

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE
MINES-TELECOM ATLANTIQUE BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE –
IMT ATLANTIQUE

ECOLE DOCTORALE N° 648
Sciences pour l'Ingénieur et le Numérique
Spécialité : *Informatique*

Par

Fred Michael GONSALVES

**Leveraging Machine Learning and Operations Research to Enhance
Cruise Ship Energy Efficiency**

Thèse présentée et soutenue à IMT Atlantique, Brest le 29 novembre 2023
Unité de recherche : Lab-STICC UMR CNRS 6285
Thèse N° : 2023IMTA0367

Rapporteurs avant soutenance :

Nour-Eddin EL FAOUZI
David REY

Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel
Associate Professor HDR, Skema Business School

Composition du Jury :

Président : Nour-Eddin EL FAOUZI

Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel

Examineurs : David REY
Hélène LE CADRE

Associate Professor HDR, Skema Business School
Chargée de Recherche, INRIA Lille

Dir. de thèse : Romain BILLOT
Co-dir. de thèse : Patrick MEYER
Encadrant de thèse : Bastien PASDELOUP

Professeur, IMT Atlantique
Professeur, IMT Atlantique
Maître de Conférences, IMT Atlantique

Invité(s)

Matthieu LORANG
Arnaud JACQUES

Responsable Performance Energétique et Environnementale, Chantiers de l'Atlantique
Chef de Projet R&D, Chantiers de l'Atlantique

Contents

Abstract	1
Acknowledgments	3
Résumé Long	5
Bibliographie	17

Abstract

The escalating concerns in recent years over *global warming* have created a heightened scrutiny of various sectors, with the *shipping industry* emerging as a significant focal point. Within the broader shipping industry, the *cruise ship sector*, characterized by large vessels that operate almost continuously and cater to thousands of passengers, stands out. Regulatory bodies have introduced an array of measures to monitor and guide the industry's carbon footprint.

The main objective of this thesis is the exploration and development of *machine learning* and *operations research* methods to provide new avenues for the industry for improving energy efficiency. To structure the research, the study was split into two distinct yet interrelated domains of energy efficiency: *operational energy efficiency* and *design energy efficiency*.

From the *operational standpoint*, our research was dedicated to the optimization of the propulsion system, the largest energy consumer of a cruise ship. Our primary contributions in this work are the development of innovative machine learning strategies to model the propulsion system and a systematic methodology to develop parsimonious models and avoid the risk of overfitting. These were achieved by integrating hind-cast weather data and a data-splitting approach that ensures the trained models have generalized and are reflective of the real conditions the ship has seen.

Two applications aimed at optimizing propulsion efficiency are discussed. The first application involved the development of a *fluid deadweight management application* with the objective of optimally distributing deadweight to improve the hydrodynamic conditions of the ship in operation. The second application was the formulation of a methodology to *study the impact of biofouling on propulsion efficiency*.

Shifting the focus to the *design perspective*, the second part of the thesis addressed the energy production side of cruise ship design. The primary contribution in this second part was the development of a *Mixed Integer Linear Programming* model for cruise ship multi-energy systems. The objective of the model is to optimize the energy system's design and operation simultaneously, catering to the unique energy needs of a cruise ship. The model is generic enough to remain relevant and adaptable to future technological landscapes.

A bi-objective optimization was carried out considering lifetime costs and lifetime greenhouse gas emissions as objectives. Its resolution was approached in two distinct manners. The first involved the development of a *Pareto front* using the epsilon-constraint method, providing a spectrum of intermediary solutions. The second approach integrated *carbon taxes* into the lifetime cost calculations.

Although limited in its scope, the results of this thesis highlight the benefits of incorporating machine learning and operations research in cruise ship industry design and operations at large, and paves the way for future applications of these disciplines.

Acknowledgments

Putting into words the gratitude I have for all the people who have accompanied me on my academic journey is a daunting task. This is not least because there isn't enough space to do so comprehensively, but also because I could never be sure where to begin. Nonetheless, I will try to express it in the most sincere way I can, and I apologize in advance to anyone whom I may have inadvertently forgotten to mention.

I would like to start by acknowledging the unwavering encouragement of my family and friends. None of this would have been possible without the incessant support I have received from afar, from my mother, my brother, and my sister. In particular, I would like to thank my mother, Winnie, without whose constant guidance and encouragement (sometimes even forceful encouragement), none of my achievements would have been possible. Finally, I am deeply grateful to my partner, Sarah, for being a constant source of strength and motivation.

My utmost gratitude and respect go to my thesis directors, Romain Billot and Patrick Meyer. They provided me with incredible technical feedback and criticism, not letting me take the smallest assumption for granted. Beyond the scientific supervision, they gave me moral support throughout my thesis that was far more than I could have hoped for. I also would like to extend my thanks to Bastien Padeloup, my technical advisor. His expertise in data-driven modeling, especially in neural networks, played a crucial role in shaping my thesis. My discussions with each one of you, both individually and as a team, have helped shape not only this thesis but my way of thinking about problems in general.

I would like to thank the Chantiers de l'Atlantique for financing this thesis and, in particular, my coworkers at the Energy and Environmental Performance team. I learned a lot over these few years – both technically and personally – thanks to you guys. I especially would like to thank Matthieu Lorang for his support and mentorship.

I extend my appreciation to Professors Nour-Eddin El Faouzi and David Rey for having taken up the task of reviewing my thesis and to Professor H el ene Le Cadre for having accepted to be an examiner. I thank all three of you for your work as jury members and for creating a rich discussion during my thesis defense. I would also like to thank Professors Gilles Le Chenadec and Nicolas Chiabaut for being members of my committee and providing me with very valuable advice at crucial moments of the thesis.

