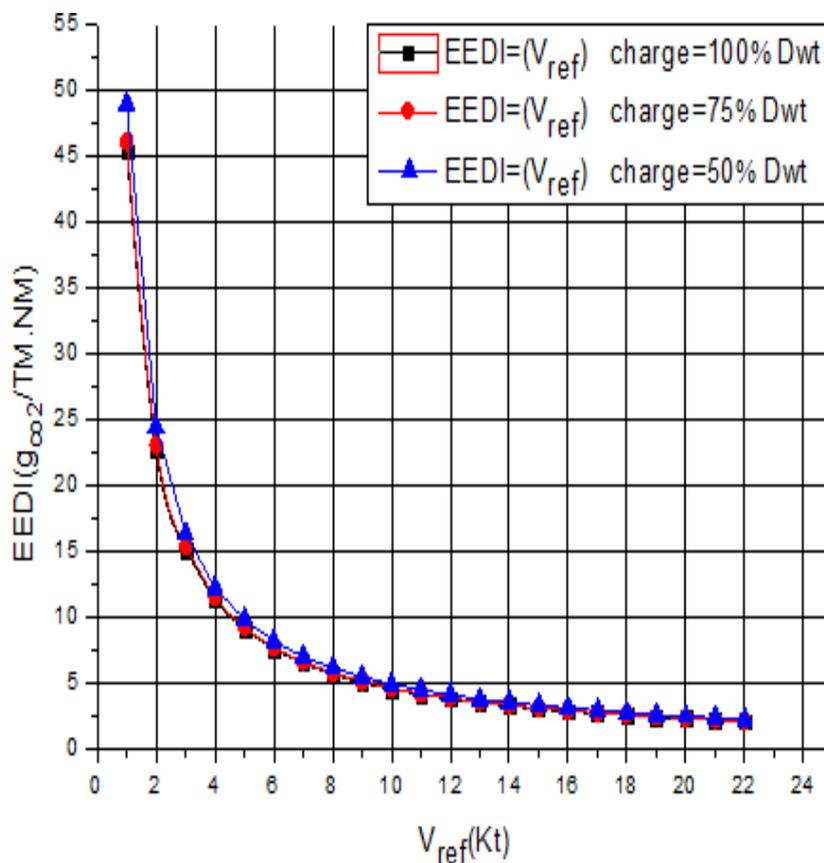


Figure IV.3: Evolution de l'EEDI en fonction de la vitesse

La figure IV.3 représente les graphes de l'évolution de l'EEDI en fonction de la vitesse référentielle pour différentes charge (DWT) du navire.

L'analyse de ces graphes montre que l'EEDI diminue avec l'augmentation de la vitesse référentielle du navire. Concernant la charge, cela influe légèrement sur le EEDI du moment que les graphes de EEDI pour différentes charges sont presque identiques.

Après calcul de l'indice EEDI pour les deux types de propulsion, on remarque que les valeurs obtenues pour le Diesel-électrique sont inférieures à celles du Diesel conventionnel, dans ce contexte on constate que la propulsion diesel électrique est plus performante et compatible afin de répondre aux exigences de MARPOL.

A cet effet, on déduit une comparaison générale entre la propulsion électrique est la propulsion mécanique.

Tableau IV.4 : Avantages et inconvénients de la propulsion mécanique par rapport à la propulsion diesel-électrique.

Avantages	Inconvénients
Réduction de la consommation de fuel.	Bruit et les vibrations au niveau de la salle des machines et la ligne d'arbre.
Propulsion mécanique délivre de très grande puissance sur tout pour les navires de fort tonnage.	Encombrement de système propulsif à cause de nombre des équipements.
Un système de simple installation par rapport à la propulsion électrique.	Manœuvrabilité difficile contrairement à une propulsion par POD.
Facilité de l'entretien des équipements de cette propulsion.	Mauvais comportement de la propulsion mécanique au faible régime.
Bon rendement puissance poids.	Maintenance excessive du système mécanique.
Diminution de cout de l'installation par rapport à la propulsion électrique.	Augmentation des pertes de puissance au niveau de différentes parties de la ligne d'arbre.
Facilité de maintenance pendant les arrêts techniques.	

Tableau IV.5 : Avantages et inconvénients de la propulsion diesl-électrique par rapport à la propulsion mécanique.

