



Université du Québec
à Rimouski

Modélisation et Simulation d'un système de distribution d'énergie du type diesel-électrique pour un navire marchand

Mémoire présenté
dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées

PAR
Kaouter EL JAMALI

Août 2021

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamad Issa, examinateur externe, Institut Maritime du Québec

Dépôt initial le 16 août 2021

Dépôt final le 25 août 2021

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Avec ce mémoire qui vient clôturer deux années d'études, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail de recherche, et qui ont marqué, par leur présence, une étape essentielle de ma vie.

Je tiens à adresser ma reconnaissance et des milliers de remerciements à mon directeur de recherche, Adrian Ilinca, professeur au département de génie de l'Université du Québec à Rimouski, le travail ne serait jamais terminé sans ses conseils, sa disponibilité et son soutien psychique qui m'a tellement aidé durant mes moments difficiles.

Mes remerciements vont également à Mohammed Issa, professeur et coordonnateur des laboratoires à l'IMQ, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire de maîtrise. Je le remercie aussi pour sa disponibilité et sa patience lors des échanges.

Je remercie Prof. Yasser Hayyani pour avoir accepté la présidence du jury de mémoire et pour l'enseignement offert dans les différents cours suivis durant le programme de maîtrise.

RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, l'engouement pour les propulsions hybrides du type diesel-électrique à bord des navires marchands n'a fait que croître, et elles s'imposent aujourd'hui comme la propulsion marine incontournable afin de rencontrer les normes environnementales adoptés récemment par l'organisation internationale maritime (IMO). Or, la nature variable des sources d'énergie renouvelable, associée à des changements imprévisibles de la charge, nécessite la mise en œuvre simultanée de systèmes de stockages à haute puissance et à forte densité énergétique.

Ce travail porte sur la modélisation et la simulation d'un système de distribution de l'énergie électrique du type hybride pour les navires marchands développé à l'Institut Maritime du Québec (IMQ).

Toutes les simulations ont été effectuées par le logiciel Matlab/Simulink et Simpowersystems. Nous présentons les modèles de chacune des composantes du simulateur ainsi que leur intégration. Ce modèle numérique, en complémentarité avec le simulateur physique, permet d'étudier les différentes stratégies d'optimisation des systèmes de propulsion hybrides des navires ainsi que l'intégration des énergies renouvelables (PV, éolien). Les résultats ont été validés par comparaison à ceux rencontrés sur le banc d'essai (simulateur).

Mots clés : systèmes de propulsion hybrides, électricité maritime, énergie renouvelable, stockage d'énergie, propulsion diesel-électrique.

ABSTRACT

Over the past decade, the popularity of hybrid diesel-electric propulsion systems on board merchant ships has grown, and they are now the preferred marine propulsion system to meet the environmental standards recently adopted by the International Maritime Organization (IMO). However, the variable nature of renewable energy sources, associated with unpredictable changes in load, requires the simultaneous implementation of high power and high energy density storage systems.

This work focuses on the modeling and simulation of a hybrid electrical energy distribution system for merchant ships developed at the Institut Maritime du Québec (IMQ).

All simulations were performed using Matlab/Simulink and Simpowersystems software. We present the models of each component of the simulator as well as their integration. This numerical model, in complementarity with the physical simulator, allows to study the different optimization strategies of the hybrid propulsion systems of the ships as well as the integration of renewable energies (PV, wind). The results were validated by comparison with those encountered on the test bench (simulator).

Keywords: Electrical propulsion, energy storage, hybrid systems, Marine electrical power, renewable energy, hybrid diesel-electric propulsion.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vi
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 Les enjeux environnementales	3
1.1 ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE	3
1.2 GNL ET LE TRANSPORT MARITIME	4
1.3 EMISSIONS DE GES ASSOCIES AU GNL.....	4
1.4 SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE	5
CHAPITRE 2 Systèmes énergétiques des navires.....	7
2.1 PROPULSION ELECTRIQUE DES NAVIRES	7
2.2 HISTORIQUE DE LA PROPULSION DES NAVIRES	7
2.3 COMPARAISON ENTRE LE MOTEUR ELECTRIQUE ET LE MOTEUR A COMBUSTION.....	9
2.4 COMPOSITION D'UNE PROPULSION ELECTRIQUE :.....	13
2.5 AVANTAGES DE LA PROPULSION ELECTRIQUE	23
2.6 LES SYSTEMES DE TRACTION HYBRIDE.....	25
2.7 ARCHITECTURES NAVALES AVEC ENERGIES RENOUVELABLES	26
2.8 COMPARAISON DES ARCHITECTURES DES SYSTEMES DE PROPULSION.....	28
CHAPITRE 3 Présentation du simulateur et de ses différentes parties.....	31

3.1	PRESENTATION DU SIMULATEUR	32
CHAPITRE 4 MODÉLISATION, SIMULATION ET DIMENSIONNEMENT DES		
COMPOSANTS		
4.1	INTRODUCTION.....	36
4.2	MODELISATION ET SIMULATION D’UN CONVERTISSEUR AC/DC.....	36
4.3	MODELISATION DES BUS CA ET CC.....	37
4.4	MODELISATION DU GROUPE ELECTROGENE DIESEL.....	37
4.5	MODELISATION DES MOTEURS DC	39
4.6	MODELISATION DU BATTERIES DE STOCKAGE	40
4.6.1	Modèle Simulink du système de stockage électrique.....	40
4.7	MODELISATION DES POMPES DE BALLAST	42
4.8	MODELISATION DE LA CHARGE RESISTIVE	42
4.9	MODELISATION DU SIMULATEUR AU COMPLET	43
CHAPITRE 5 Perspectives		
44		
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		
46		
ANNEXE I : DATASHEET des alternateurs		
48		
ANNEXE II : DATASHEET DES VARIATEURS DE VITESSES.....		
49		
ANNEXE III : Modelisation et SIMULATION DU CONVERTISSEUR DC-AC.....		
50		
ANNEXE Iv : modelisation et simulation du redresseur ac-dc		
52		
ANNEXE v : modelisation et simulation du moteur électrique.....		
53		
ANNEXE vI : modelisation et simulation du VARIATEUR DE VITESSE		
54		
ANNEXE vII : modelisation et simulation d’UN système DE PROPULSION		
HYBRIDE POUR NAVIRE marchand.....		
55		
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE		
56		

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Moteur électrique	10
Figure 2 : Moteur thermique.....	11
Figure 3 : Moteur thermique vs. électrique.....	12
Figure 4 : Thermique vs électrique : le stockage d'énergie.....	13
Figure 5 : Exemple d'une propulsion diesel-électrique	14
Figure 6. Architecture d'une propulsion mécanique (conventionnelle)	15
Figure 7. Disposition typique d'un système de propulsion électrique.....	17
Figure 8. Architecture typique pour une propulsion hybride.....	19
Figure 9. Illustration d'une propulsion électrique avec une alimentation hybride	20
Figure 10. Propulsion électrique avec une alimentation hybride à courant continu	22
Figure 11:Exemple de système de propulsion hybride à deux arbres.....	26
Figure 12 : Architectures de bus DC pour l'application de sources renouvelables.....	28
Figure 13 : Simulateur à l'IMQ	31
Figure 14 : Variateur de vitesse « ATV31HU75N4 » de Schneider Electric	33
Figure 15: Simulation du convertisseur AC-DC.....	37
Figure 16: Simulation d'un alternateur	38
Figure 17: Courbe des 3 génératrices	38
Figure 18: Modélisation des moteurs DC	39

Figure 19: Courbe de résultats des moteurs DC.....	39
Figure 20: Modélisation de la batterie.....	41
Figure 21: Courbe de SOC de la batterie	41
Figure 22: Modélisation de 6 pompes	42
Figure 23: Modélisation de la charge résistive.....	42
Figure 24: Modélisation sur Simulink du simulateur au complet	43
Figure 25: PI044D datasheet	48
Figure 26: Variateur de vitesse.....	49

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CA	Courant Alternatif.
CC	Courant Continu.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
PV	Panneau photovoltaïque.
P_{pompe}	Puissance de la pompe.
SER	Sources d'Énergies Renouvelables
SOC	State of charge.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La flotte marchande mondiale a cru de 5,7 % en 2005 et va accroître de 75 % d'ici 2022. Cette flotte compte environ 100 000 navires qui consomment annuellement environ 250 millions de tonnes de combustible. Un seul vraquier utilise 40 tonnes ou plus de carburant par jour, ce qui se traduit par une consommation annuelle d'environ 10 400 tonnes et l'émission d'environ 32 988 tonnes de CO₂ et 959 tonnes de SO_x, juste pour un navire (Y. Yupeng 2018).

Le transport maritime constitue le principal pilier du commerce mondial et le principal moteur de la mondialisation. Les ports du monde entier gèrent environ 90% du commerce mondial et 70% en valeur. Il existe plus de 2 000 ports répartis dans le monde entier, qui constituent le principal centre de croissance économique et de pollution dans les zones desservies (UNCTAD 2012). Considéré comme l'un des moyens de transport les plus économiques au monde, le transport maritime a joué un rôle important dans le développement de l'économie mondiale. Cependant, avec l'expansion du volume du commerce mondial et l'augmentation de la demande d'énergie pour le transport maritime, divers problèmes environnementaux causés par le secteur des transports maritimes sont également devenus de plus en plus importants (K. Marquart 2017).

L'Organisation maritime internationale (OMI) est l'institution spécialisée des Nations Unies chargée d'assurer la sécurité et la sûreté des transports maritimes et de prévenir la pollution des mers par les navires. L'OMI, a assumé la responsabilité des questions de pollution et a, par la suite, adopté au fil de nombreuses années une large gamme de mesures visant à prévenir et à maîtriser la pollution due aux navires et à atténuer les effets de tout dommage susceptible d'être provoqué par des activités et accidents maritimes (IMO). Les niveaux d'émission de (NO_x) maximaux admissibles actuels de l'OMI dépendent de la vitesse du moteur et de la gamme de fabrication.

Pour le constructeur des moteurs Diesel, l'effort est continu pour la réduction des émissions polluantes des gaz d'échappement. Les principales émissions polluantes des gaz d'échappement sont liées au processus de combustion. Les gaz d'échappement contiennent de l'azote à 76 %, de l'oxygène à 13 %, du dioxyde de carbone (CO₂) à 5 % et de la vapeur d'eau à 5 %. De plus, les émissions typiques de quantités polluantes sont de 1200 ppm oxydes d'azote (NO_x), 1200 ppm oxyde de soufre (SO_x), 640 ppm monoxyde de carbone (CO), 60 ppm des hydrocarbures (HC) et 180 ppm de particules (PM) (MARINE).

Ces dernières années, des recherches approfondies ont été menées sur l'application d'énergies propres, telles que le gaz naturel liquéfié (GNL), les piles à combustible (par exemple, le Water-Go-Round), l'énergie éolienne (E-Ship 1) et l'énergie solaire (Race for Water) sur les navires, et de nombreux résultats remarquables ont été obtenus. Toutefois, en tant que sources d'énergie primaires, les énergies propres, telles que le GNL et l'énergie solaire, ne peuvent pas être directement appliquées aux équipements électriques des navires, mais doivent être converties en énergie électrique ou en d'autres sources d'énergie secondaire au moyen de dispositifs de conversion de l'énergie (Y. Yupeng 2018). Il existe plusieurs bateaux qui utilisent des propulseurs électriques (Y. Yupeng 2018).

Aujourd'hui, il faut une consommation d'énergie considérable lors de l'amarrage des navires, principalement à partir de moteurs auxiliaires. Cette consommation est nécessaire pour charger et décharger la cargaison, le système de chauffage, le système d'éclairage, ainsi que pour d'autres activités nécessaires au maintien des opérations du navire au port. Cependant, la production d'énergie à bord provoque une pollution, principalement par les gaz d'échappement des générateurs diesel, le bruit ou les vibrations des machines. Comme cela a été exposé, ces machines auxiliaires, qui restent en service pendant l'hôtellerie, posent le principal problème environnemental dans les villes situées à proximité de terminaux portuaires ou de bassins portuaires. La pollution atmosphérique touche principalement les travailleurs du port ou les personnes vivant à proximité (S. Alvik 2010).

CHAPITRE 1

LES ENJEUX ENVIRONNEMENTALES

1.1 ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE

L'Organisation maritime internationale (OMI) continue de contribuer à la lutte contre les changements climatiques, conformément à l'Objectif de développement durable 13 des Nations Unies de « prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » (Internationale 2020).

L'OMI a déjà adopté des mesures obligatoires visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des transports maritimes internationaux, dans le cadre du traité pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL). Ces mesures comprennent l'indice nominal de rendement énergétique (EEDI), qui est obligatoire pour les navires neufs, et le Plan de gestion du rendement énergétique du navire (SEEMP).

En 2018, l'Organisation a adopté sa Stratégie initiale concernant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des navires. Cette Stratégie expose la vision de l'OMI en la matière, laquelle confirme son engagement à réduire les émissions de GES provenant des transports maritimes internationaux et à les éliminer progressivement aussitôt que possible.(Internationale 2020)

L'OMI mène aussi des projets de coopération technique à l'échelle mondiale. L'objectif est de renforcer les capacités des États, et particulièrement celles des États en développement, afin qu'ils mettent en place des mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du transport maritime.

Plusieurs solutions ont été abordés, parmi les technologies en stade d'adoption ou qui ont été adoptés sont l'utilisation du GNL, des énergies renouvelables et le stockage d'énergie.

1.2 GNL ET LE TRANSPORT MARITIME

Partout dans le monde, la demande pour le gaz naturel ne cesse d'augmenter. Par conséquent, plusieurs terminaux d'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL¹) sont proposés ou en voie d'être construits au Canada. D'ailleurs, on prévoit une augmentation du volume de GNL transporté par navire et du nombre de navires utilisant le GNL comme carburant dans les eaux canadiennes (seas 2020).

Bien que le transport et l'utilisation de GNL par les navires ne soient pas dépourvus de risques, le transport du GNL s'effectue de manière sécuritaire depuis soixante ans, grâce aux mesures mises en place pour en réduire les risques.

Pour le transport par navire, le gaz naturel doit d'abord être refroidi à un degré où il se condense pour devenir liquide, afin d'en diminuer considérablement le volume. Dans sa forme liquide, connue sous le nom de GNL, le gaz naturel nécessite 600 fois moins d'espace lorsque tenu à une température de – 160 °C et près de la pression atmosphérique pour un transport efficace sur de longues distances (seas 2020).

1.3 EMISSIONS DE GES ASSOCIES AU GNL

Le gaz naturel émet considérablement moins de polluants atmosphériques que la plupart des autres carburants et n'est ni corrosif ni toxique. Il est considéré par beaucoup comme un carburant abondant, économique et plus propre. Selon les prévisions, il devrait dépasser le charbon pour devenir la deuxième principale source d'énergie dans le monde – après le pétrole – d'ici 2040 (seas 2020).

¹ <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/gaz-naturel/labc-du-gaz-naturel/5642> (consulté le 15 août 2021)

Les estimations concernant la réduction potentielle des impacts de l'adoption du gaz naturel comme carburant sur les changements climatiques varient de manière significative. Pour déterminer l'effet global du GNL sur les changements climatiques, il faut tenir compte des divers gaz à effet de serre qui sont relâchés dans la chaîne d'approvisionnement, depuis l'extraction du gaz naturel du sol jusqu'à sa combustion dans un moteur.

Lorsque brûlé, le gaz naturel produit en moyenne de 15 à 29 % moins de dioxyde de carbone que les carburants traditionnels. La valeur réelle dépend à la fois de la source du gaz et du carburant traditionnel avec lequel le gaz naturel est comparé. À titre d'exemple, le gaz naturel produit environ moitié moins de dioxyde de carbone que le charbon pendant la combustion (seas 2020).

Le GNL comme cargaison maritime

Le nombre de navires-transporteurs de GNL en activité est en augmentation, avec plus de 525 navires dans le monde en date de 2018. Un seul méthanier de GNL peut transporter assez d'énergie pour chauffer les maisons d'environ la moitié de la population de Saint John, au Nouveau-Brunswick, pendant une année (seas 2020).