I would like to acknowledge Dr. Deepesh Chandrasekaran, my high school English teacher, and Dr. Hassan Bashir, my university Political Science professor. Both of you have played a vital role in developing curiosity and a critical spirit in me in fields outside of the sciences, which I believe have been crucial in my development as a scientist and as a person.

To those named and those not mentioned by name, please know that every piece of

advice and every word of encouragement has been invaluable to me. I am deeply grateful for your contributions to this journey and for having you in my life.

Résumé Long

Contents

1	Contexte	6
2	Efficacité énergétique dans l'industrie maritime	6
2.1	Motivation	6
2.2	Efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique	8
3	Objectifs et contributions de la thèse	10
4	Organisation et structure de la thèse	11
5	Diffusion scientifique	12
6	Principaux résultats de la thèse	13
6.1	Modélisation du système propulsif et applications	13
6.2	Développement et applications d'un modèle d'optimisation multi- énergie	14

1 Contexte

Les préoccupations croissantes de ces dernières années concernant le *réchauffement climatique* obligent *l'industrie du transport maritime* à réduire son empreinte environnementale. Le transport maritime, en tant qu'un des principaux contributeurs aux émissions mondiales de CO₂, est soumis à des pressions en vue d'une transition vers des pratiques plus durables. Les organismes de réglementation ont introduit des mesures telles que le "Carbon Intensity Indicator", le "Energy Efficiency Existing Ship Index" et le "Energy Efficiency Design Index" afin de surveiller et d'orienter l'empreinte carbone de l'industrie.

Au sein de l'industrie maritime au sens large, le secteur des paquebots de croisière se distingue. Caractérisés par de grands navires qui fonctionnent presque en continu et accueillent des milliers de passagers, les paquebots de croisière ont un profil de consommation d'énergie particulier. Leurs opérations, souvent plus proches des zones habitées, les ont rendus particulièrement visibles et, par conséquent, plus sensibles aux pressions publiques et réglementaires.

Les acteurs du secteur, en particulier les chantiers navals et les compagnies de croisière, déploient des efforts considérables pour réduire l'empreinte carbone des paquebots de croisière, à la fois par des mesures proactives et en réaction à des mesures de régulation extérieures. Cela se traduit par l'exploration de carburants alternatifs, la modernisation des anciens navires pour une meilleure efficacité et la conception de nouveaux navires axés sur la durabilité. La perspective imminente de programmes de taxation du carbone souligne encore davantage les impératifs financiers et environnementaux de ces efforts.

Au cœur de ces efforts se trouve l'objectif d'*amélioration de l'efficacité énergétique*, identifié comme l'un des principaux leviers pour parvenir à la durabilité dans le secteur. Le raisonnement est clair : une meilleure efficacité énergétique se traduit par une réduction de la consommation de carburant, qui se traduit à son tour par une réduction des émissions. Mais l'amélioration de l'efficacité énergétique n'est pas une tâche unique et monolithique. Il s'agit d'un défi à multiples facettes qui implique des stratégies de réduction de la demande d'énergie, telles que l'optimisation des itinéraires et des vitesses ou l'utilisation de technologies qui minimisent la consommation d'énergie à bord. Il s'agit également de réduire la dépendance à l'égard des carburants traditionnels à base d'hydrocarbures, en explorant des solutions de remplacement telles que les biocarburants, le gaz naturel liquéfié ou même l'hydrogène. En outre, il s'agit de veiller à ce que les sources d'énergie utilisées soient exploitées au maximum de leur potentiel, en minimisant les pertes lors de la conversion et de la transmission de l'énergie.

L'équipe *Performance Énergétique et Environnementale des Chantiers de l'Atlantique (les Chantiers)* est chargée d'évaluer l'efficacité énergétique des navires de nos clients et de concevoir des solutions innovantes pour l'améliorer. L'équipe vise à influencer et à optimiser l'efficacité énergétique dès la phase de conception initiale et tout au long des opérations.

2 Efficacité énergétique dans l'industrie maritime

2.1 Motivation

Malgré la sensibilisation accrue au changement climatique et les controverses croissantes entourant l'industrie des croisières [MW18; BA09], la demande de vacances en bateau de croisière continue d'augmenter [BA09; Per20]. Le nombre de passagers de

navires de croisière a considérablement augmenté au fil des ans, passant d'environ 2 millions de passagers par an au début des années 1980 à 30 millions en 2019. Bien que la pandémie de COVID-19 ait interrompu les activités de croisière en 2020, on prévoit un retour à la normale, avec un taux de croissance annuel moyen de 7 à 8%.

D'autre part, le transport maritime mondial, y compris les navires de croisière, contribue de manière significative à la pollution de l'environnement. Les rapports indiquent que l'industrie représentait environ 2,2 à 3% des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre (GES) en 2012 et 2,8% des émissions mondiales de carbone en 2014 [Smi+15]. L'efficacité énergétique devient de plus en plus importante dans l'industrie des navires de croisière en raison de la forte demande d'énergie liée aux nombreuses installations à bord et aux services aux passagers. Ces dernières années, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) et l'Union européenne (UE) ont introduit des réglementations visant à réduire les émissions de polluants et de GES des navires, y compris des grands navires de croisière [Int09; Int12; HFB18]. Ces réglementations visent à accroître l'efficacité, à réduire la consommation de carburant et à répondre aux préoccupations environnementales.