Avantages	Inconvénients
Optimisation de l'architecture des navires.	Consommation excessive du fuel
Réduction du niveau de vibrations transmis à la structure du navire.	Augmentation du cout de l'installation électrique et ça c'est grâce à l'introduction de nouvelles technologies comme la propulsion par POD.
Flexibilité de manœuvre accrue.	Propulsion électrique nécessite un haut niveau de sécurité et des précautions importantes qu'il faut tenir et ça c'est à cause du réseau haut tension.
Bon rendement hydrodynamique, en particulier à vitesse élevée.	Cout du système de maintenance est trop élevé à cause de nouveauté de cette technologie

Excellente manœuvrabilité (propulsion par POD).	Passage obligatoire en bassin en cas d'avarie du moteur électrique qui n'est pas accessible depuis l'intérieur du navire.
Réduction importante de l'encombrement et du poids des machines à bord du navire.	
Suppression de la ligne d'arbre classique, du gouvernail.	
D'un point de vue hydrodynamique, les hélices sur pod sont plus efficaces car elles ne fonctionnent pas dans la zone de turbulence de la coque. Les hélices amont (en avant du pod) travaillent dans un champ de vitesse homogène, non perturbé.	

Conclusion

La situation exceptionnelle dont le monde a dû passer à cause de la pandémie mondiale, nous a vraiment paralysé, notamment en ce qui concerne le stage pratique qui devrait avoir lieu sur un des bateaux de la flotte algérienne de commerce.

Le manque d'information techniques, notamment les caractéristiques réelles des moteurs et des générateurs, nous a privé de la partie programmation, et nous avons pu exploiter les résultats jadis trouvés.

Après avoir effectué cette étude on remarque encore une fois que la propulsion diesel électrique se démarque des autres modes de propulsions. Elle constitue donc aussi un véritable compromis avec l'écologie, et pourrait être conforme aux exigences de MARPOL.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au bout de ce travail, nous avons pu toucher les parties essentielles d'une propulsion hybride navale, par ailleurs, une étude menée sur l'aspect éco-environnemental à pu être mise en lumière

Un gain en temps, diminuer l'impacte écologique et environnemental sur lequel la réglementation MARPOL est devenue aussi stricte et sévère et ça après la catastrophe écologique et leur effet sur l'environnement ces derniers moments, diminuer le cout d'investissement et offrir une meilleure rentabilité économique dans le domaine du transport naval est devenu l'objectif désiré de tous les armateurs.

D'après ce qu'on a vu dans notre étude, la propulsion hybride demeure le meilleure choix des armateurs jusqu'à présent qui leurs offre cette possibilité d'être dans les normes imposées avec une certaine efficacité défiant les propulsions classiques, sans oublier d'autres avantages déjà cités précédemment tel que le rendement de la chaine de propulsion, aussi élevé que les concurrents, la redondance en terme d'équipement qui nous offre une navigation plus sécurisé, et une rentabilité meilleure avec un coût d'investissement raisonnable.

L'évolution des composant de l'électronique de puissance était sans doute le grand portail qui a permis a l'hybride d'atteindre le succès qu'il a eu aujourd'hui, et sa bonne réputation a l'échelle écologique et économique a fait de lui le meilleur choix que le domaine naval a eu un jour, et cela en attendant l'évolution et le développement des système de stockage d'énergie électrique qui vont nous permettre d'avoir un autonomie énergétique pour des longues durées de navigation, ainsi le développement de l'exploitation des énergies renouvelables qui vont nous permettre de générer l'énergie électrique d'une façon plus écologique.

Résumé

La propulsion diesel est un choix fréquent d'armateurs de nos jours. Malgré les nombreux avantages des moteurs diesel, leur principal inconvénient est l'émission de polluants, ainsi que la consommation excessive du carburant. Au fur et à mesure que les normes environnementales deviennent plus strictes, la question de l'alternative optimale à la propulsion diesel se pose. Le système de propulsion Diesel électrique est l'une des propositions de système de propulsion alternatif, principalement en raison de la réduction significative des émissions de polluants. Cependant, certaines analyses ont suggéré que le système de propulsion diesel-électrique pourrait encore être rentable par rapport à la propulsion diesel.