Méthaniers

En janvier 1959, le premier méthanier au monde a transporté approximativement 5 090 mètres cubes de GNL, du Lac Charles en Louisiane vers le Royaume-Uni. Depuis cette date, les méthaniers ont subi une augmentation de 50 fois leur capacité. À l'heure actuelle, le plus gros méthanier peut transporter 265 000 mètres cubes de GNL.

1.4 SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE

Le système de stockage d'énergie d'ABB est une alimentation par batterie modulaire développée pour une utilisation marine. Il est applicable aux systèmes d'alimentation haute et basse tension, CA et CC, et peut être combiné avec une variété de sources d'énergie telles

que les moteurs diesel ou à gaz et les piles à combustible. Le système peut être intégré en tant que système d'alimentation tout électrique ou hybride (ABB 2021)

En installant un stockage d'énergie à bord, le navire bénéficie d'une sécurité, d'une flexibilité et d'une efficacité accrues.

Opérations fiables : Système redondant fiable conçu pour répondre aux besoins opérationnels du navire. Il est facile à utiliser en toute sécurité et efficacement.

Mode zéro émission : Permet de passer facilement en mode zéro émission pour l'exploitation et les séjours portuaires dans des zones écologiquement sensibles (restreintes), ce qui rend le navire également prêt pour des réglementations d'émissions plus strictes à l'avenir.

Répondre aux exigences de la charte : Répondre aux exigences contractuelles pour une plus grande disponibilité de la centrale électrique, des émissions et une consommation de carburant réduites, rendant le navire plus compétitif et attrayant pour une clientèle plus large (ABB 2020).

CHAPITRE 2

SYSTEMES ENERGETIQUES DES NAVIRES

2.1 PROPULSION ELECTRIQUE DES NAVIRES

La propulsion électrique des navires est une méthode de propulsion maritime où celle-ci est assurée par des moteurs électriques. L'énergie électrique nécessaire y est généralement produite par des systèmes moteurs thermiques-alternateurs. Depuis que les progrès de l'électronique de puissance le permettent, la propulsion est assurée par des variateurs de vitesse.

Cette technique s'oppose à la propulsion directe où des moteurs thermiques (à vapeur ou à combustion interne) entraînent directement les hélices. Elle est comparable à celle des voitures hybrides, avec toutes ses variantes, bien qu'étant nettement plus aboutie que cette dernière.

Après des ferries électriques dans les fjords, en Norvège un premier cargo électrique autonome sur plus de 120 km a été annoncé en 2018.

2.2 HISTORIQUE DE LA PROPULSION DES NAVIRES

Les premiers navires à hélice, à propulsion mécanique, étaient équipés de machines à vapeur alternatives avec pistons et bielles. Avec l'arrivée des grands paquebots transatlantiques, les turbines à vapeur font leur apparition, avec le mauvais rendement qu'on leur connaît. Puis les moteurs diesel s'imposent, diesel lent (80 à 200 tr/mn) ou diesel semi-rapide (400 à 900 tr/mn) avec réducteur (O. Veneri 2012).

Ces moteurs permettent l'amélioration des rendements, la réduction du volume des machines, mais ont également les inconvénients suivants : propulsion bruyante, mauvaise flexibilité impliquant l'utilisation d'hélices à pales orientables et un mauvais comportement de la propulsion aux faibles régimes. Néanmoins, les systèmes équipant actuellement la majorité des navires remplissent correctement leur fonction (O. Veneri 2012).

Cependant, l'électricité, dès sa découverte il y a environ un siècle et demi, a rapidement été adoptée par les navires, essentiellement pour sa grande flexibilité. Les principales étapes ont été les suivantes :

- **1860** : un sous-marin est équipé d'une propulsion électrique alimentée à partir de batteries.
- **Début du 20^{ème} siècle** : plusieurs gros sous-marins sont équipés en électrique essentiellement pour la discrétion acoustique.
- **Années 1920** : propulsion turboélectrique pour 6 cuirassés de 40 000 CV et 2 porte-avions de 180 000 CV pour l'US Navy ; plusieurs brise-glace et navires de recherche sont également équipés d'une transmission électrique.
- **Années 1930** : plusieurs paquebots en turboélectrique, tels le Patria en Allemagne, ou le Normandie en France (160 000CV), sont lancés.
- **Deuxième guerre mondiale** : les Etats-Unis construisent plus de 300 navires de guerre de surface et des pétroliers en turbo ou diesel-électrique.
- **Après-guerre** : utilisation de groupes Ward-Léonard, puis apparition des convertisseurs à thyristors dans les années 1970. 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.

2.3 COMPARAISON ENTRE LE MOTEUR ELECTRIQUE ET LE MOTEUR A COMBUSTION

La puissance d'un moteur à combustion nous est normalement présentée en termes de chevaux vapeurs sous l'abréviation CV ou HP. Dans le monde du moteur électrique, la puissance nous est plutôt présentée en kilowatts (kW). L'équation théorique pour convertir des chevaux en kilowatts donne une valeur de 1,34 CV pour 1 kW. Le moteur électrique qui génère beaucoup moins de frictions mécaniques s'avère beaucoup plus efficace pour délivrer de la puissance, ce qui rend l'équation trompeuse. On obtient une bien meilleure approximation de la puissance requise en mode électrique par rapport à une mécanique à combustion thermique en appliquant la règle reconnue indiquant que 1 kW de puissance utile équivaut à 3 CV pour la même consommation d'énergie.

Pour estimer la puissance requise en mode électrique pour un bateau spécifique, on utilisera la règle suivante, soit 1,5 à 2 kW par tonne de déplacement (Trintignac 2014).

2.3.1 Composants et fonctionnement des moteurs électriques et thermiques

Commençons par le plus simple, le moteur électrique (Figure 1) fonctionne grâce à la force électromagnétique. En effet, le fait qu'un aimant peut produire une force sur un autre aimant quand on les rapproche, et bien le moteur électrique utilise cette dernière pour obtenir un mouvement (Trintignac 2014).

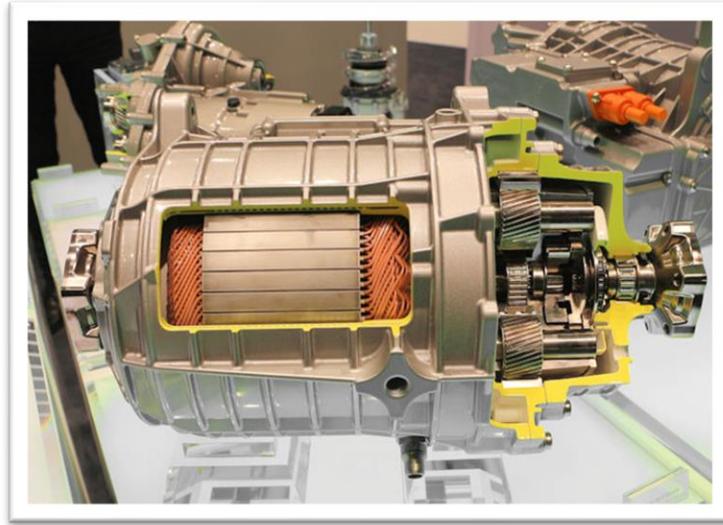


Figure 1: Moteur électrique

Source : *L'installation d'un moteur électrique*, 2009. Moteur Electrique

Il existe trois types de moteurs électriques malgré le fait que le principe reste le même : moteur à courant continu, moteur à courant alternatif synchrone (rotor qui tourne à la même vitesse que le courant envoyé dans les bobines) et, moteur à courant alternatif asynchrone (rotor qui tourne un peu moins vite que le courant envoyé). Il faut noter ici qu'il existe aussi ~~Il y a donc~~ les moteurs avec balais et sans balais (brushless) (auto 2019).

Un moteur électrique se compose donc de très peu de pièces : un rotor qui tourne dans un stator. L'un induit une force électromagnétique quand on lui envoie du courant, et l'autre réagit à cette force et se met donc à tourner. Si on n'injecte plus de courant il n'y a plus de force magnétique et donc plus rien ne bouge.

Enfin il s'alimente d'électricité, à courant alternatif ou continu. Et si un moteur électrique peut par exemple développer 600 HP, il ne pourra en développer que 400 HP s'il ne reçoit pas assez de puissance ... Une batterie un peu trop faible pourra par exemple brider un moteur et il ne pourra potentiellement pas développer toute sa puissance (auto 2019).

Passons maintenant au moteur thermique qui exploite des réactions thermodynamiques (Figure 2). En gros, ça utilise la dilatation des gaz chauffés (on peut même dire brûlés) pour faire tourner des pièces mécaniques. On enferme dans une chambre un mélange de carburant et comburant, on allume le tout et cela induit une très forte dilatation et donc une grosse pression (même principe que pour les pétards du 14 juillet). Cette dilatation est utilisée pour faire tourner le vilebrequin grâce à l'étanchéité des cylindres (compression) (auto 2019).



Figure 2 : Moteur thermique

Source : *L'installation d'un moteur électrique*, 2009. Moteur Electrique

2.3.2 Comparaison entre les moteurs

Les puissances spécifiques sont de mêmes ordres de grandeur entre les moteurs électriques et les moteurs thermiques. Les rendements sont cependant assez différents (Figure 3). Un moteur thermique évolue entre 0 % (quand le véhicule est à l'arrêt moteur tournant) et 35 % de rendement au mieux. Pour le moteur électrique, les rendements sont beaucoup plus élevés, entre 60 et 92 %, voire un peu plus (Trintignac 2014).

Le coût : le potentiel d'évolution du coût est favorable au moteur électrique. Un moteur thermique est constitué de 200 à 250 pièces élémentaires, toutes très techniques. Plus de la moitié d'entre elles sont usinées avec des tolérances au micron, reçoivent plusieurs

traitements thermiques. On retrouve à l'intérieur d'un moteur électrique environ une cinquantaine de pièces. Pour un groupe motopropulseur thermique, 90 % de la valeur est sous forme de mécanique et 10 % sous forme d'électronique. La proportion est inversée lorsque l'on prend un groupe motopropulseur électrique : on estime aujourd'hui la part de l'électronique à 60 % et celle de la mécanique à 40 %. Or, les perspectives de baisse des coûts sont beaucoup plus importantes et rapides en électronique qu'en mécanique (Trintignac 2014).

Thermique vs. électrique, quelques chiffres.

		
Puissance spécifique (kW/kg)	1 à 1,5	2 à 3
Rendement	0 % à 35 %	60 % à 92 %
Nombre de pièces	200 à 250	< 50
Part mécanique/ électronique prix	90/10	40/60

Figure 3 : Moteur thermique vs. électrique

Source : *Le moteur thermique comparé au moteur électrique*, 2014. Chimie et transport

2.3.3 Comparaison des performances en matière de stockage d'énergie

On retrouve, pour le stockage d'énergie, des ordres de grandeur d'écart entre l'électrique et la thermique, notamment en ce qui concerne les énergies spécifiques (Figure 4). Dans un kg d'essence (le diesel serait à peu près équivalent), on trouve 47 300 kJ. Pour une batterie lithium-ion classique, l'énergie spécifique est de l'ordre de 300 à 600 kJ par kg. Mais c'est la puissance de charge qui différencie le plus l'électrique et la thermique. Quand on fait le plein d'un véhicule à essence, on transfère 60 litres en deux minutes soit un demi-

litre ou 0,4 kg par seconde, ce qui correspond à une puissance de charge de presque 20 MW. La puissance de charge d'une batterie aujourd'hui varie entre 3 et 6 kW pour une charge normale, et de 80 kW pour une charge rapide. Par ailleurs, le coût du contenant de l'énergie (le réservoir d'essence) est de moins d'une centaine de dollars (Trintignac 2014).

Thermique vs. électrique : le stockage d'énergie.



Énergie spécifique (kJ/kg)	47 300	300 à 600
Puissance de charge (kW)	18 920 0,4 kg/s	3 à 80
Coût « contenant » (€)	< 100	8 000 20 kW-h 400 €/kW-h
Coût énergie 100 000 km (€)	9 600 6 l/100 km 1,6 €/l	1 500 150 W-h/km 0,1 €/kW-h

Figure 4 : Thermique vs électrique : le stockage d'énergie.

Source : *Le moteur thermique comparé au moteur électrique*, 2014. Chimie et transport

2.4 COMPOSITION D'UNE PROPULSION ELECTRIQUE :

Un navire électrique comprend deux ensembles : production d'énergie et propulsion (Figure 5).

La centrale d'énergie comprend plusieurs alternateurs entraînés soit par des moteurs Diesel, soit par des turbines à gaz. Elle alimente tous les utilisateurs du bord et notamment un ou plusieurs équipements de propulsion. L'équipement de propulsion comprend un moteur électrique à vitesse variable associé à un convertisseur, ou très rarement un moteur à vitesse fixe entraînant une hélice à pas variable (Mazodier).

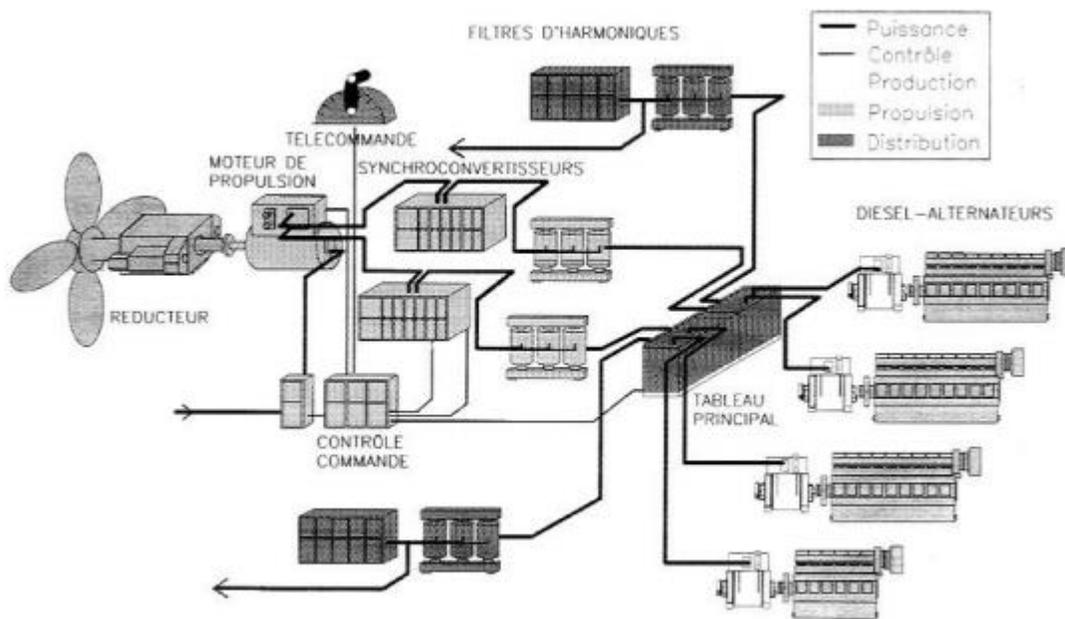


Figure 5 : Exemple d'une propulsion diesel-électrique

Source : *La propulsion électrique des navires*, 2014. Revue de l'Electricité et de l'Electronique.

2.4.1 Architecture de propulsions et applications

2.4.1.1 La propulsion conventionnelle

En règle générale, les navires construits avant le XIX^e siècle utilisaient les voiles et les rames. Le développement des machines à vapeurs a conduit au développement des turbines à vapeur, des moteurs diesel et de systèmes de propulsion à turbine à gaz sur la plupart des flottes de fret dans le 19^{ème} et 20^{ème} siècle.

Le système de propulsion mécanique sur les navires est agencé selon l'architecture typique comme la montre la Figure 6. Dans cette architecture de propulsion, il s'agit de turbines à vapeur, de turbines à gaz ou de moteurs diesel, qui sont le moteur principal (A). Le couple généré par A est transmis au propulseur (C) directement par la ligne d'arbre ou indirectement par le réducteur (B). Sur certains navires, les moteurs diesel sont remplacés par des turbines à vapeur et des turbines à gaz combinées à des chaudières ou à des réacteurs nucléaires.