Le paysage réglementaire de l'efficacité énergétique dans le transport maritime a été façonné par plusieurs mesures introduites par l'OMI et les autorités nationales. Ces mesures comprennent l'*Energy Efficiency Design Index* (EEDI) et l'*Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI), qui exigent que les nouveaux navires et les navires en service, respectivement, respectent des normes d'efficacité énergétique spécifiques. Le programme *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) s'applique à tous les navires neufs et existants [Int12]. L'objectif est de parvenir à une réduction substantielle des émissions de carbone (près de 80% [AB12]), en s'alignant sur les objectifs mondiaux en matière de changement climatique. En outre, l'UE a lancé ses propres initiatives, notamment le système de surveillance, de déclaration et de vérification (MRV - Monitoring Reporting and Verification en anglais) des émissions de dioxyde de carbone. Des discussions sont en cours pour inclure potentiellement les opérations de transport maritime dans le système européen d'échange de quotas d'émission (EU ETS - European Emission Trading Market Scheme) pour les émissions de CO₂ et introduire des taxes sur le carbone [Pon+21].

Outre les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'industrie du transport maritime est également confrontée à des réglementations sur les émissions d'oxydes de soufre (SO_x), d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules fines [ČHV18]. L'OMI a imposé des limites de plus en plus restrictives sur ces émissions, en particulier dans les zones critiques connues sous le nom de *SO_x Emission Controlled Areas* (SECA) et de *NO_x Emission Controlled Areas* (NECA). L'utilisation d'absorbants-neutralisateurs (*scrubbers* en anglais) ou de combustibles à faible teneur en soufre, comme le MGO ou le gaz naturel, permet de réduire les émissions de SO_x. L'installation des *scrubbers* est répandue sur les navires de croisière. Ces efforts sont conformes aux objectifs de l'UE en matière de réduction des émissions et des polluants atmosphériques.

Si l'investissement initial peut être important, les technologies à haut rendement énergétique permettent souvent aux compagnies de croisière de réaliser des économies à long terme. Ces économies peuvent provenir d'une réduction de la consommation de carburant, d'une diminution de la maintenance et d'autres gains d'efficacité opérationnelle. En outre, étant donné que les clients sont de plus en plus intéressés par la fréquentation d'entreprises qui font preuve d'un engagement en faveur du développement durable, l'investissement dans des technologies plus écologiques et une meilleure efficacité énergétique peut contribuer à atténuer les atteintes à la réputation. Il est bien

sûr nécessaire de reconnaître que cela peut parfois conduire à des cas de *greenwashing* dans l'industrie.

Les incitations monétaires, ainsi que les motivations écologiques plus larges qui poussent les compagnies de croisière à réduire l'empreinte carbone de leurs navires, ont été le facteur déterminant de la recherche et du développement visant à améliorer l'efficacité énergétique des navires de croisière.

2.2 Efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique

Dans cette sous-section, nous présentons une brève revue de la littérature concernant les améliorations de l'efficacité énergétique dans l'industrie maritime en général. La recherche de l'optimisation de l'efficacité énergétique est généralement classée en deux catégories : *l'innovation technologique* et *l'amélioration opérationnelle*. Ces deux sujets intègrent généralement deux concepts fondamentaux : la modélisation et l'optimisation.

L'innovation technologique implique l'exploration de l'intégration des nouvelles technologies dans la conception des navires. Cela englobe divers aspects tels que l'amélioration de la forme de la coque, l'incorporation de nouvelles technologies de production d'énergie, l'utilisation de sources de carburant respectueuses de l'environnement, la mise en œuvre de technologies de récupération ou de réduction des déchets, et l'adaptation des technologies terrestres à une utilisation marine, souvent appelée *marinisation*. Pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de ces technologies, les études impliquent souvent le développement des modèles. Ces modèles peuvent être basés sur des données ou sur la physique. Ils sont souvent associés à des algorithmes d'optimisation pour déterminer la conception optimale de la technologie ou de la source de carburant testée tout en tenant compte des contraintes du navire.

D'un point de vue technologique, quelques sujets clés sortent du lot. Le premier d'entre eux est *le système de récupération de la chaleur perdue (WHRS - Waste Heat Recovery System)*, qui est un système conçu pour récupérer l'énergie thermique excédentaire de diverses machines, au bénéfice des utilisateurs en aval et contribuant à des économies de carburant de 5 à 8% [BG15]. Les consommateurs en aval peuvent être des buanderies, des cuisines et des systèmes de production d'eau douce. Les WHRS ont fait l'objet d'un examen approfondi ([SP16], [BG15]). La chaleur récupérée peut également alimenter des innovations telles que les machines à cycle organique de Rankine (ORC) et les turbines à vapeur, le potentiel d'économie d'énergie dépendant du système spécifique et des caractéristiques opérationnelles du navire [Uus+19].

Les piles à combustible constituent une autre technologie importante mise en œuvre et étudiée dans l'industrie maritime. L'objectif principal de ces études est d'évaluer la faisabilité et les économies associées à l'intégration des piles à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cells*) [HCT12; DPT23; WB20] et des piles à oxyde solide (SOFC - *Solid Oxide Fuel Cells*) [HCT12; Kis+21; Bal+20]. Les SOFC se distinguent par leur rendement élevé et sont adaptées à des appels de charge régulières. Associées à la technologie des batteries, les SOFC peuvent réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre et les coûts d'exploitation par rapport aux systèmes traditionnels [Kis+21]. Une étude approfondie des technologies SOFC et de leur efficacité énergétique dans des configurations combinées a été réalisée [Buo+15]. Des analyses plus générales des différents systèmes de piles à combustible ont été réalisées [HCT12; Bie+16]. Actuellement, les principaux problèmes liés à l'intégration des technologies des piles à combustible concernent les coûts d'installation et de durée de vie associés et l'encombrement (les piles à combustible sont généralement plus grandes par kilowatt nominal que les générateurs).