Ce travail présente des généralités sur la propulsion hybride et du diesel-électrique en particulier, de la maintenance des navires à fort tonnage à propulsion hybride, ainsi qu'une présentation du navire à propulsion hybride Algérien "TESSALA", et à la fin une comparaison des systèmes de propulsion susmentionnés, ce qui peut être utile pour la sélection optimale du système de propulsion des navires.

Abstract

Diesel propulsion is a frequent choice of ship-owners these days. Despite many advantages for diesel engines, their main disadvantage is the emission of pollutants, as well as excessive fuel consumption. As environmental standards become more stringent, the question of the optimal alternative to diesel propulsion arises. The Diesel Electric propulsion system is one of the alternative propulsion system proposals, mainly due to the significant reduction in pollutant emissions. However, some analyzes have suggested that the diesel-electric propulsion system may still be cost effective compared to diesel propulsion.

This work presents generalities on hybrid propulsion, and diesel-electric in particular, maintenance of large-tonnage hybrid propulsion vessels as well as a presentation of the Algerian hybrid propulsion vessel "TESSALA", and at the end a comparison of the aforementioned propulsion systems, which can be useful for the optimal selection of the ship's propulsion system.

ملخص

الذئع بالذئزل هو اءءءءار مءءءرر أءصءاب السءنء هءه أءءام . عءى الرءم من الءءاءءا العءءءءة لمءءركاء الذئزل ، إءل أن عءءءما الرءءسء هو اءءءاءء الءءوءاءء ، نضالً عء السءءءالك الءنرء للوءوءء. مع زءاءة صرءامه المعءاءءر البءءءءة ، نءرز مسأءة البءءءل أءءءل لءوءة الذئع بالذئزل. ءءءء نظام الذئع بالكءرءاء و الذئزل) الذئع المءءءن (أءء مءءءرءاءء نظام الذئع البءءءل ، وءرءع ذءك أسا ا إءى الأءءءاءء الكءءءر نء اءءءاءءاء الءءوءاءء. ومع ذءك ، أءءاءء بءءء الءءءءءاءء إءى أن نظام الذئع بالذئزل والكءرءاء ءء ءءل نءءالً من ءءءءءءءة مءءءءةً بءءع الذئزل.

ءءءم هءا العءمء عءوءءءاءء ءوء الذئع المءءءن ، وءراءة للذئع بالذئزل والكءرءاء عءى وءه الأءءص وءص ، صءءءة السءنء ذاءء الءءءوءة العءءءة وءءءى نءءمء بالذئع المءءءن ، بالءءءاءءة إءى عرءص نءءءءمء لسءنءءة الذئع المءءءن الءءءاءءءءءءة "سءالة" ، وءى الءءءءة مءءءءة بءن أنءءمة الذئع الءءءءوءة أءءه ، وءءى ءمءن أن نءءون مءءءة لءءءءءءء الءءءل لءءءام ذئع السءنءة.

Annexe

Annexe 1: Caractéristiques de navire de l'hyproc OUGARTA [8]

Caractéristiques	OUGARTA
SFCMEPF	189
SFCMEG	0
SFCAE	0
LBP	284
DS	11,77
BS	46.6
DWT	94574.5
GT	112867
MSRME	39000
Vref	1 à 22
VW	1 à 22
Déplacement	128534.5

Annexe 2 (L'annexe VI de MARPOL)

Adoptée en 1997, l'Annexe VI de MARPOL introduit des limites d'émission pour les principaux polluants atmosphériques provenant des gaz d'échappement des navires, y compris les oxydes de soufre (SO_x) et les oxydes d'azote (NO_x), et interdit toute émission délibérée de substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Elle régit de plus l'incinération à bord et les émissions de composés organiques volatils (COV) imputables aux navires-citernes.

Lorsque l'Annexe VI entrera en vigueur les armateurs devront s'assurer que tous les navires de 400 GT et plus, que toutes les plates-formes et plates-formes de forage se dirigeant vers des ports ou des eaux où s'applique la convention MARPOL, auront un Certificat International de Prévention de la Pollution de l'Air (IAPPC International Air Pollution Prevention Certificate) confirmant le respect des exigences de l'Annexe VI que ce soit pour le matériel ou les procédures opérationnelles. Le certificat est issu par l'État du Pavillon. Tout comme pour les autres certificats MARPOL, les États délégueront, dans la plupart des cas, la

Annexe

certification aux Sociétés de classification. Un délai est accordé aux navires en service pour obtenir le certificat nécessaire; dans ce cas la visite initiale IAPPC devra avoir lieu, au plus tard, lors du premier passage en cale sèche programmé, et dans tous les cas avant trois ans après son entrée en vigueur.