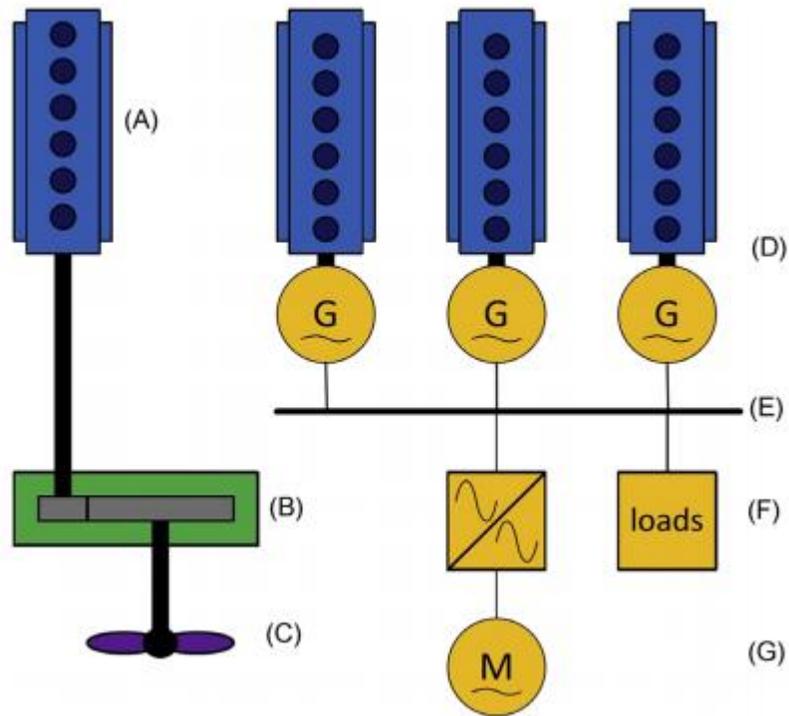


Figure 6. Architecture d'une propulsion mécanique (conventionnelle)

Cependant, la plupart des systèmes de propulsion diesel sont motivés par leur haut rendement énergétique, de sorte que le système de propulsion mécanique est considéré comme le système de propulsion diesel classique. Sur les grands navires marchands et navires de mer de grande taille, les hélices sont généralement entraînées directement par des moteurs diesel à deux temps à faible vitesse, dont le régime est de l'ordre de (100-170 tr/min). En revanche, sur les navires de plus petites tailles, la vitesse est réduite en fonction des rapports de la boîte de vitesses car ces navires sont généralement équipés de moteurs diesel à quatre temps à grande ou moyenne vitesse. Actuellement, près de 100% des navires fluviaux sont équipés de moteurs diesel. Le nombre de navires de mer représente également 95 à 97% du nombre total de propulsions diesel installées, dans lesquelles les moteurs diesel sont équipés en tant que moteurs principaux et auxiliaires.

Parallèlement à l'architecture du système de propulsion principal ci-dessus, une architecture de système de production d'énergie est disposée comme indiqué sur la Figure 6. En particulier, les moteurs diesel, les turbines à vapeur ou les turbines à gaz (D) fournissent l'électricité au micro-réseau à bord. Ensuite, le réseau CA (E) a pour fonction de générer et de distribuer l'électricité aux charges (F) ou au moteur à vitesse variable (G), tels que les moteurs de pompe et de ventilateur, les systèmes de séchage et de ventilation, les dispositifs de contrôle et de communication.

2.4.1.2 La propulsion électrique

Le début des années 1900 marque la période historique de l'introduction des systèmes de propulsion électrique sur les navires. La naissance et le développement de ce type de système de propulsion sont étroitement liés à l'arrivée de générations de navires à passagers et de navires de guerre. De manière générale, l'architecture d'un système de propulsion électrique est représentée sur la Figure 7. Le groupe électrogène diesel (A) est utilisé pour fournir et distribuer l'électricité au réseau électrique CA (B). Ensuite, la plupart des cas utilisent un transformateur (C) pour convertir la tension avant d'alimenter le convertisseur de fréquence (D) et le moteur de propulsion électrique (E), le moteur de propulsion électrique (E) ou les charges auxiliaires (F).

La propulsion électrique est une solution de propulsion efficace et économique pour les navires à passagers qui nécessite une proportion importante du système de propulsion et des configurations d'exploitation très diverses. Le système de propulsion électrique peut répondre à de nombreux niveaux de puissance pour la propulsion, les moteurs électriques et les sous-systèmes. Une solution pour atteindre cet objectif consiste à utiliser un système de gestion de la puissance adapté au nombre de moteurs en fonctionnement et à la nécessité de combiner la puissance de propulsion et la puissance de la charge de service. Cette stratégie permet de s'assurer que les moteurs fonctionnent efficacement en mode de charge partielle.

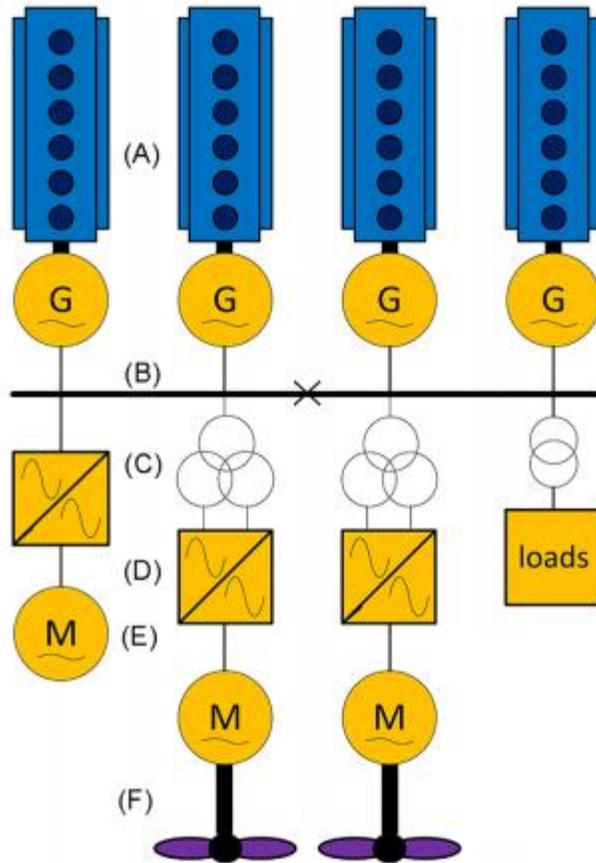


Figure 7. Disposition typique d'un système de propulsion électrique

Les émissions de NOx des systèmes de propulsion électrique sont plus faibles que celles des systèmes de propulsion mécanique. Selon la norme Tier II, les émissions moyennes de NOx produites par les génératrices diesel utilisant des systèmes de propulsion électrique sont de 9,7 g/kWh, tandis que celles produites par des moteurs à temps ou à deux temps avec des systèmes de propulsion mécanique sont de 10,5 et de 14,4 g/kWh, respectivement (Issa, M. et al. 2019).

2.4.1.3 La propulsion hybride

Les réserves mondiales de pétrole étant limitées, les moteurs alimentés par des combustibles minéraux provoquent des émissions nocives pour l'environnement et les concepteurs tentent depuis longtemps de trouver des moyens afin de remplacer

l'utilisation de ses combustibles. Dans ce contexte, les véhicules hybrides ont été créés pour réduire progressivement le rôle déterminant du pétrole. En général, la propulsion hybride est une combinaison de moteurs à combustion interne classiques et d'un moteur électrique utilisant l'énergie des batteries et des cellules solaires. Un navire hybride est le type de navire dont le système de propulsion utilise une combinaison de deux sources d'énergie pour fournir la propulsion nécessaire au bateau. Le mécanisme le plus courant de cette combinaison est un moteur électrique combiné à un moteur diesel. Dans chaque mode de fonctionnement, le contrôleur électronique décide quand utiliser les moteurs électriques ou les moteurs à combustion interne, et quand il faut fonctionner en synchronisation ou séparément.

Le système de propulsion hybride offre les avantages des systèmes de propulsion mécanique et électrique car il est une combinaison de ces deux systèmes . Cependant, pour obtenir ces avantages, il est nécessaire d'avoir une conception optimale pour la propulsion mécanique ainsi qu'un échange de certains critères d'efficacité de conversion. L'architecture d'un système de propulsion hybride typique (voir Figure 8) peut se composer des éléments suivants : les moteurs thermiques principaux (A) fournissent la poussée principale du navire et entraînent les génératrices à des vitesses élevées et avec un rendement élevé. Aussi, un moteur électrique (C) est relié à l'arbre principal via une boîte de vitesses (D) ou entraîne directement le propulseur lorsqu'il fonctionne à faible vitesse. Le moteur (C) sert également de générateur pour les charges électriques du réseau. Le système de contrôle de la puissance sera soutenu par des règles de contrôle ou par l'opérateur de production d'énergie. La stratégie de contrôle de la puissance permet d'optimiser les compromis et d'utiliser un niveau de contrôle supplémentaire par la conversion de la puissance des moteurs mécaniques vers les réseaux électriques et vice versa. Par conséquent, le principal défi dans la conception de l'architecture du système de propulsion hybride est le compromis entre les critères de conception et les exigences de la stratégie de contrôle optimale de l'équilibre énergétique.

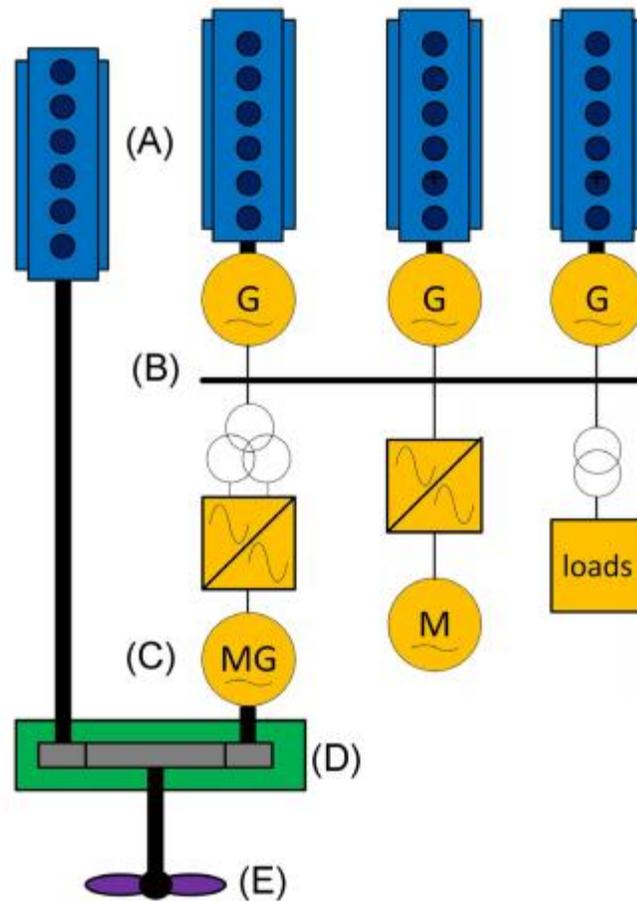


Figure 8. Architecture typique pour une propulsion hybride

2.4.1.4 La propulsion électrique avec une alimentation hybride

L'architecture des systèmes de propulsion électrique avec une alimentation hybride est généralement proposée dans la configuration illustrée à la Figure 9. Cette architecture consiste en une combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie de différentes sortes telles que des moteurs à combustion interne, des générateurs ou un système de réserve d'énergie. L'énergie d'un moteur à combustion interne, d'une turbine à gaz ou d'une turbine ouverte constitue la principale source d'énergie du système de propulsion, tandis que l'énergie électrochimique est fournie par des piles

à combustible. Un système d'alimentation de secours est constitué de batteries, de volants d'inertie ou de supercondensateurs. La recherche d'applications commerciales de l'énergie électrochimique pour le transport maritime international est encore très obstruée. Les recherches menées par Van Biert et al. ont permis de dresser un bilan complet des applications des piles à combustible pour les navires. Les résultats montrent que les piles à combustible ont de nombreuses utilisations potentielles dans le secteur maritime. Cependant, les difficultés technologiques, les ressources de production et les coûts d'investissement énormes sont des défis majeurs pour répondre aux exigences de l'OMI en matière de transport écologique et d'émissions nulles.

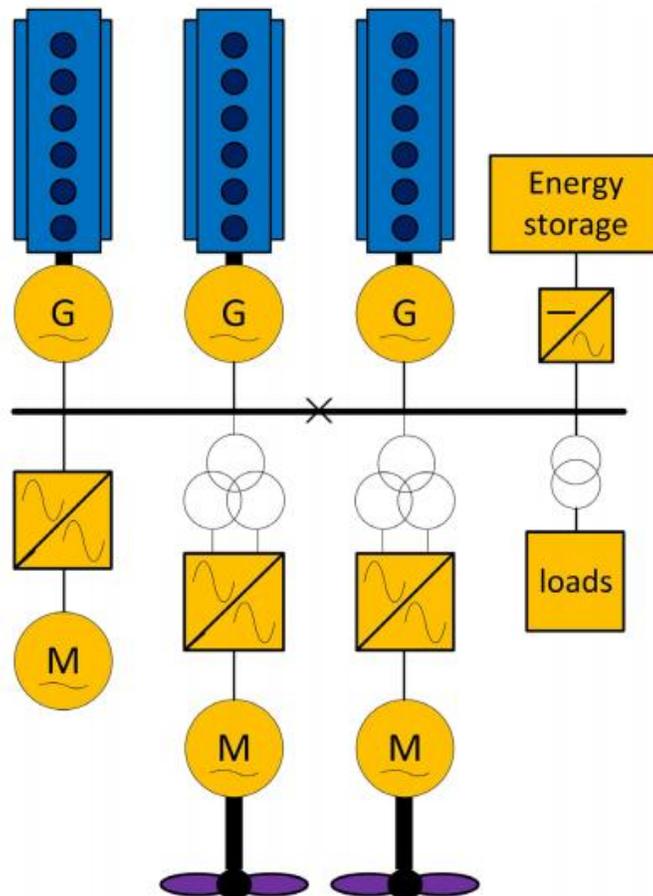


Figure 9. Illustration d'une propulsion électrique avec une alimentation hybride

2.4.1.5 La propulsion électrique avec une alimentation hybride à courant continu

Les navires équipés d'un système de propulsion électrique présentent un inconvénient inhérent : en mode de chargement partiel, le moteur fonctionnant à une vitesse fixe a une consommation de carburant plus élevée que le moteur fonctionnant à la vitesse variable (moteur à entraînement indirect), d'où un nouveau concept de réseau électrique à fréquence variable. Cependant, les applications des réseaux électriques à fréquence variable sont limitées car les armateurs choisissent souvent des réseaux électriques à fréquence fixe pour les navires. L'équipement d'un système de distribution en courant continu peut permettre de faire varier la vitesse du moteur. Les sous-marins ont été les pionniers de l'application des systèmes à courant continu à l'architecture des systèmes de propulsion électrique. Cependant, les obstacles à la protection contre les défauts et à la stabilité des systèmes électriques ont réduit son champ d'application. Le problème a été résolu avec l'introduction des technologies de l'électronique de puissance et des schémas de circuits intelligents et de protection contre les incidents.

L'adoption la plus large du système à courant continu a amélioré le rendement énergétique des navires surtout en cas de charge partielle. L'architecture typique d'un système de propulsion électrique avec une alimentation à courant continu est illustrée à la Figure 10. Les avantages d'une telle architecture sont nombreux. On cite : (1) le moteur du générateur diesel peut fonctionner efficacement à vitesse variable, réduisant ainsi le bruit, les émissions et le stress du moteur. (2) l'électronique de puissance intégrée au système CC permet de réduire les perturbations de tension et de fréquence. (3) grâce à l'électronique de puissance, cette architecture augmente la protection contre les défauts, et réduisant le nombre et la taille des commutateurs et interrupteurs.

En règle générale, les sous-marins utilisent souvent des systèmes de propulsion électrique dotés de grandes batteries en combinaison avec une alimentation hybride en courant continu pour répondre à la technologie AIP (Air independent Propulsion).

Cependant, ces dernières années, les flottes de l'US Navy et de la Royal Navy sont passées à l'utilisation du système de distribution CC pour les destroyers DDG-1000. La raison est que le système électrique à C.C. est capable de répondre à une bonne charge de puissance pulsée et de récupérer le système plus rapidement. Dans un système électrique hybride C.C., la tension et la fréquence de chaque dispositif sont séparées à l'aide de plusieurs convertisseurs électroniques de puissance.