Les batteries et les super condensateurs ont été largement étudiés pour leur contribution potentielle à l'amélioration de l'efficacité énergétique. L'installation de batteries dans un système composé de générateurs et de batteries pour la production d'électricité permet de faire fonctionner les générateurs à des charges plus élevées (là où il est le plus efficace) et de charger la batterie pour une utilisation ultérieure [PP+19]. Les batteries sont également souvent utilisées pour former des systèmes hybrides avec des piles à combustible afin de compenser l'incapacité de ces dernières à gérer de grandes variations de puissance [Bas+16; WB20; WPB20]. Ces systèmes hybrides visent à améliorer l'efficacité des piles à combustible et à réduire les contraintes du système, contribuant ainsi au développement de navires innovants tels que le premier navire à passagers à pile à hydrogène au monde [Bas+16].

L'intégration de carburants plus respectueux de l'environnement, tels que les biocarburants et les biocombustibles, fait également l'objet d'une grande attention dans la littérature et dans l'industrie. Ces carburants comprennent, entre autres, le bio-GNL, le e-GNL, le bio-méthanol et le e-ammoniac, et sont caractérisés par un potentiel de réchauffement global (PRG) nettement inférieur à celui des carburants conventionnels. Les principales questions qui se posent quant à l'adoption de ces carburants sont liées à l'incertitude de leurs prix et de leur disponibilité à l'avenir. Une étude récente a évalué le prix et la disponibilité à long terme des biocarburants pour l'industrie maritime [Tan+22], tandis que d'autres études se sont concentrées sur la sélection optimale de la conception du système énergétique du navire tout en considérant les biocarburants parmi les alternatives [Lag+22; RHT23].

Les études *d'amélioration opérationnelle* se concentrent principalement sur le développement de systèmes de contrôle plus intelligents et sur la fourniture de conseils opérationnels aux membres d'équipage et aux gestionnaires de flotte. De même que la recherche technologique, ces études impliquent généralement la modélisation d'un système ou d'un sous-système et l'analyse de ses performances ou son optimisation par la manipulation des paramètres du modèle. Cela englobe un large éventail de sujets, allant de la commande prédictive (*MPC - Model Predictive Control*) et de la détection d'anomalies en temps réel aux actions préalables au départ telles que la planification des itinéraires et l'optimisation de l'assiette.

Ces études mettent l'accent sur l'intégration d'approches basées sur les données et de techniques de modélisation avancées. Diverses études ont utilisé des *réseaux de neurones* (*ANN - Artificial Neural Networks*), la régression linéaire multiple ainsi que d'autres méthodes de modélisation pour quantifier l'influence des paramètres opérationnels sur le rendement énergétique et développer des modèles de prédiction de la consommation de fioul à utiliser dans des applications d'amélioration opérationnelle en aval [PJW12; Du+19; OB22; The+21; TGS18].

L'optimisation de l'assiette est une voie essentielle, tant dans la recherche que dans la pratique, pour atténuer les coûts opérationnels et les impacts environnementaux. Un cadre théorique pour comprendre l'optimisation de l'assiette du point de vue de l'hydrodynamique a été présenté, ainsi que quelques cas d'essai dans des travaux préliminaires [RML14]. Le cadre proposé pour l'optimisation de l'assiette a été mis en œuvre dans un produit commercial. D'autre part, des modèles de types *data-driven* ont également été utilisés pour l'optimisation de l'assiette, soulignant l'efficacité de l'utilisation de l'analyse des données dans des scénarios réels tenant compte de divers facteurs tels que la vitesse de navigation, le déplacement et les conditions météorologiques [PJW12; Cor+17; TGS18].

Outre l'optimisation de l'assiette, l'optimisation du routage maritime a été au cœur

des recherches visant à améliorer l'efficacité opérationnelle. L'optimisation du routage concerne généralement l'optimisation de la vitesse et du trajet du navire en fonction des conditions météorologiques prévues. Divers algorithmes ont été proposés pour trouver les vitesses et les itinéraires optimaux des navires en tenant compte des contraintes liées à l'heure d'arrivée prévue (ETA) et des conditions météorologiques [FLN10; KV12]. D'autres études se sont concentrées sur le développement de modèles pour une utilisation explicite dans les systèmes d'aide à la décision afin de prévoir la consommation d'énergie et d'optimiser la gestion des voyages par le biais du routage [Kim+22; OB22].

L'application du MPC est également très répandue dans l'industrie maritime pour relever divers défis allant du contrôle du cap du navire et de l'évitement des collisions à la gestion de l'énergie. La prédiction et le contrôle du cap des navires ont été étudiés dans le but d'éviter les collisions, de réduire l'erreur de cap et de satisfaire différentes contraintes [JCP16]. MPC a également été appliquée au contrôle des systèmes d'énergie primaire via le système de gestion de l'énergie [HSH18; Vu+17], ainsi qu'à des systèmes plus spécifiques tels que les unités à volume d'air variable dans le système HVAC [Fen+21]. Ces applications sont développées dans le but d'améliorer l'efficacité globale de ces systèmes et sous-systèmes et de réduire l'usure.

Une autre application importante de l'efficacité opérationnelle est la programmation de la maintenance. Une intervention opportune avant une dégradation extrême ou une panne éventuelle de l'équipement peut constituer une stratégie de réduction des coûts très efficace. Cette intervention peut se faire à différents niveaux d'investigation (dégradation du générateur, de l'hélice, etc.) et est généralement couplée à la détection d'anomalies. Un exemple important de la nécessité d'une intervention précoce est la dégradation de la coque due à l'encrassement biologique, un sujet que nous aborderons dans les chapitres suivants. Différents travaux ont été réalisés sur la modélisation (spécifiquement les modèles *data-driven*) et les stratégies de détection appliquées à la dégradation de l'efficacité de la propulsion due à l'encrassement biologique [Lau+21; Cor+19b; Cor+19a].