Les règles liées à la pollution atmosphérique

Règle 12 : *« Interdit l'utilisation ou le rejet de substance néfaste pour la couche d'ozone (CFCs). Les nouvelles installations utilisant des substances nocives pour la couche d'ozone sont interdites sur tous les navires; cependant les installations existantes contenant des hydro-chlorofluorocarbones (HCHCs) sont autorisées jusqu'au 1er Janvier 2020. »*

Règle 13 : *« Diminue les émissions de NOx à partir des moteurs diesel selon un code technique approprié et s'applique aux moteurs dont la puissance délivrée est de plus de 130 kW, installés ou devant subir une "conversion majeure" après le 1er Janvier 2000 (à l'exception des générateurs de secours). Les émissions de NOx à partir d'un moteur sont étroitement liées à sa conception. Les sociétés de classification en ont tenu compte depuis quelques années déjà. La qualité du combustible lui-même a un impact sur le niveau des émissions de Nox et est concerné par la règle 18. »*

Règle 14 : *« Réduit les émissions de SOx par les navires en introduisant une teneur en soufre maximale dans les combustibles marins de 4,5 %. En outre, l'Annexe VI de MARPOL définit des zones de contrôle des émissions de SOx (SECA Sulphur Emission Control Areas). Dans ces zones la teneur maximale en soufre des combustibles marins utilisés est de 1,5 %. La Mer Baltique est la seule zone définie comme SECA dans l'Annexe VI. Cependant la Mer du Nord a réussi à réunir les critères pour être déclarée SECA après l'entrée en vigueur de l'Annexe. En outre, il pourrait y avoir d'autres zones, telles que des zones dans l'Ouest des Iles Britanniques, l'Ouest du Continent Européen, les eaux côtières US, la Méditerranée en totalité ou en partie qui pourraient être proposées comme SECAs dans un avenir proche. Il résulte de tout cela que les navires pourraient être amenés à transporter plusieurs qualités de combustible et ainsi être en mesure de faire face aux problèmes pratiques potentiels en résultant. »*

Règle 15 : *« Précise que dans les ports où l'on doit contrôler les émissions de VOCs (composés organiques volatiles), le port doit s'assurer que les moyens de récupération sont disponibles. »*

Règle 16 : *« Interdit l'incinération de certaines substances, dont : les PCBs, les détritiques contenant des traces de métaux lourds, des produits raffinés contenant des composés halogènes et des résidus de MARPOL Annexe I,II et III cargaisons. »*

Règle 18 : *« Contient les normes concernant les documents requis sur la qualité du fuel oil. Le fuel oil doit être exempt d'huile inorganique, ne doit pas contenir d'additifs ni de*

Annexe

Exemples de contenu de lignes en Fortran

Organisation d'un programme FORTRAN:

Succession de < pavés > élémentaires qu'on appellera blocs fonctionnels. Il en

Existe 3 sortes :

1. Le programme principal inclus entre program (facultatif) et end

```
program nom  
...  
end
```

2. Les sous-routines incluses entre subroutine et end

```
subroutine nom (arguments)  
...  
end
```

3. Les fonctions incluses entre function et end

```
type function nom (arguments)  
...  
end
```

Programme principal

Le programme principal est obligatoirement présent. Il n'existe qu'un seul programme principal. Ce programme principal se découpe en deux parties distinctes successives détaillées ci-dessous.

- Partie déclaration

C'est dans cette partie qu'on définit les objets (type + nom) qui seront manipulés par le programme.

- Partie instructions

L'exécution d'un programme FORTRAN consiste à dérouler dans l'ordre toutes les instructions de la partie exécutable du programme principal.

Certaines instructions déroutent le pointeur de programme vers d'autres blocs fonctionnels (sous-routines ou fonctions).