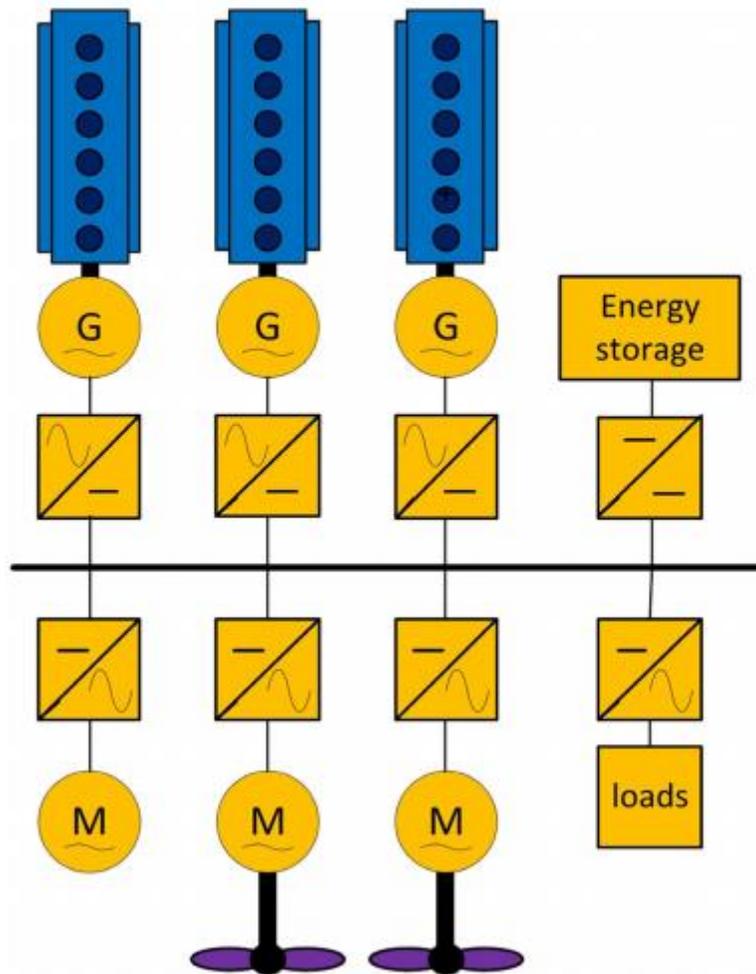


Figure 10. Propulsion électrique avec une alimentation hybride à courant continu

2.5 AVANTAGES DE LA PROPULSION ELECTRIQUE

- **Optimisation de l'architecture des navires**

Les moteurs Diesel sont dissociés de la ligne d'arbre, ce qui permet d'implanter les matériels aux meilleurs emplacements possibles et d'obtenir des gains de place substantiels. Ainsi, le choix d'une propulsion électrique pour une série de 10 transporteurs de produits chimiques a permis de rajouter 2 cuves supplémentaires sur 40 cuves pour certains de ces navires ou de raccourcir les navires de 8 m sur les autres (Mazodier).

- **Diminution de la puissance installée et de son coût**

Dans de nombreux navires sont installés les équipements de propulsion d'une part, une centrale alimentant le réseau de bord d'autre part. En propulsion électrique, les mêmes diesel-alternateurs peuvent être utilisés alternativement pour l'une ou l'autre fonction. Ceci est particulièrement intéressant pour des tankers, où la puissance de propulsion et la puissance nécessaire aux pompes de chargement/déchargement sont utilisées alternativement. De plus, étant découplés de la ligne d'arbre, les diesels peuvent être dimensionnés pour des vitesses supérieures (600-900 tr/mn au lieu de 450 à 514 tr/mn), donc être plus économiques (Mazodier).

- **Diminution des coûts de maintenance sur les diesels**

En propulsion diesel-mécanique, la vitesse et la charge du Diesel principal dépendent de celles de la ligne d'arbre à laquelle il est directement lié. En propulsion électrique, les diesels tournent à une vitesse constante correspondant à la fréquence fixe du réseau. D'autre part, en contrôlant en permanence le nombre de groupes électrogènes couplés sur le réseau, par un système de gestion de la production d'énergie électrique, il est possible de faire fonctionner les diesels à leur charge optimale (50 à 90 %) quelles que soient les conditions de fonctionnement du navire (route libre, manœuvre, chargement). Ces conditions de vitesse fixe et charge optimisée permettent une réduction significative de l'usure des moteurs et donc des coûts de maintenance, les équipements électriques de propulsion ne demandant

pratiquement pas de maintenance. De plus, un Diesel tournant à vitesse constante et charge nominale a un meilleur rendement et produit moins d'oxydes d'azote, dont les émissions tendent à être limitées par les lois nationales et internationales (Mazodier).

- **Réduction du niveau de vibrations transmis à la structure du navire**

Sur les systèmes de propulsion mécanique, on constate que les moteurs diesel principaux lents, de forte puissance, à vitesse variable, génèrent des vibrations dont le spectre est large et variable, et comprend des fréquences basses difficiles à atténuer.

L'utilisation de la propulsion électrique présente les avantages suivants :

- l'amplitude des vibrations est réduite, le nombre de groupes en service étant toujours minimal ;

- les moteurs des groupes tournant à vitesse fixe, le spectre de fréquence des vibrations est étroit et parfaitement cerné ; il est donc facile de dimensionner des systèmes d'amortissement efficaces ;

- du fait de la position très en arrière des moteurs électriques de propulsion, les lignes d'arbre ont une longueur réduite contribuant également à diminuer l'amplitude des vibrations ;

- la liberté de choix de la vitesse de l'hélice permet de choisir l'hélice la plus appropriée au navire en question et ayant le meilleur rendement possible.

La réduction du bruit et des vibrations est un facteur décisif sur les bâtiments militaires, les navires de recherche et les navires de croisière (Mazodier).

- **Flexibilité de manœuvre accrue**

La propulsion électrique permet un contrôle précis et progressif de la vitesse de rotation des hélices, tout en évitant l'utilisation d'une hélice à pales orientable, dispositif plus coûteux, plus fragile et complexe, donc moins fiable, et d'un rendement moindre qu'une hélice à pas fixe. Contrairement au moteur Diesel, qui ne développe de couple utile qu'à partir

d'environ 40 % de sa vitesse nominale, le moteur électrique est capable de fournir son couple maximum sur la totalité de sa plage de vitesse. Ceci permet une précision de manœuvre inégalable, utilisée notamment pour des navires de type câbliers, navires de recherche océanographiques, ferries, navires nécessitant un positionnement dynamique tels que les Shuttle tankers.

- **Grande disponibilité et sécurité des équipements**

Une propulsion électrique requiert très peu de maintenance. Les transformateurs et convertisseurs de propulsion sont des équipements statiques, et les moteurs de propulsion ne possèdent pas de pièces soumis à l'usure. Les diesels des groupes électrogènes, utilisés toujours de manière optimale, ont un taux de fiabilité élevé. D'autre part, les diverses redondances permettent une continuité de service en cas de panne : redondance au niveau de la centrale de production d'énergie (en cas de panne ou d'opération de maintenance sur un des groupes, les autres peuvent assurer un fonctionnement quasi normal du navire pendant la réparation de ce dernier, sans immobilisation du navire) et redondance au niveau des équipements de propulsion (l'utilisation de moteurs électriques à double enroulement procure une indépendance complète des transformateurs et convertisseurs de chaque demi-moteur, qui peut encore fournir la moitié du couple nominal du moteur complet).

2.6 LES SYSTEMES DE TRACTION HYBRIDE

Pour les systèmes de traction hybrides, l'énergie mécanique nécessaire pour la propulsion est assuré à la fois par un moteur électrique et un moteur thermique. En particulier, deux les configurations sont possibles :

- A) Dans le cas de deux hélices, l'une d'elles est alimentée par un moteur électrique et l'autre par un moteur thermique (Figure 6) ;
- B) L'énergie mécanique nécessaire à la propulsion est transmis à l'hélice à la fois par le moteur électrique et le moteur thermique simultanément.

La première configuration est généralement liée au système de propulsion installé sur un grand nombre de petits navires de croisière, équipés de deux hélices, l'un d'eux alimenté par le moteur diesel principal et l'autre un par le moteur électrique. En particulier, pour chacun des deux arbres d'hélice, un moteur diesel, à travers un réducteur, entraîne à la fois l'hélice et un alternateur, qui peut également fonctionner comme un moteur électrique. De cette façon, pour une faible charge opérations, la puissance de propulsion nécessaire peut être fournie par un seul moteur diesel, afin d'éviter le fonctionnement des deux les moteurs diesel à charge partielle (Mazodier).

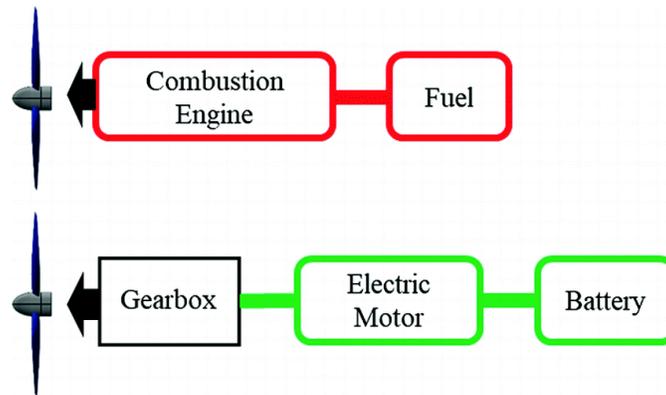


Figure 11:Exemple de système de propulsion hybride à deux arbres

Source : *La propulsion électrique des navires*, 2014. Revue de l'Electricité et de l'Electronique.

2.7 ARCHITECTURES NAVALES AVEC ENERGIES RENOUVELABLES

Tenant compte du fait que les réserves de pétrole diminuent, des sources d'énergie alternatives, comme l'hydrogène, le photovoltaïque, l'éolien, la biomasse et le biodiesel, sont devenues des solutions intéressantes, même soutenues par d'autres avantages tels que la réduction de la pollution (O. Veneri and Istituto Motori - National Research Council CNR 2012).

Les carburants hydrocarbonés renouvelables, tels que le biodiesel et l'hydrate de méthane permet les architectures à base de diesel. Les systèmes de propulsion électrique doivent continuer à être utilisés, ils peuvent être considérés comme des sources alternatives aux carburants fossiles. Le biodiesel peut être produit par des huiles végétales ou graisse animale et peut être utilisé comme moyen de transport, et par conséquent, on s'attend à ce qu'il soit largement utilisé dans le milieu des systèmes d'alimentation marins (V. M. Moreno 2007).

Dans ce contexte, les piles à combustible pourraient représenter une alternative valable aux groupes électrogènes conventionnels, car ils ont le potentiel de réduire le bruit et surtout d'améliorer significativement l'efficacité (au moins 30-40% par rapport à moteurs à combustion) et réduire les émissions, en fonction du type de combustible sélectionné (gaz naturel, hydrocarbures supérieurs, hydrogène). Ces unités de puissance pourraient soutenir, avec une flexibilité de rapport puissance thermique / électrique élevée, un large éventail d'exigences pour les auxiliaires embarqués liés au conditionnement, à la sécurité et aux appareils électriques (V. M. Moreno 2007).

L'utilisation des systèmes générateurs de piles à combustible permettent à l'efficacité globale d'atteindre des valeurs jusqu'à 80%, là où la contribution électrique pourrait être jusqu'à 60% et la partie restante utilisée pour produire une chaleur de haute qualité. De plus, l'hybridation de piles à combustible avec les systèmes de stockage d'énergie électrique, tels que les batteries électrochimiques, pourrait maximiser les performances d'un système intégré capable de gérer toutes les exigences des systèmes auxiliaires embarqués (X. Zhang 2010).

Les panneaux photovoltaïques permettent au rayonnement solaire d'être transformé en énergie électrique. Un certain nombre de cellules solaires sont nécessaires pour composer un panneau solaire. Les panneaux solaires sont contrôlés par des algorithmes et des convertisseurs de puissance électroniques pour garantir que la puissance maximale est transférée sous divers conditions de rayonnements. L'efficacité et la fiabilité globales du système sont garanties par l'utilisation des convertisseurs électroniques de puissance, qui permettent une bonne gestion des flux de puissance. En particulier, l'intégration de systèmes

de stockage électrochimiques avec le bus DC (Figure 7), permet de compenser les variations dues à la nature périodique des sources d'énergie renouvelables. De plus, un compensateur actif (volant d'inertie) peut être inclus pour réduire les perturbations de l'alimentation DC (V. M. Moreno 2007).

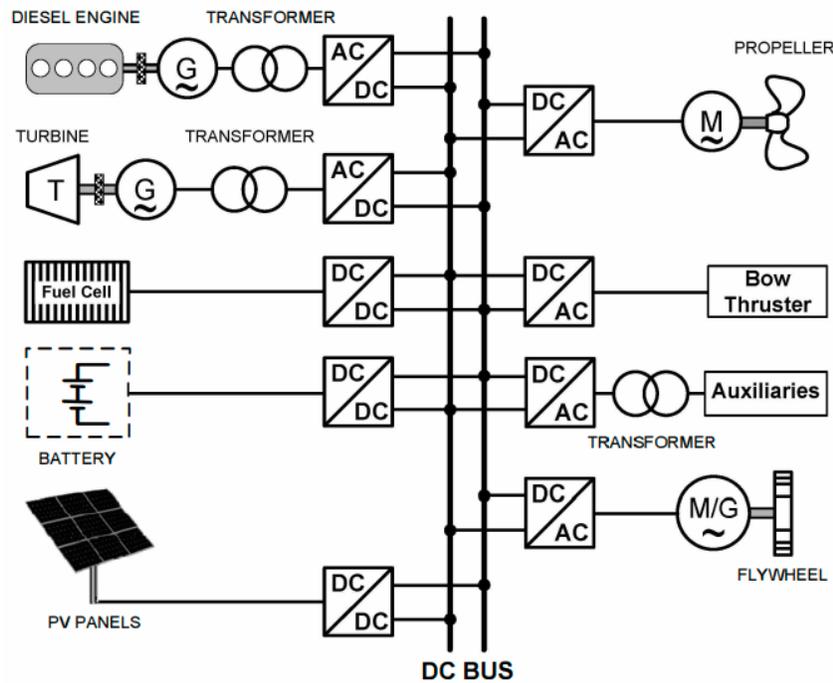


Figure 12 : Architectures de bus DC pour l'application de sources renouvelables

Source : *La propulsion électrique des navires*, 2014. Revue de l'Electricité et de l'Electronique.

2.8 COMPARAISON DES ARCHITECTURES DES SYSTEMES DE PROPULSION

Le tableau 1 donne un aperçu des avantages et des inconvénients des architectures de systèmes de propulsion étudiés dans l'industrie maritime. La liste des tendances des applications futures et des applications actuelles des différents systèmes de propulsion est également présentée .

Propulsion	Avantages	Inconvénients	Applications récentes	Applications à venir
Conventionnelle	<ul style="list-style-type: none"> Faible perte à vitesse nominale Faible émission du CO₂ et NOx à vitesse nominale 	<ul style="list-style-type: none"> Faible efficacité et rendement sous charge partielle La transmission mécanique est une source de bruit et de vibration 	<ul style="list-style-type: none"> Navires cargo, remorqueurs et yachts 	<ul style="list-style-type: none"> Navires cargo, remorqueurs et yachts
Électrique	<ul style="list-style-type: none"> Robuste Grande disponibilité Assure son alimentation par les génératrices Réduit les émissions du CO₂ et du NOx 	<ul style="list-style-type: none"> Génératrice à vitesse fixe Pertes 	<ul style="list-style-type: none"> Navires offshores 	<ul style="list-style-type: none"> Navire de la marine d'état
Propulsion hybride	<ul style="list-style-type: none"> Système robuste Faible source de bruit et de vibration Faible source d'émissions NOx 	<ul style="list-style-type: none"> Génératrice à vitesse constante Système complexe 	<ul style="list-style-type: none"> Navire de guerre et de patrouille Remorqueurs Bateau à long rayon d'action 	<ul style="list-style-type: none"> Navire de guerre et de patrouille
Propulsion hybride avec alimentation à C.C.	<ul style="list-style-type: none"> Nivellement des charges Zéro émission des bruits Stockage de l'énergie et 	<ul style="list-style-type: none"> Génératrice à vitesse constante Système complexe Cout des batteries 	<ul style="list-style-type: none"> Bateaux de croisières Remorqueurs 	<ul style="list-style-type: none"> Navires de forages

écrêtement des charges

- Sécurité (due aux batteries)

- Réduction de la consommation du carburant et des émissions nocifs

CHAPITRE 3

PRESENTATION DU SIMULATEUR ET DE SES DIFFERENTES PARTIES

Ce chapitre est consacré à la présentation du simulateur d'un système de propulsion de bateau à l'IMQ, illustré à la Figure 8 et à la description des ses différents composants.