3 Objectifs et contributions de la thèse

Dans la section précédente, nous avons mis en évidence certains des principaux thèmes abordés dans la littérature concernant les améliorations de l'efficacité énergétique dans l'industrie maritime. Ces études sont variées dans leur objectif, chacune nécessitant des connaissances spécialisées dans le domaine. Les sujets sélectionnés pour la thèse ont été basés sur l'état de l'art actuel, mais aussi en concordance avec les priorités des Chantiers de l'Atlantique, ainsi qu'avec les ensembles de données disponibles.

L'objectif principal de cette thèse est de trouver des approches appropriées dans les disciplines du *machine learning* (ML) et de la *recherche opérationnelle* (OR - *Operational Research*) et de les appliquer au domaine de l'amélioration de l'efficacité énergétique des navires de croisière. Il est important de préciser que le but n'est pas de remplacer l'expertise dans le domaine de la construction et de l'exploitation des navires de croisière, mais de fournir des outils issus de ces disciplines qui peuvent contribuer à leur amélioration du point de vue de l'efficacité énergétique.

Pour ces raisons, deux sujets clés ont été sélectionnés pour une évaluation plus approfondie : la *modélisation du système de propulsion* puis la *conception d'un système multi-énergie*. La modélisation du système de propulsion revêt une grande importance pour de multiples raisons. Tout d'abord, nous pouvons exploiter une quantité importante de données de capteurs pour modéliser le système à l'aide de techniques de ML. Cela

nous permet d'améliorer notre compréhension des performances du navire dans des conditions opérationnelles et météorologiques variables, en allant au-delà des prédictions des modèles théoriques. En outre, pour certains navires, nous avons accès à des modèles physiques qui peuvent être utilisés pour évaluer les performances du modèle basé sur les données ainsi que du modèle physique. Ce sujet constitue avant tout une stratégie visant à améliorer les services liés à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle. Les connaissances acquises grâce à la modélisation du système de propulsion peuvent être exploitées dans des tâches en aval actuellement en cours de développement, telles que l'optimisation du routage, l'analyse de l'encrassement de la coque et l'optimisation de l'assiette.

Du point de vue de *l'innovation technologique*, l'étude sur la conception de systèmes multi-énergies est d'une grande importance car elle répond à la nécessité d'améliorer notre approche actuelle de la prise de décision en matière de conception. En explorant ce sujet, nous visons à établir un cadre d'optimisation qui facilite l'essai de nouvelles technologies et la recherche de solutions optimales en fonction de leur impact sur les coûts, les émissions et la faisabilité. L'étude sur la conception de systèmes multi-énergies s'appuie sur diverses sources d'information à notre disposition. Nous avons accès aux données des fabricants obtenues lors des essais d'acceptation en usine pour diverses technologies, ce qui nous donne des indications précieuses sur leurs caractéristiques de performance. En outre, notre équipe a développé des outils pour simuler les besoins énergétiques du navire, en tenant compte de tous les consommateurs d'énergie. Nous disposons ainsi d'un grand nombre d'éléments nécessaires pour améliorer notre compréhension des améliorations potentielles de l'efficacité énergétique qui peuvent être apportées par les nouvelles technologies, ainsi que pour informer les processus de prise de décision au sein des Chantiers.

4 Organisation et structure de la thèse

Le contenu de cette thèse est divisé en deux parties distinctes, chacune se concentrant sur l'un des sujets clés identifiés : la modélisation du système de propulsion et la conception du système multi-énergie. Un organigramme de la thèse est présenté à la figure 1.

La première partie de la thèse se penche sur le domaine de la modélisation des systèmes de propulsion. Nous commençons par une introduction à l'efficacité de la propulsion et une revue complète de la littérature sur la modélisation de la propulsion et le rôle du ML dans la modélisation du système de propulsion. Nous discutons ensuite d'une série de modèles typiquement utilisés dans les Chantiers. Nous nous plongeons ensuite dans les modèles que nous proposons en utilisant les données des capteurs et la modélisation ML, en les expérimentant et en les validant par rapport à des repères théoriques et empiriques. Le but ultime est d'utiliser ces modèles pour améliorer l'efficacité opérationnelle, et nous discutons des cas d'utilisation potentiels dans des domaines tels que l'optimisation de l'assiette et l'analyse de l'encrassement de la coque.

La deuxième partie de la thèse se concentre sur la conception de systèmes multi-énergies. Notre approche consiste à modéliser l'interaction des différentes sources d'énergie à bord d'un navire en utilisant des techniques d'optimisation mathématique. Tout comme dans la première partie, nous commençons par une revue de la littérature afin de situer notre travail dans un contexte plus large. Nous articulons ensuite le modèle que nous proposons et discutons des hypothèses et des implications en termes de coûts, d'émissions et de faisabilité. Nous concluons en réalisant des expériences dans le but de mieux