Annexe

Annexe 4 : Calcul de L'indice de la conception de l'efficacité énergétique EEDI

La formule générale du calcul EEDI est indiquée ci-dessous:

- **EEDI = émissions de CO₂ / travail de transport (1)**

La Formule (1) peut être exprimée après:

- **EEDI = Engine Power.SFC.CF/dwt. Vite sse / (gCO₂ / tonne -mile) (2)**

Le (EEDI) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{EEDI} = (\sum_{i=1}^{nME} P_{me} \cdot C_{me} \cdot SFC_{me}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*}) / (Dwt \cdot V_{ref})$$

Le EEDI corrigé est exprimé par :

$$\text{EEDI}_{\text{corrigé}} = (\prod_{j=1}^{nME} f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{me} \cdot C_{me} \cdot SFC_{me}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*}) / (Dwt \cdot V_{ref} \cdot f_j \cdot f_w)$$

Cette formule est décrite et divisée en parties séparément en détail:

- $(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{me} \cdot C_{me} \cdot SFC_{me})$: Emissions de moteurs principaux.
- $(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})$: Emissions de moteurs auxiliaires.
- $V_{ref} f_w$: Technologie d'efficacité.
- $V_{ref} f_j$: Travaux de transport.

$$\text{EEDI} = \frac{(\text{CO}_2 \text{ du système de propulsion} + \text{CO}_2 \text{ de Auxiliaire} - \text{réduction des émissions de CO}_2)}{\text{DWT. la vitesse}}$$

Bibliographie

- [1] André LEDERER, EVOLUTION DE L'APPAREIL PROPULSIF DES NAVIRES», thèse de doctorat.
- [2] « Co L. Machinery Operating Manual "TESSALA3 », HYUNDAI Heavy Industries, **2016**.
- [3] L. Mazodie,. « La propulsion électrique des navires. Rev l'Electricité l'Electronique , thèse de doctorat, France, **Mars 1997**.
- [4] Y.Hideki & M.Hiroaki & S.Aiichiro, «Energy Saving Technology of the Diesel-Electric Propulsion System for Japanese Coastal Vessels», Japon, **2011**.
- [5] Alf Kåre Ådnanes, « Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion », document de ABB AS Marine,**22-04-2003**.
- [6] Omar FEDDAOUI, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables », mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, **2013-2014**.
- [7] JULIE LEFEBVRE, «Analyse mécanique d'un système éolien diesel sans stockage basé sur un bilan de puissance», thèse de doctorat, Université du Québec.
- [8] « Document de ACEC », Université catholique de Louvain, **2012**.
- [9] document pédagogique, cours association convertisseurs machine, Université de A.Mira, Béjaia.
- [10] Cours pédagogique, commande des systèmes électromécaniques, Université de A.Mira, Béjaia.
- [11] O. V. Thorsen, M. Dalva, « A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, no.5, pp.1186-1196 », **September 1995**.
- [13] Makara KHOV, «Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique»,thèse de doctorat, Université de Toulouse, **17 Décembre 2009**.
- [14] Deghboudj Samir, « maintenance des moteur diesel », mémoire de Magister, Université de Tébessa, **Mai 2006**.

- [15] Hassan Moussa Nahim « Contribution à la modélisation et à la prédiction de défaillances sur les moteurs Diesel marins Spécialité Automatique », Aix-Marseille Université, **2016**.
- [16] Y. Khelil, « Analyse des données en vue du diagnostic des moteurs Diesel de grande puissance » thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, **2013**.
- [17] Ananne Adel, «Analyse de comportement d'un moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable», Mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, **2010**.
- [18] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, **2006**.
- [19] Metatla A., Bahi T., Hadjadj I. and Medoued A, « Failure detection of eccentricity in asynchronous machin». International Conference of System and Computer, 25-27, Cairo. Egypt, **November 2008**.
- [20] Fi de carrera_Andreu Gelabert Galmés, projet sur « les moteurs générateurs ».
- [21] E. Schaeffer, « Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, **1999**.
- [22] « Wartsila LNG seminar, safety concept for dual fuel engine installations in LNG carrier application », Tokyo, **9 mai 2007**.

Webographie

[12] www.boutiqueobdfacile.fr.

[23] www.imo.ogr

[24] <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:4504698/mmsi:605076060/imo:9761243/vessel:TESSALA>

[25] www.plaisances.com