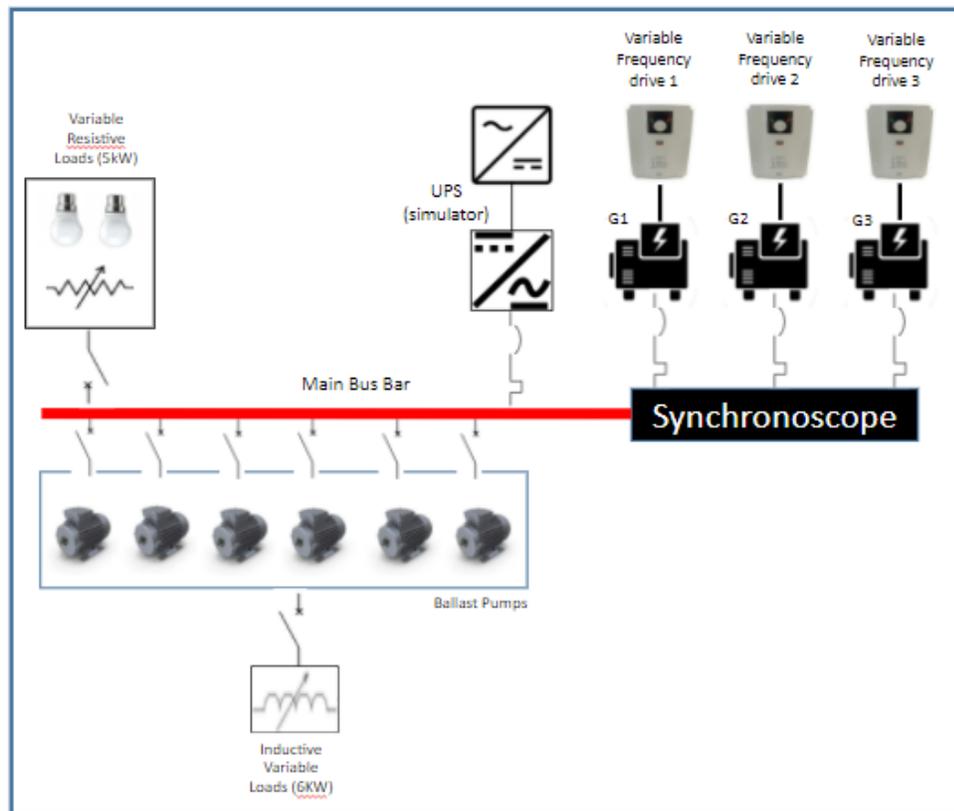


Figure 13 : Simulateur à l'IMQ

Source : *INSTITUT MARITIME DE QUEBEC*, 2020. IMQ.

3.1 PRESENTATION DU SIMULATEUR

Pour bien comprendre le simulateur on va procéder par le décortiquer en pièces, et analyser chacune de ses composantes. Les fiches techniques des principaux composants du simulateur sont disponibles en Annexe 1.

3.1.1 Alternateurs (Stamford PIO44D) :

Le Stamford PI044D fait partie de la série d'alternateurs P0 / P1 Stamford. Les alternateurs de cette série sont principalement utilisés pour les petites applications de puissance et dans les industries des télécommunications (McManus 2021).

Lors de l'utilisation d'une configuration triphasée à 50 Hz, le PI044D a une puissance de sortie de secours de 8,3 kVA et une puissance de sortie principale de 7,5 kVA. La plage de tension de cet alternateur à 50 Hz est de 380 à 440 volts et la classe d'isolation du matériau de l'alternateur est H.

Cet alternateur utilise un AVR AS480 standard et dispose d'un système d'excitation auto-excité avec l'option d'un système de suralimentation d'excitation (EBS). L'alternateur a une rotation standard dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'il est vu de l'extrémité d'entraînement. Les dimensions de la caisse d'emballage de cet alternateur sont de 71 x 51 x 67 cm et le poids de l'emballage est de 92 kg (palier simple, avec EBS).

Enfin, on peut dire que cet alternateur est de qualité garantie selon la norme de gestion de la qualité BS EN ISO 9001. Cela signifie que la production de l'alternateur est surveillée et gérée en permanence pour garantir qu'elle respecte les normes élevées fixées par Stamford (McManus 2021).

3.1.2 Variateur de vitesse

Ce variateur de référence ATV31HU75N4 et de marque SCHNEIDER TELEMECANIQUE (Figure 9) est un variateur de vitesse pour moteurs asynchrones de la gamme **ALTIVAR**.

Le variateur comporte des dispositifs de sécurité qui peuvent en cas de défaut commander l'arrêt du variateur et par là-même occasion l'arrêt du moteur. Ce moteur peut lui-même subir un arrêt par blocage mécanique. Enfin, des variations de tension, des coupures d'alimentation en particulier, peuvent également être à l'origine d'arrêts (Electric 2011).

Le variateur doit être impérativement raccordé à la terre, en conformité avec les réglementations portant sur les courants de fuite élevés (supérieurs à 3,5 mA). Lorsqu'une protection amont par "dispositif différentiel résiduel" est imposée par les normes d'installation, il est nécessaire d'utiliser un dispositif type A pour les variateurs monophasés et type B pour les variateurs triphasés. Il faut choisir un modèle adapté intégrant :

- Un filtrage des courants HF ;
- Une temporisation évitant tout déclenchement dû à la charge des capacités parasites à la mise sous tension.

La temporisation n'est pas possible pour des appareils 30 mA. Dans ce cas choisir des appareils immunisés contre les déclenchements intempestifs, par exemple des "dispositifs différentiels résiduels" à immunité renforcée de la gamme S.I. (marque Merlin Gerin) (Electric 2011).



Figure 14 : Variateur de vitesse « ATV31HU75N4 » de Schneider Electric

Source : *VARIATEUR DE VITESSE*, 2020. SCHNEIDER ELECTRIC.

3.1.3 Moteurs entraînant les alternateurs

Des moteurs à entraînement mécaniques à vitesse variable sont remplacés par une solution écoénergétique de haute performance Quantis Gold de Baldor•Dodge qui comprend un réducteur conique hélicoïdal à angle droit (RHB) Dodge Quantis avec un moteur écoénergétique Super-E® de Baldor•Reliance® ainsi qu'un moteur à entraînement Baldor. Les responsables de l'usine ont mentionné que ce système leur permet de contrôler avec précision la vitesse (ABB 2021).

3.1.4 Banc de batterie et convertisseur DC/AC

Des batteries de lithium sont connectées au simulateur avec une puissance de 7,5KW à travers des convertisseurs DC/AC.

3.1.5 Pompe à ballast (Ballast pump)

La pompe à ballast est également appelée pompe de ballast ou pompe à eau de ballast. C'est une pompe pour le transfert ou l'évacuation des ballasts d'eau. La pompe à ballast se trouve généralement dans une salle des pompes à bord des navires ou des navires. Avec le réservoir, le tuyau, les vannes, elle compose le système de ballast.

Les pompes à ballast sont cruciales pour le fonctionnement de la plupart des navires. Ils fournissent de l'eau dans et hors des réservoirs d'eau de ballast ; lors du chargement, du déchargement et de l'assiette du navire. Le ballast est généralement de l'eau de mer. Il est pompé dans des réservoirs appelés ballasts. Ces réservoirs sont remplis par la pompe à ballast afin d'ajouter du poids au navire. Lorsque la cargaison a été déchargée, elle est utilisée pour améliorer la stabilité du navire (PUMP 2021).

Dans notre simulateur, les moteurs portent les caractéristiques suivantes : CJL1304A 0,5hp, VITESSE synchrone de 3600rpm, 115V-230V.

3.1.6 Charge résistive

La charge résistive c'est une charge qui est composée de 20 ampoules de 40W sous 120V. Il y a un transformateur utilisé pour abaisser la tension de 208V vers 120V avant de les alimenter.

3.1.7 Onduleur

A partir du bus continu, on réalise la connexion au réseau (charge), grâce à un convertisseur continu/alternatif ou onduleur. L'onduleur assure la qualité de la puissance transmise et le respect des normes d'interconnexion. Le terme "qualité de puissance" se réfère à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence dans le réseau électrique de différentes formes de distorsions harmoniques. Les contraintes fixées pour les producteurs indépendants sont assez sévères : le niveau de tension délivrée doit rester dans un intervalle précis, sa fréquence doit, en toutes circonstances, rester très proche de 60 Hz, et elle doit comporter le moins d'harmoniques possible (ADEL 2017).

CHAPITRE 4

MODÉLISATION, SIMULATION ET DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS

4.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est la modélisation dynamique de l'ensemble du simulateur. Pour atteindre cet objectif spécifique, nous avons étudié, modélisé et simulé l'ensemble du système élément par élément dans l'environnement MATLAB/Simulink. Le système étudié est composé de 3 génératrices de 7,5kW chacune qui fournissent du courant alternatif dont elles sont entraînées par des moteurs DC, d'un sous-système de stockage d'énergie (banc de batterie), d'un sous-système de pompage et des charges électriques.

4.2 MODELISATION ET SIMULATION D'UN CONVERTISSEUR AC/DC

Le convertisseur AC/DC (Figure 10), aussi appelé « redresseur » est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. Il existe différents types de redresseurs : commandés (à thyristor), non commandés (à diode) et mixte (Salem 2014). Quel que soit leur type, ces redresseurs se comportent comme des charges non linéaires vues du réseau alternatif. Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive. Ils perturbent les réseaux d'alimentation en y injectant des courants harmoniques (Abderrazak 2016). Par la suite, plusieurs techniques ont été élaborées dans la littérature pour corriger ce problème.

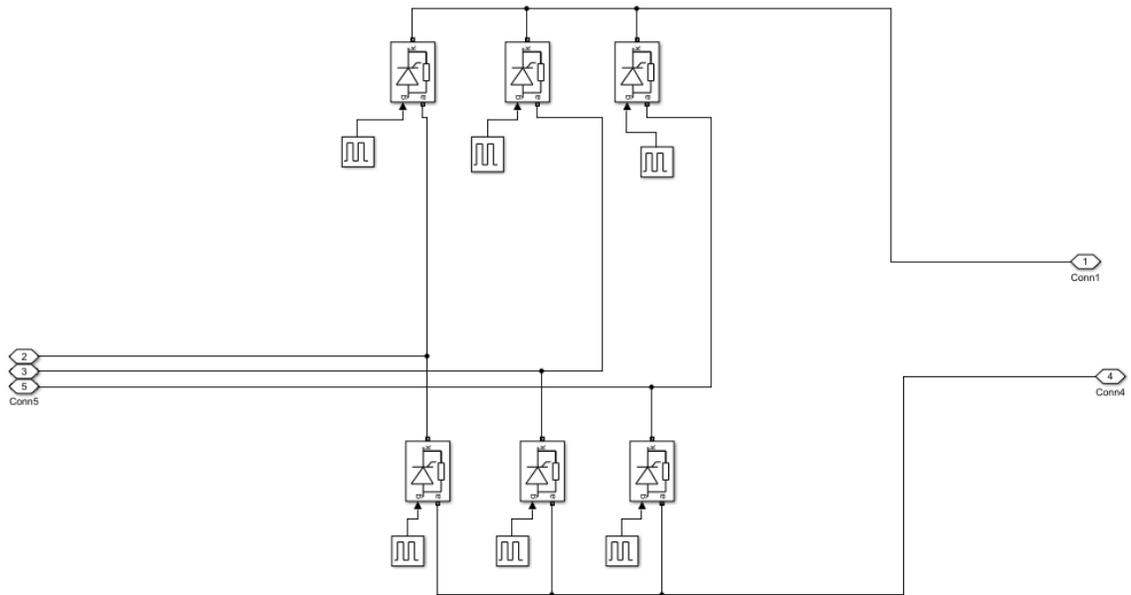


Figure 15: Simulation du convertisseur AC-DC

4.3 MODELISATION DES BUS CA ET CC

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Les générateurs CA peuvent être directement connectés sur le bus CA ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Les générateurs DC utilisent un onduleur pour être connectés sur le bus CA. Les batteries sont liées au bus CA à travers un convertisseur bidirectionnel. Les charges CC peuvent éventuellement être alimentées par les batteries.

4.4 MODELISATION DU GROUPE ELECTROGENE DIESEL

Le groupe électrogène (Figures 11) est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur commandé (en fait, un système d'entraînement à vitesse variable) et fonctionne en

vitesse variable à son point d'opération optimum (efficacité maximum). Ceci permet une économie du carburant, selon le profil de puissance demandée, qui peut atteindre les 40%. Dans tous les cas où on a besoin du DG, il doit assurer un minimum de puissance délivrée P_{DGmin} afin de maintenir son rendement à un niveau raisonnable.

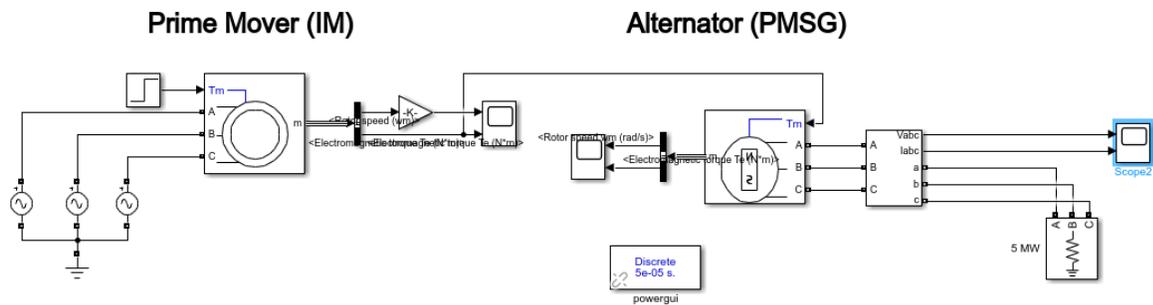


Figure 16: Simulation d'un alternateur

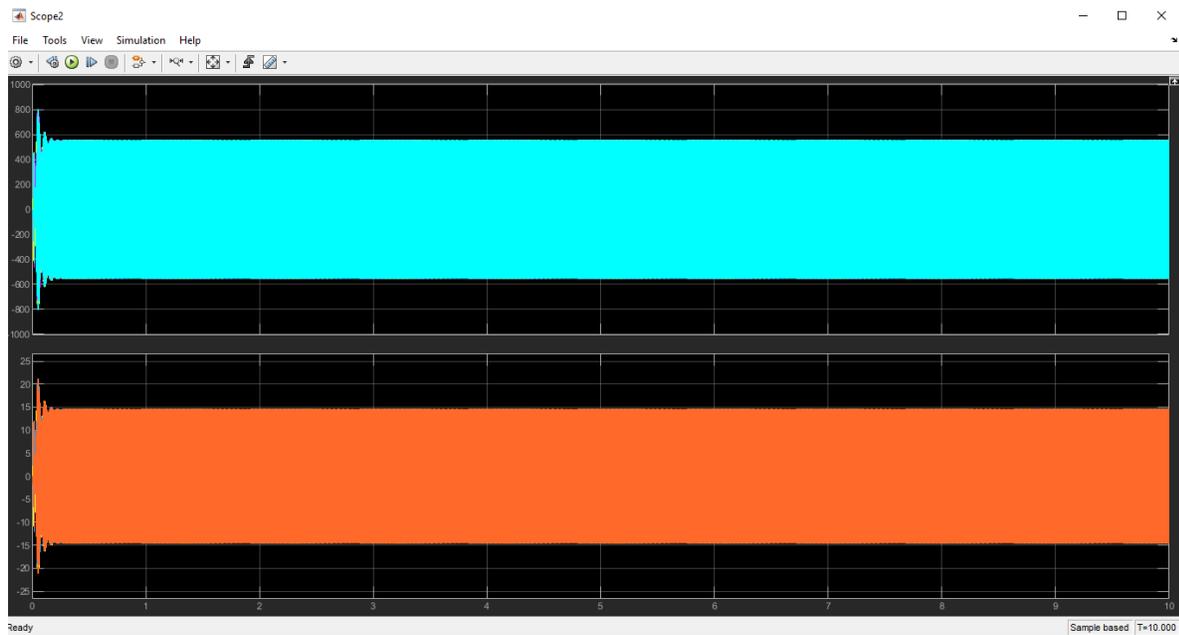


Figure 17: Courbe des 3 génératrices

Les trois génératrices de 7,5kW donnent un total de 21KW, le résultat de leur simulation est présenté à la Figure 12.