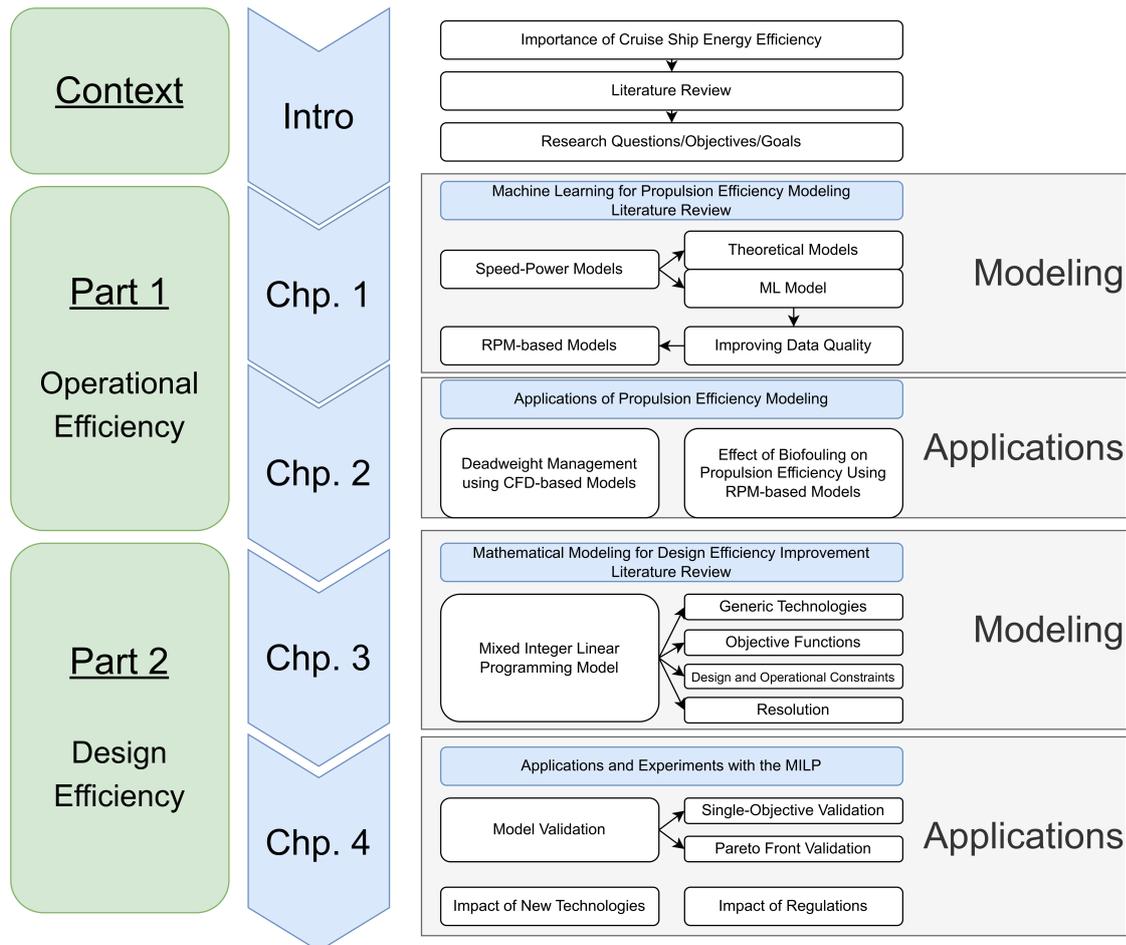


FIGURE 1 – A flowchart of the organization and structure of the thesis

comprendre les effets que les nouvelles technologies, les stratégies opérationnelles et les stratégies réglementaires peuvent avoir sur l'efficacité énergétique de la conception et de l'exploitation des paquebots de croisière.

5 Diffusion scientifique

Au cours de la thèse, nous avons publié un article de conférence et un autre article de revue est en attente d'examen. L'article de conférence, intitulé *New Insights into the Propulsion Power Prediction of Cruise Ships*, a été présenté à la 2021 IEEE 33rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI) [Gon+]. Dans cet article, nous discutons d'une lacune méthodologique prévalente dans la modélisation des systèmes de propulsion à l'aide de l'apprentissage automatique. Nos conclusions démontrent que lorsque des points de données de séries temporelles individuelles sont mélangés et divisés en ensembles de formation et de validation, il en résulte des ensembles de données fortement corrélés. Cette corrélation est particulièrement prononcée avec les données d'échantillonnage à haute fréquence. Une telle méthodologie conduit à une perception exagérée de la précision prédictive du modèle et produit des modèles surdimensionnés qui réduisent l'erreur de validation simplement par surajustement. Les détails du travail effectué dans cet article sont présentés dans la section ?? du chapitre ?? de la partie 1 de ce manuscrit.

Nous avons également soumis un article intitulé *Optimal Design and Operation of Cruise*

Ship Multi-Energy Systems : an MILP Formulation à la revue *Applied Energy*, qui est actuellement en cours d'examen. Dans cet article, nous décrivons la formulation d'un modèle de *Mixed-Integer Linear Programming (MILP)* pour l'optimisation simultanée de la conception et de l'exploitation d'un système multi-énergie de navire de croisière. L'article représente un sous-ensemble du travail présenté dans la partie 2 de cette thèse.

6 Principaux résultats de la thèse

6.1 Modélisation du système propulsif et applications

La première partie de la thèse aborde la modélisation du système de propulsion du point de vue de *machine learning*. Nous développons un modèle qui quantifie la relation entre la puissance propulsive en fonction de la vitesse et d'autres paramètres opérationnels et externes, y compris les données de prévision du vent et des vagues. Ce modèle puissance-vitesse est l'approche dominante dans les analyses d'efficacité énergétique.

Un examen critique de la littérature met en évidence un défaut méthodologique courant dans les processus de traitement et de séparation des données, qui se traduit par des ensembles de données d'entraînement et de validation fortement corrélés et des erreurs de validation exagérément optimistes. Nous démontrons empiriquement ce défaut et introduisons une méthodologie systématique pour séparer les données en ensembles d'entraînement, de validation et de test, garantissant ainsi des modèles plus réalistes et plus fiables.