4.5 MODELISATION DES MOTEURS DC

Le modèle d'un moteur DC est illustré à la Figure 13.

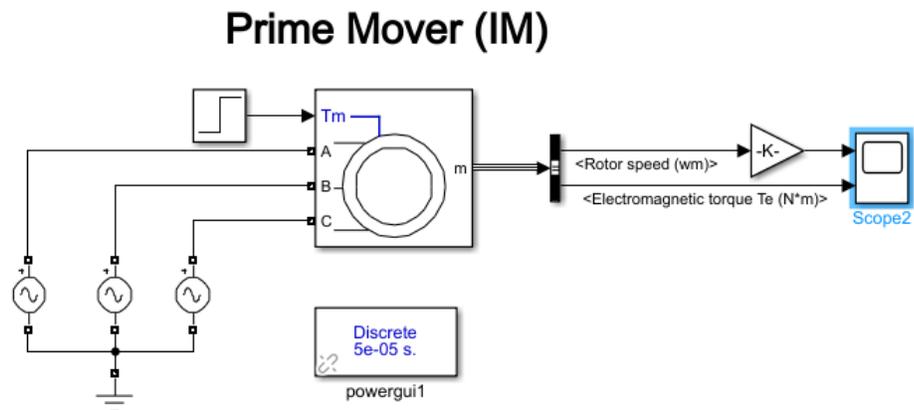


Figure 18: Modélisation des moteurs DC

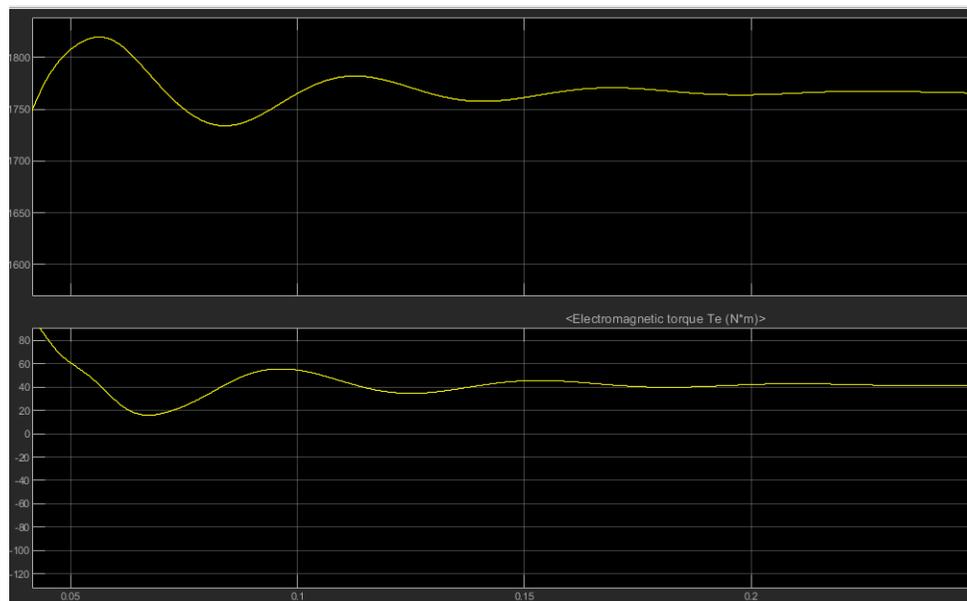


Figure 19: Courbe de résultats des moteurs DC

La Figure 14 montre les résultats de la variation de vitesse et de couple obtenus suite à la modélisation des moteurs DC à environ 1800 tr/min.

4.6 MODELISATION DU BATTERIES DE STOCKAGE

Les batteries sont des batteries d'accumulateurs électrochimiques, utilisées pour le stockage d'énergie et la compensation des fluctuations de la puissance produite sur le réseau à court terme. Leur puissance est de 7,5 kW. Les batteries agissent de manière bidirectionnelle, via un convertisseur DC/AC.

4.6.1 Modèle Simulink du système de stockage électrique

L'accumulateur électrochimique est considéré comme une source de tension idéale. Nous utilisons la technique la plus couramment utilisée pour le calcul de l'état de charge (SOC – State Of Charge) des batteries. Pour une parfaite connaissance de l'état de charge d'une batterie, il est nécessaire de connaître ou de pouvoir estimer le SOC à l'état initial, le temps de charge et de décharge et la valeur du courant (W. Zhou 2008). Pour calculer le SOC pour une batterie idéale nous utilisons la formule :

$$SOC = SOC_0 + \int_{T_0}^T (I_{bat} \div C_{bat}) dt \quad (4. 1)$$

Où :

SOC_0 est l'état de charge initial de la batterie ;

T_0 est le temps en seconde de l'état initial ;

C_{bat} est la capacité de la batterie (Ah) ;

I_{bat} est le courant de la batterie (A)

Le modèle de la batterie est illustré à la Figure 15 et les résultats obtenus pour la variation du SOC sont présentés à la Figure 16.

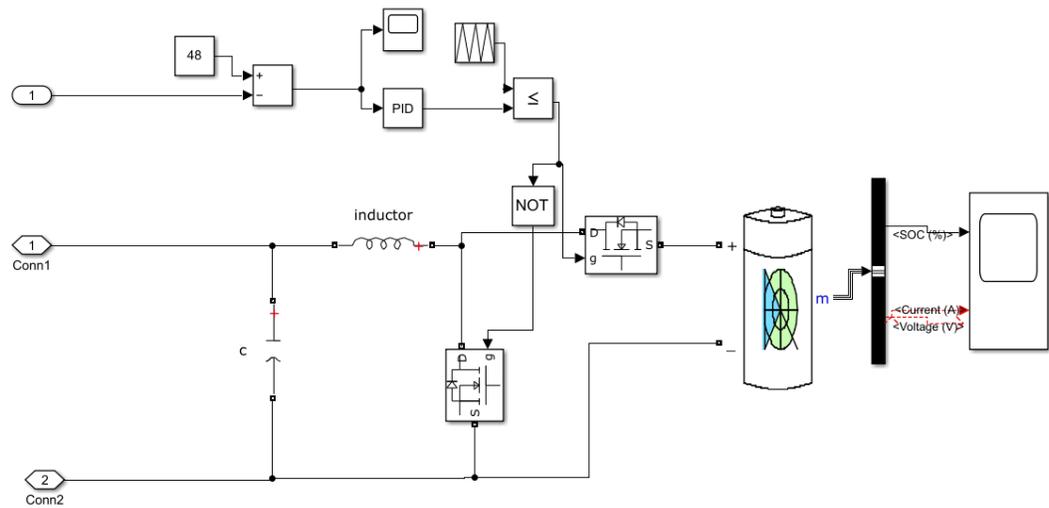


Figure 20: Modélisation de la batterie

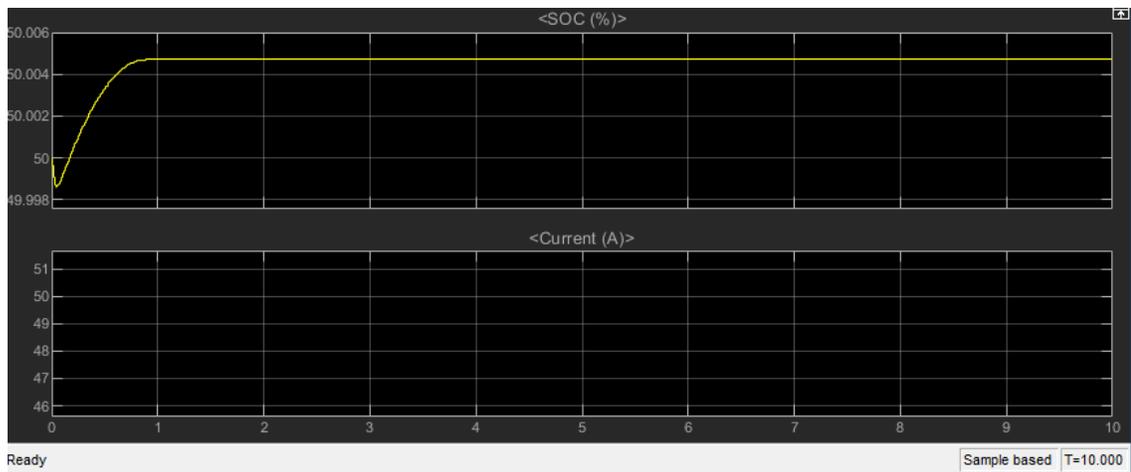


Figure 21: Courbe de SOC de la batterie

4.7 MODELISATION DES POMPES DE BALLAST

La modélisation sur Simulink des pompes de ballast est présentée à la Figure 17.

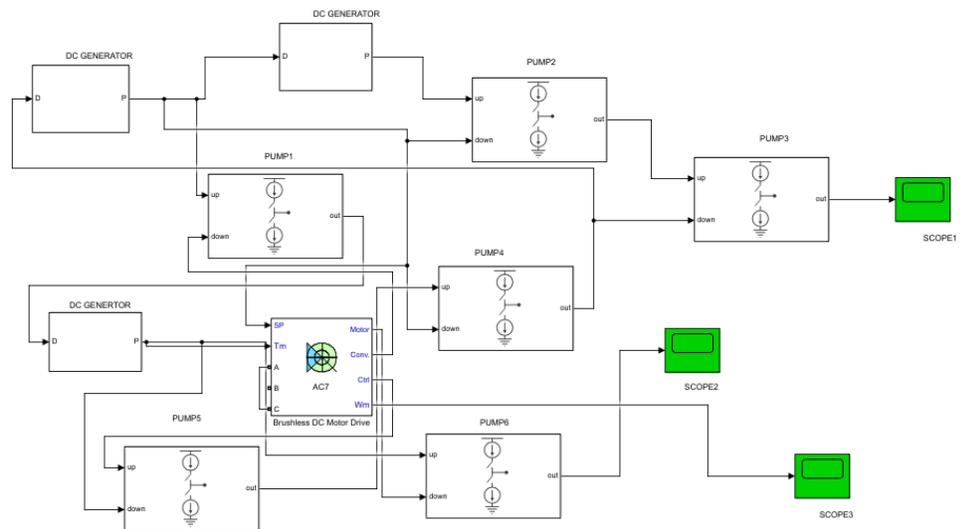


Figure 22: Modélisation de 6 pompes

4.8 MODELISATION DE LA CHARGE RESISTIVE

Les charges résistives (charges auxiliaires), appelées souvent *dump load* en anglais, sont un ensemble de résistances utilisées généralement comme équipement de chauffage électrique, pour chauffer de l'air ou de l'eau. Leur modélisation est illustrée à la Figure 18.

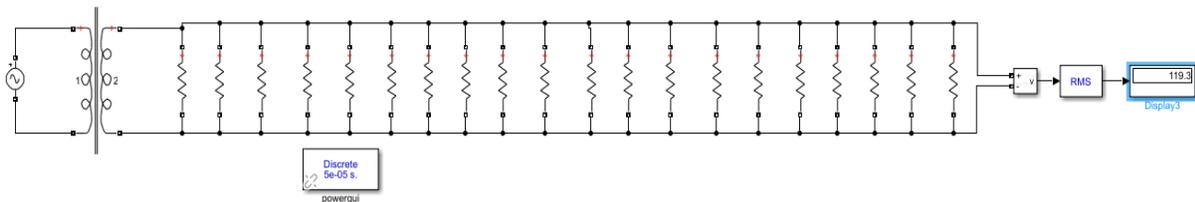


Figure 23: Modélisation de la charge résistive

4.9 MODELISATION DU SIMULATEUR AU COMPLET

La modélisation sur Simulink de l'ensemble du simulateur est présentée à la Figure 19.

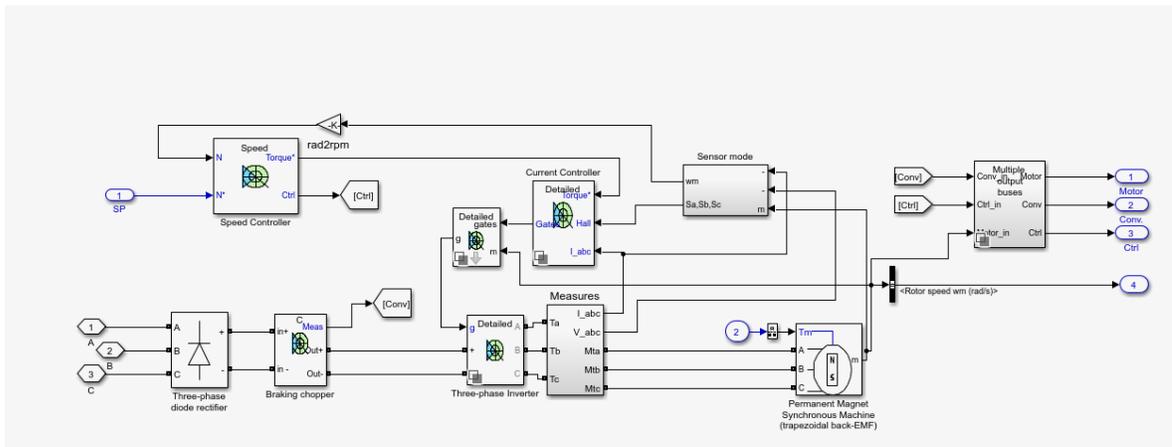


Figure 24: Modélisation sur Simulink du simulateur au complet

CHAPITRE 5

PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce projet de recherche était de réaliser la représentation sur Simulink d'un simulateur physique développé à l'IMQ pour étudier les systèmes de propulsion des bateaux. Pour atteindre cet objectif, on s'est fixé des objectifs spécifiques qui ont été tous atteints. Ainsi, nous avons commencé ce projet de recherche par une introduction aux normes qui ont été adoptés récemment par l'OMI en ce qui concerne la réduction des émissions du CO₂ et du SO_x en 2015 et 2018. Nous avons aussi développé un modèle complet du simulateur. Le logiciel MATLAB/Simulink, qui est un logiciel de classe mondiale, a été utilisé à cet effet.

Le modèle numérique du simulateur permet de déterminer plus rapidement et à moindre coût des stratégies et méthodes d'optimisation visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de propulsion hybrides des navires. Ces stratégies peuvent ensuite être validées sur le banc de test physique avant leur implantation sur des navires en opération ou à construire.

En ce qui concerne les perspectives des travaux et développements futurs nous recommandons :

- Un simulateur avec une capacité de 50kW au lieu d'avoir un petit de 21kW (le cas actuel).
- Remplacer les moteurs DC et leurs drives par des moteurs AC et des nouveaux alternateurs d'une puissance unitaire de 15kW minimum ou 3 x 20kW avec les variateurs de vitesse pour les moteurs d'entraînement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Jusqu'à présent, l'impact direct de la construction navale sur l'environnement, qui porte sur la construction, l'entretien et la réparation des navires a reçu relativement peu d'attention de la part du public. Cette activité est pourtant une source importante de préjudices potentiels pour l'environnement en raison notamment de la manipulation quotidienne de grandes quantités de matériaux, de vapeurs et de fluides toxiques. Les risques d'exposition de l'environnement à divers contaminants dangereux et toxiques se trouvent en outre aggravés dans l'industrie : premièrement parce que la plupart des activités de construction navale se déroulent en plein air et deuxièmement parce que l'installation des chantiers navals au bord du littoral permet aux polluants potentiels de pénétrer directement dans le milieu aquatique. Cependant, il n'existe pratiquement aucune estimation disponible, à l'échelle du secteur, concernant l'un quelconque de ces impacts ou la contribution directe du secteur au changement climatique.

L'industrie de la construction navale contribue indirectement à faire du transport maritime le mode de transport le plus économe en énergie au monde. Étant donné que le secteur maritime est chargé du transport de la plupart des marchandises échangées au niveau international, les avantages sont évidents en ce qui concerne le changement climatique. Néanmoins, le transport maritime contribue encore largement aux émissions de GES et de polluants atmosphériques et les réductions des émissions demeurent donc un enjeu essentiel pour l'industrie d'autant plus que le trafic maritime devrait augmenter considérablement dans les années à venir.

Le développement de l'électronique de puissance a permis un renouveau de la propulsion électrique en contribuant d'abord à l'électrification de navires spécialisés tels que câbliers, brise-glace, navires scientifiques, puis le « tout électrique » s'est progressivement étendu aux navires de croisière modernes. Aujourd'hui, poussés par des contraintes environnementales

de plus en plus strictes, les solutions tout électriques ou hybrides envahissent de nombreux types de navires.

ANNEXE I : DATASHEET DES ALTERNATEURS

PI044D		STAMFORD								
WINDING 311										
CONTROL SYSTEM	STANDARD AS480 AVR (SELF EXCITED)									
VOLTAGE REGULATION	± 1.0 %									
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	SELF EXCITED MACHINES DO NOT SUSTAIN A SHORT CIRCUIT CURRENT									
CONTROL SYSTEM	AS480 AVR WITH OPTIONAL EXCITATION BOOST SYSTEM (EBS)									
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVE (page 8)									
INSULATION SYSTEM	CLASS H									
PROTECTION	IP23									
RATED POWER FACTOR	0.8									
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER CONCENTRIC									
WINDING PITCH	TWO THIRDS									
WINDING LEADS	12									
STATOR WDG. RESISTANCE	2.1 Ohms PER PHASE AT 22°C SERIES STAR CONNECTED									
ROTOR WDG. RESISTANCE	0.437 Ohms at 22°C									
EXCITER STATOR RESISTANCE	17.5 Ohms at 22°C									
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.211 Ohms PER PHASE AT 22°C									
EBS STATOR RESISTANCE	12.9 Ohms at 22°C									
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others									
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%									
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min									
BEARING DRIVE END	BALL. 6309 - 2RS. (ISO)									
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6306 - 2RS. (ISO)									
	1 BEARING				2 BEARING					
	WITH EBS	WITHOUT EBS		WITH EBS	WITHOUT EBS					
WEIGHT COMP. GENERATOR	75 kg	73.3 kg		78 kg	76.3 kg					
WEIGHT WOUND STATOR	24 kg	24 kg		24 kg	24 kg					
WEIGHT WOUND ROTOR	26.32 kg	24.61 kg		27.32 kg	25.62 kg					
WR ² INERTIA	0.0893 kgm ²	0.0876 kgm ²		0.0895 kgm ²	0.0878 kgm ²					
SHIPPING WEIGHTS in a crate	92 kg	90.3 kg		101 kg	99.3 kg					
PACKING CRATE SIZE	71 x 51 x 67 (cm)				71 x 51 x 67 (cm)					
	50 Hz				60 Hz					
TELEPHONE INTERFERENCE	THF < 2%				TIF < 50					
COOLING AIR	0.110 m ³ /sec 233cfm				0.135 m ³ /sec 286 cfm					
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277		
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138		
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127	240/120	254/127	266/133	277/138		
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	7.5	7.5	7.5	7.1	8.3	8.8	9.1	9.4		
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	1.62	1.48	1.36	1.14	1.94	1.84	1.74	1.65		
X _d ' DIR. AXIS TRANSIENT	0.17	0.15	0.14	0.12	0.19	0.18	0.17	0.16		
X _d ^{''} DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.11	0.10	0.09	0.08	0.13	0.12	0.12	0.11		
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	0.78	0.70	0.65	0.55	0.93	0.88	0.83	0.79		
X _q ^{''} QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.17	0.15	0.14	0.12	0.20	0.19	0.18	0.17		
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.07	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06		
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.14	0.13	0.12	0.10	0.17	0.16	0.15	0.14		

Figure 25: PI044D datasheet

ANNEXE II : DATASHEET DES VARIATEURS DE VITESSES

Product data sheet Characteristics

ATV31HU75N4

variable speed drive ATV31 - 7.5kW - 500V 3-
phase supply - EMC filter - IP20



ⓘ Discontinued

Commercial status

Discontinued on: 31 December 2011

End-of-service on: 31 December 2015

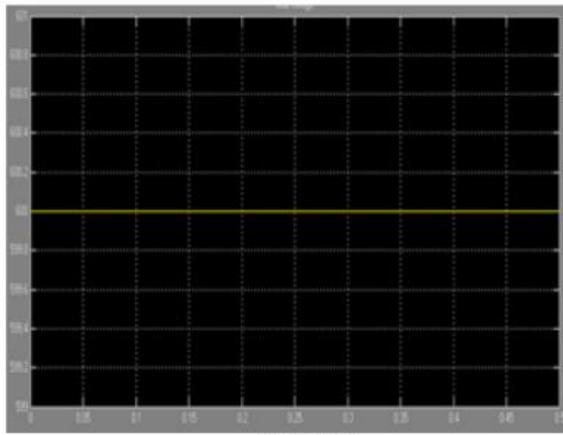
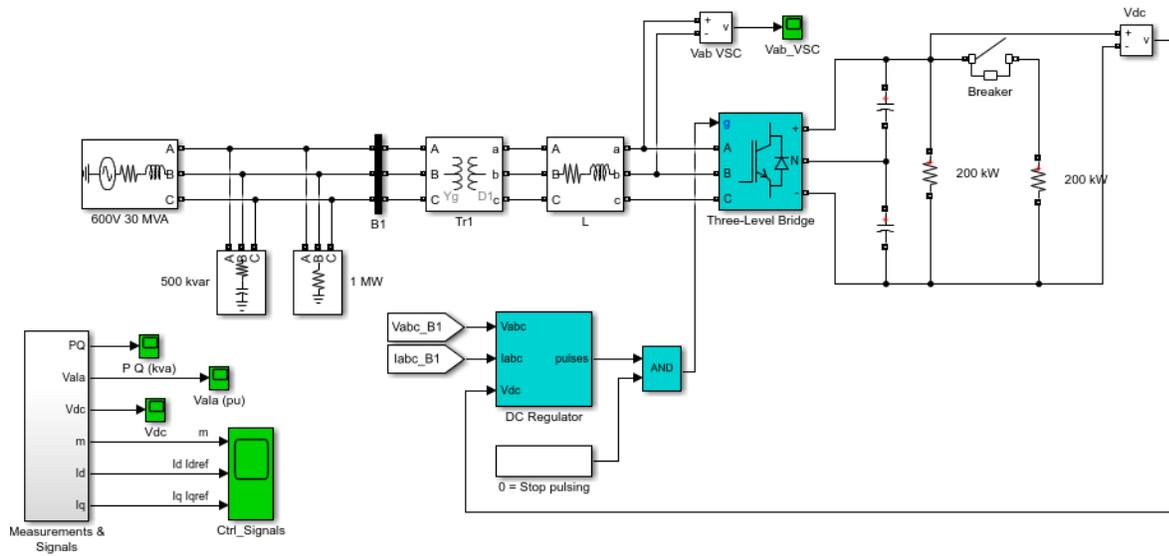
Main

Range of product	Altivar
Product or component type	Variable speed drive
Product specific application	Simple machine
Component name	ATV31
Assembly style	With heat sink
EMC filter	Integrated
[Us] rated supply voltage	380...500 V - 5...5 %
Supply frequency	50...60 Hz - 5...5 %
Network number of phases	3 phases
Motor power kW	7.5 kW 4 kHz
Motor power hp	10 hp 4 kHz
Line current	21 A at 500 V 27.7 A at 380 V, I _{sc} = 1 kA
Apparent power	18 kVA
Prospective line I _{sc}	1 kA
Nominal output current	17 A 4 kHz
Maximum transient current	25.5 A for 60 s
Power dissipation in W	269 W at nominal load
Asynchronous motor control profile	Sensorless flux vector control with PWM type motor control signal Factory set : constant torque
Analogue input number	3

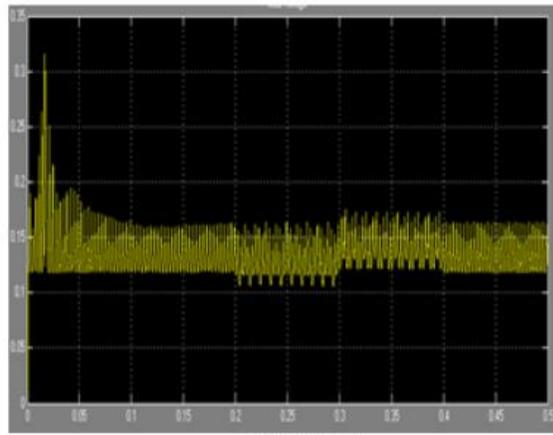
for and is not to be used for determining suitability or reliability of these products for specific user applications

Figure 26: Variateur de vitesse

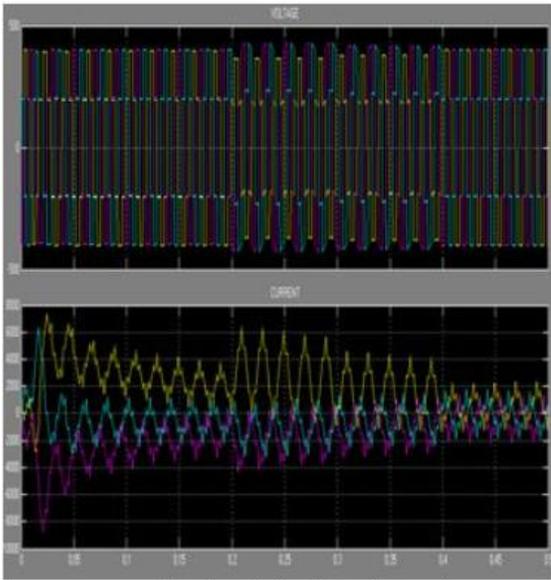
ANNEXE III : MODELISATION ET SIMULATION DU CONVERTISSEUR DC-AC



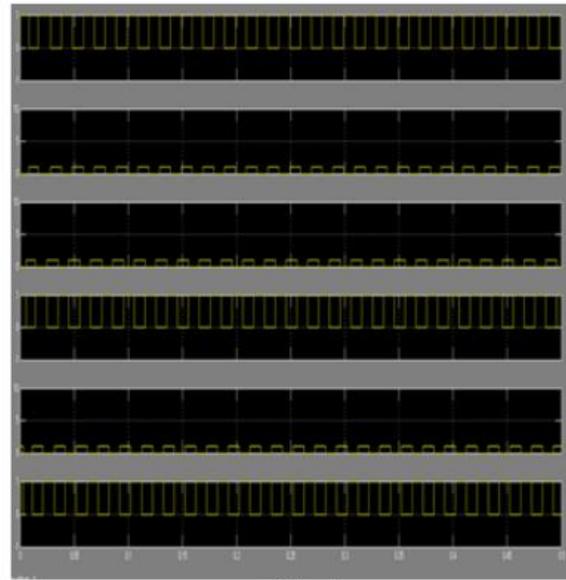
Input voltage



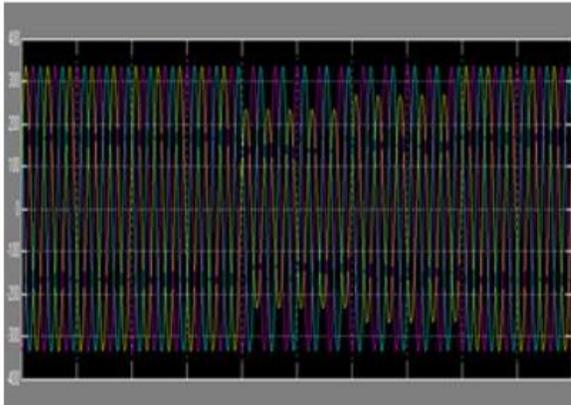
Input current



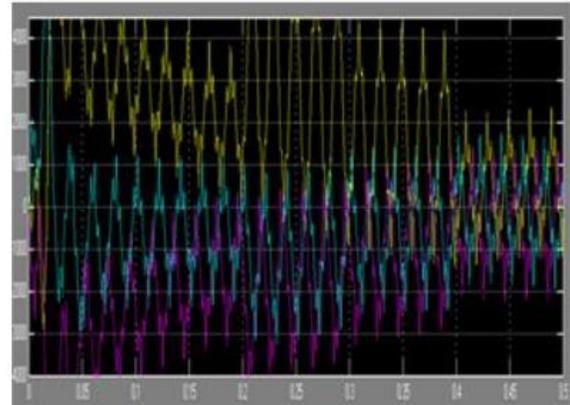
Inverter output voltage and current



Gate pulse

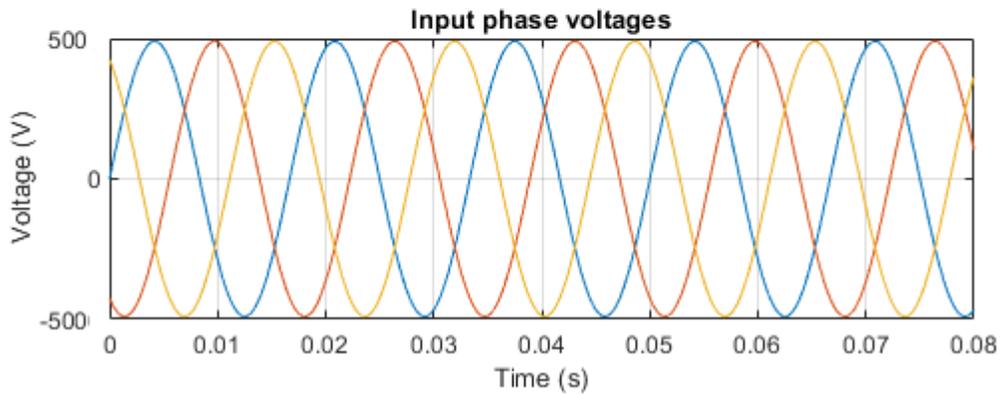
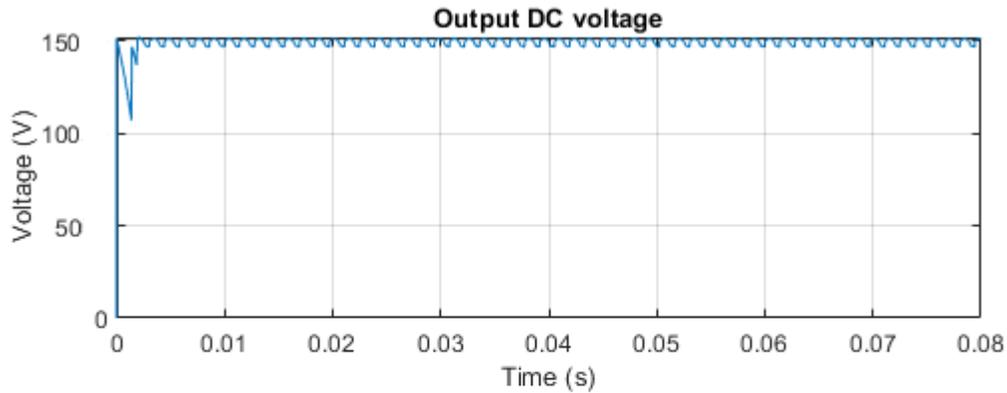
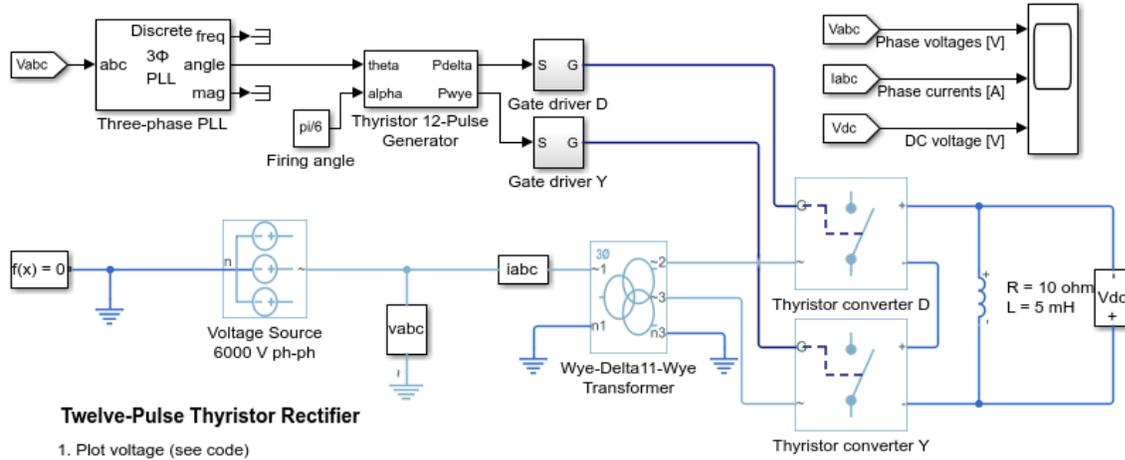