Nous abordons également le rôle essentiel d'une sélection rigoureuse des données, en particulier des données météorologiques, dans la modélisation des systèmes de propulsion. Le travail met l'accent sur le manque de fiabilité des données des capteurs de vent et propose l'utilisation de données rétrospectives comme alternative plus fiable, compte tenu de leur précision à refléter les conditions météorologiques réelles auxquelles le navire est confronté. Pour pallier l'indisponibilité commerciale des services de données météorologiques rétrospectives, un algorithme interne d'interpolation spatio-temporelle est développé et validé, montrant une différence moyenne absolue relativement faible par rapport à une source tierce.

En outre, nous introduisons une nouvelle méthodologie pour la modélisation du système de propulsion, en utilisant les tours par minute (RPM) des hélices comme donnée d'entrée au lieu de la vitesse du navire, et en sortant du modèle, à la fois la puissance et la vitesse du navire. Cela représente un changement fondamental dans l'approche de la conception des modèles ML pour la modélisation des systèmes de propulsion, qui est plus en phase avec les stratégies opérationnelles réelles. Le modèle est encore amélioré en incorporant l'aspect temporel de l'ensemble de données à l'aide d'une représentation LSTM. Le modèle final réduit l'erreur de prédiction de la puissance de propulsion pour le navire étudié par trois fois, de **0,95MW** à **0,34MW** sur l'ensemble de données de test.

Nous traitons, ensuite, deux applications pratiques des modèles de propulsion, en se concentrant sur l'exploration de deux applications distinctes. La première application utilise le modèle puissance-vitesse dérivé des simulations CFD, incorporant les effets de l'assiette et du tirant d'eau du navire, afin d'optimiser le poids mort du navire. Le choix de ce modèle se justifie par le fait que, dans les conditions réelles d'exploitation, les données de mesure couvrent rarement toute la gamme des assiettes et des tirants d'eau disponibles.

Par la suite, nous présentons le modèle mathématique du problème de gestion du poids

mort. Deux algorithmes ont été développés pour l'optimisation de la distribution du poids mort sur le navire - un algorithme itératif, similaire à un *greedy algorithm*, et un algorithme génétique. Le premier algorithme est une extension d'un algorithme développé précédemment par les Chantiers, étendu pour inclure des calculs et des contraintes plus précis et pour se généraliser à de nouveaux navires. Cependant, l'algorithme génétique est mis en évidence pour ses capacités d'optimisation supérieures et polyvalentes par rapport à l'algorithme itératif, fournissant de multiples solutions quasi-optimales avec un temps de calcul prévisible.

La deuxième application explore l'impact de l'encrassement biologique (*biofouling* en anglais) sur le système de propulsion d'un navire. Dans cette application, nous privilégions l'utilisation du modèle ML développé précédemment, ainsi que les techniques de traitement des données et d'acquisition des données météorologiques. Cette approche, étendue par l'incorporation du temps passé depuis la mise en cale sèche en tant que variable, permettant une prédiction simultanée de la puissance et de la vitesse, donne un aperçu de la dégradation due à l'encrassement biologique dans des conditions d'exploitation réelles, tant du point de vue de la puissance ajoutée que de celui de la perte de vitesse. Les résultats révèlent des implications significatives, notamment l'augmentation des besoins en énergie et des coûts opérationnels, et soulignent l'importance d'une gestion efficace de l'encrassement biologique dans les opérations maritimes.

6.2 Développement et applications d'un modèle d'optimisation multi-énergie

La principale contribution de la deuxième partie de la thèse est le développement d'un modèle d'optimisation de *Mixed Integer Linear Programming* pour la conception des systèmes multi-énergie des paquebots de croisière. Nous décrivons un modèle mathématique couvrant les principales contraintes de conception et d'opération et deux objectifs importants : les coûts du cycle de vie et les émissions de gaz à effet de serre du cycle de vie. Ce cadre ajoute principalement une couche d'optimisation au cadre de simulation existant utilisé par l'équipe *PerfEE* des Chantiers. La formulation du problème d'optimisation en tant que modèle linéaire permet de trouver des solutions exactes, mais nécessite également la linéarisation de nombreuses contraintes et calculs. Les différentes techniques de linéarisation utilisées sont décrites pour chacune des contraintes non linéaires rencontrées.

Enfin, nous examinons la nature fondamentalement conflictuelle des deux objectifs, étant donné que les nouvelles technologies plus respectueuses de l'environnement qui sont étudiées sont beaucoup plus coûteuses que les technologies actuelles. Nous proposons l'utilisation de deux méthodes pour résoudre le problème d'optimisation bi-objectif - la première étant la méthode classique du *front de Pareto* et la seconde étant l'inclusion de mesures économiques de réduction du carbone telles que les *taxes sur le carbone*.

Les résultats du modèle ont été validés par une combinaison de tests empiriques et de vérifications d'experts. Une fois la validité du modèle confirmée, la recherche s'est concentrée sur la réponse à deux questions principales importantes pour les Chantiers. La première question vise à examiner l'impact des nouvelles technologies sur la conception des futurs navires. Plus précisément, nous voulons savoir quelles économies nous pouvons espérer réaliser par rapport à l'installation d'un système multi-énergie de base.