Load Voltage

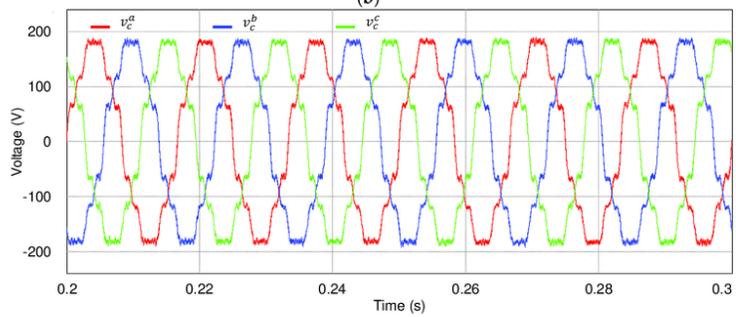
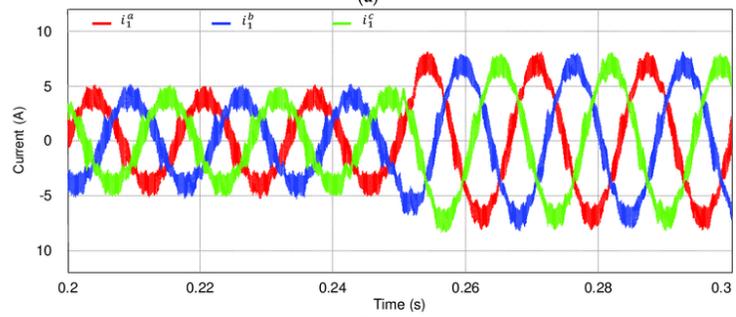
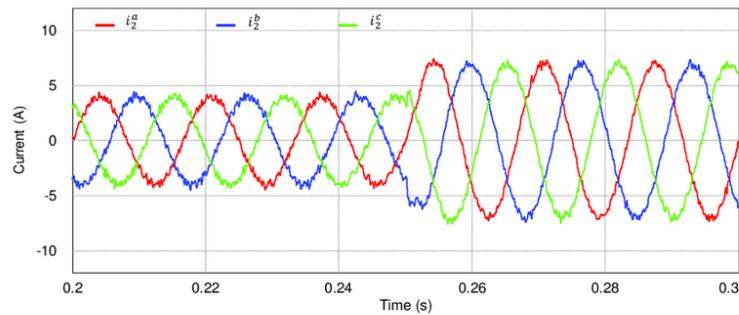
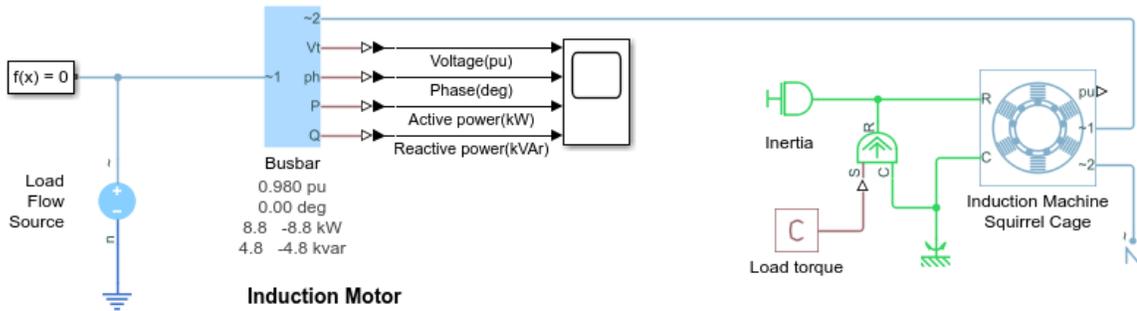


Load current

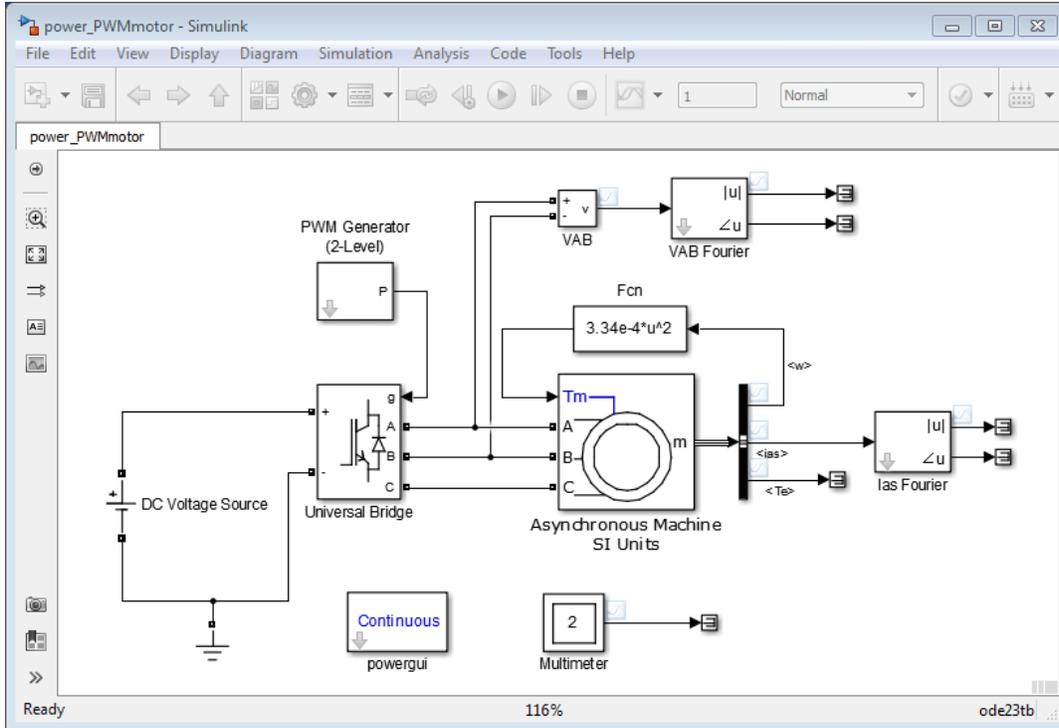
ANNEXE IV : MODELISATION ET SIMULATION DU REDRESSEUR AC-DC



ANNEXE V : MODELISATION ET SIMULATION DU MOTEUR ELECTRIQUE

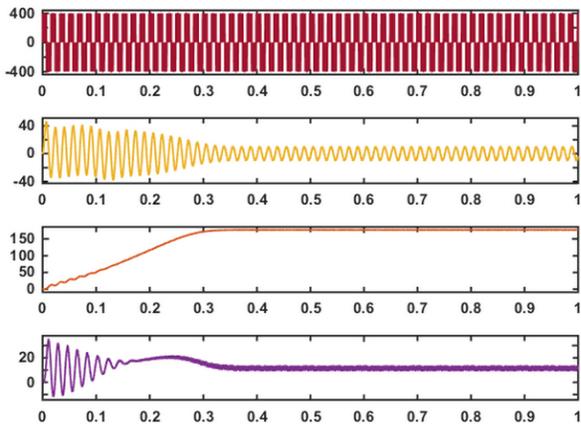


ANNEXE VI : MODELISATION ET SIMULATION DU VARIATEUR DE VITESSE



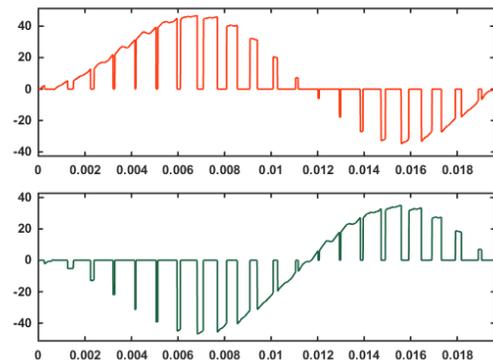
Motor starting at full voltage

Name	Color
<w>	Orange
<ias>	Yellow
<Te>	Purple
VAB:1	Red

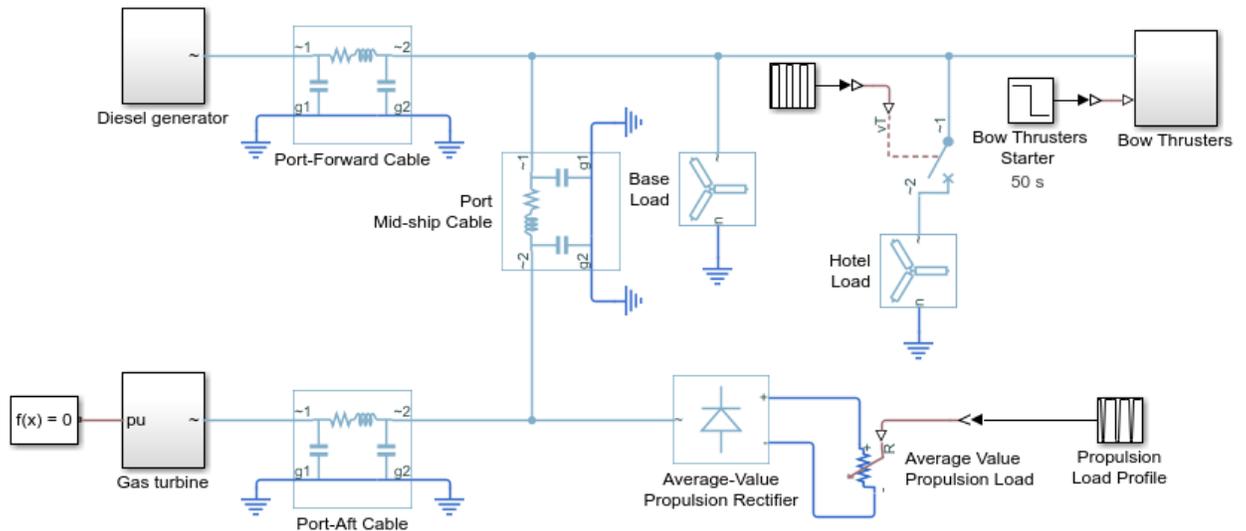


Currents in IGBT1 and IGBT2

Name	Color
Multimeter:1[1]	Red
Multimeter:1[2]	Green

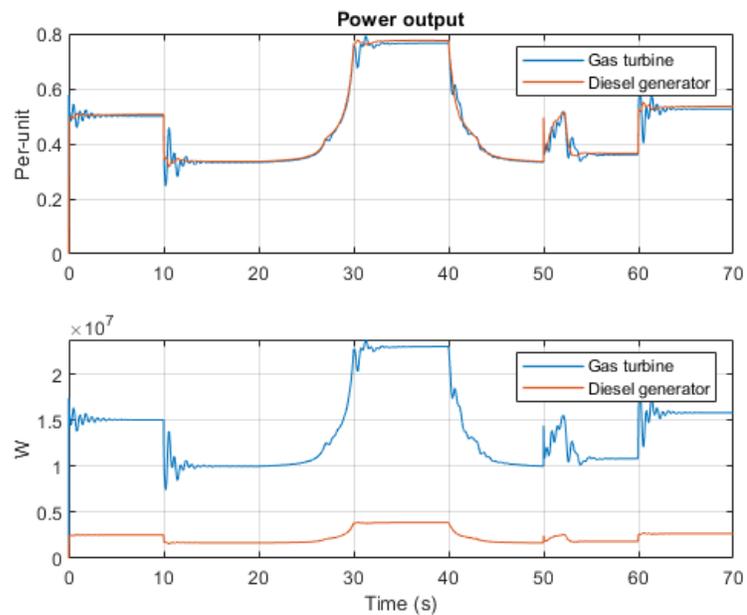


ANNEXE VII : MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME DE PROPULSION HYBRIDE POUR NAVIRE MARCHAND



Marine Full Electric Propulsion Power System

1. Plot diesel generator and gas turbine power output (see code)
2. Explore simulation results using sscxplorer
3. Learn more about this example



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

ABB (2020). "Energy storage systems." from <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/electric-solutions/energy-storage>.

ABB (2021). "CEDM3714T." from <https://www.baldor.com/catalog/CEDM3714T>.

Abderrazak, A. S. A. (2016). " Étude et analyse des performances d'une commande directe en puissance basée table de commutation d'un redresseur à ML/ triphasé."

ADEL, H. (2017). "STRATÉGIE DE GESTION MULTI ÉNERGIE DANS UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN - DIESEL-DISPOSITIF DE STOCKAGE ".

auto, F. (2019). "DIFFÉRENCES ENTRE MOTEUR ÉLECTRIQUE ET MOTEUR THERMIQUE." from <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-2233-differences-entre-moteur-electrique-et-moteur-thermique.php>.

Electric, S. (2011). "Variable speed drive." from <https://www.se.com/ww/en/product/ATV31HU75N4/variable-speed-drive-atv31---7.5kw---500v-3-phase-supply---emc-filter---ip20/>.

IMO.

Internationale, O. M. (2020). "« OMI 2020 » : réduction des émissions d'oxydes de soufre des navires." from <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.

Issa, M., Ibrahim, H., Ilinca, A. and Hayyani, M. (2019). A Review and Economic Analysis of Different Emission Reduction Techniques for Marine Diesel Engines. Open Journal of Marine Science, 9, 148-171. doi: [10.4236/ojms.2019.93012](https://doi.org/10.4236/ojms.2019.93012)

K. Marquart, H., T., Ferrari, GB., Schmidhalter, R. (2017). " "Branchement électrique des navires à quai," " .

MARINE. "Exhaust gas emission control today and tomorrow application on man b&w twostroke marine diesel engines.". from www.marine.man.eu.

Mazodier, L. "La propulsion électrique des navires." Revue de l'Electricité et de l'Electronique.

McManus, J. (2021). "All About the Stamford PI044D Alternator." from <https://support.wellandpower.net/hc/en-us/articles/360010008158-All-About-the-Stamford-PI044D-Alternator->.

O. Veneri, F. M., C. Capasso, P. Corbo (2012). "Overview of electric propulsion and generation architectures for naval applications." IEEE.

O. Veneri, F. M., C. Capasso, P. Corbo and V. M. Istituto Motori - National Research Council CNR, 80125 Naples, (Italy) (2012). "Overview of Electric Propulsion and Generation Architectures for Naval Applications ".

PUMP, S. (2021). "Ballast pump." from <http://silipump.com/application/ballast-pump/>.

S. Alvik, E., M. S., Endresen, Ø., Hoffmann, P., and Longva, T. (2010). ""Pathways to low carbon shipping: Abatement potential towards 2030,"".

Salem, K. B. (2014). "Modélisation et Simulation d'un convertisseur AC/OC triphasé. ."

seas, C. (2020). "GNL ET TRANSPORT MARITIME."

Trintignac, H. (2014). Le moteur thermique comparé au moteur électrique-Enjeux et contraintes.

UNCTAD (2012). ""Review of Maritime Transport,"".

Van Biert L, Godjevac M, Visser K, Aravind PV. A review of fuel cell systems for maritime applications. J Power Sources. 2016;327: 345-364.

V. M. Moreno, A. P. (2007). "Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels." Journal of Maritime Research 4: 81-100.

W. Zhou, H. Y., and Z. Fang (2008). "Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar-wind power generation system." Renew. Energy **33**: 1413-1423.

X. Zhang, S. H. C., G. Li, H.K. Ho. Li, Z. (2010). "A review of integration strategies for solid oxide fuel cells." Journal of Power Sources **195**: 685-702.

Y. Yupeng, T., Z., Boyang, S., Xinpeng, Y., Teng, L (2018). "“A Fuzzy Logic Energy Management Strategy for a Photovoltaic/Diesel/Battery Hybrid Ship Based on Experimental Database,” ”.