La deuxième question porte sur les impacts potentiels des futures mesures de taxe carbone et d'autres dispositifs similaires conçus pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur maritime. La principale question de recherche concerne la fai-

sabilité économique de l'installation de technologies plus propres, mais plus coûteuses, dans le cadre de ces programmes. À cette fin, nous utilisons la fonction objective des coûts du cycle de vie en présence d'une taxe carbone décrite précédemment et réalisons une analyse de sensibilité sur différents régimes hypothétiques de taxe carbone. Cette analyse a deux objectifs principaux. Tout d'abord, du point de vue des Chantiers et des armateurs, elle cherche à identifier les solutions énergétiques les plus rentables en fonction de différents taux de taxe carbone. Deuxièmement, les résultats sont également utiles pour les organismes de réglementations, car ils montrent la capacité de ces régimes fiscaux à encourager la mise en place de systèmes énergétiques plus écologiques sur les navires dans le contexte technologique actuel.

Bibliographie

- [AB12] Kevin ANDERSON et Alice BOWS. "Executing a Scharnow turn : reconciling shipping emissions with international commitments on climate change". In : *Carbon management* 3.6 (2012), p. 615-628.
- [BA09] Juan Gabriel BRIDA et Sandra Zapata AGUIRRE. "The impacts of the cruise industry on tourism destinations". In : *The impacts of the cruise industry on tourism destinations* (2009), p. 110-117.
- [Bal+20] Francesco BALDI, Stefano MORET, Kari TAMMI et François MARÉCHAL. "The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems". In : *Energy* 194 (mars 2020), p. 116811. ISSN : 0360-5442. DOI : [10.1016/J.ENERGY.2019.116811](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116811).
- [Bas+16] Ameen M. BASSAM, Alexander B. PHILLIPS, Stephen R. TURNOCK et Philip A. WILSON. "An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel". In : *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (47 déc. 2016), p. 22453-22464. ISSN : 0360-3199. DOI : [10.1016/J.IJHYDENE.2016.08.049](https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.08.049).
- [BG15] Francesco BALDI et Cecilia GABRIELI. "A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications". In : *Energy* 80 (fév. 2015), p. 654-665. ISSN : 0360-5442. DOI : [10.1016/J.ENERGY.2014.12.020](https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.020).
- [Bie+16] Lindert van BIERT, Milinko GODJEVAC, Klaas VISSER et Purushothaman Vellayani ARAVIND. "A review of fuel cell systems for maritime applications". In : *Journal of Power Sources* 327 (sept. 2016), p. 345-364. ISSN : 0378-7753. DOI : [10.1016/J.JPOWSOUR.2016.07.007](https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.07.007).
- [Buo+15] Annamaria BUONOMANO, Francesco CALISE, Massimo Dentice D'ACCADIA, Adolfo PALOMBO et Maria VICIDOMINI. "Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power : A review". In : *Applied Energy* 156 (2015), p. 32-85. ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.027>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915007850>.
- [ČHV18] Leo ČAMPARA, Nermin HASANSPAHIĆ et Srđan VUJIĆIĆ. "Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines". In : *SHS web of conferences*. T. 58. EDP Sciences. 2018, p. 01004.
- [Cor+17] Andrea CORADDU, Luca ONETO, Francesco BALDI et Davide ANGUITA. *Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation : A data analytics perspective*. Jan. 2017. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2016.11.058](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.058).

- [Cor+19a] Andrea CORADDU, Serena LIM, Luca ONETO, Kayvan PAZOUKI, Rose NORMAN et Alan John MURPHY. "A novelty detection approach to diagnosing hull and propeller fouling". In : *Ocean Engineering* 176 (mars 2019), p. 65-73. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2019.01.054](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.054).
- [Cor+19b] Andrea CORADDU, Luca ONETO, Francesco BALDI, Francesca CIPOLLINI, Mehmet ATLAR et Stefano SAVIO. "Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling". In : *Ocean Engineering* 186 (août 2019), p. 106063. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2019.05.045](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.045).
- [DPT23] Chiara DALL'ARMI, Davide PIVETTA et Rodolfo TACCANI. "Hybrid PEM Fuel Cell Power Plants Fuelled by Hydrogen for Improving Sustainability in Shipping : State of the Art and Review on Active Projects". In : *Energies* 16.4 (2023), p. 2022.
- [Du+19] Yuquan DU, Qiang MENG, Shuaian WANG et Haibo KUANG. "Two-phase optimal solutions for ship speed and trim optimization over a voyage using voyage report data". In : *Transportation Research Part B : Methodological* 122 (avr. 2019), p. 88-114. ISSN : 01912615. DOI : [10.1016/j.trb.2019.02.004](https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.02.004).
- [Fen+21] Guozeng FENG, Shuya LEI, Xinxin GU, Yuejiao GUO et Junyi WANG. "Predictive control model for variable air volume terminal valve opening based on backpropagation neural network". In : *Building and Environment* 188 (jan. 2021), p. 107485. ISSN : 0360-1323. DOI : [10.1016/J.BUILDENV.2020.107485](https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107485).
- [FLN10] Kjetil FAGERHOLT, Gilbert LAPORTE et Inge NORSTAD. "Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes". In : t. 61. Palgrave Macmillan Ltd., 2010, p. 523-529. DOI : [10.1057/jors.2009.77](https://doi.org/10.1057/jors.2009.77).
- [Gon+] Fred GONSALVES, Bastien PASDELOUP, Romain BILLOT, Patrick MEYER, Arnaud JACQUES et Matthieu LORANG. "New Insights into the Propulsion Power Prediction of Cruise Ships". In : (). DOI : [10.1109/ICTAI52525.2021.00135](https://doi.org/10.1109/ICTAI52525.2021.00135). URL : <https://hal-imt-atlantique.archives-ouvertes.fr/hal-03355574..>
- [HCT12] Jingang HAN, Jean Frédéric CHARPENTIER et Tianhao TANG. "State of the art of fuel cells for ship applications". In : *2012 IEEE international symposium on industrial electronics*. IEEE. 2012, p. 1456-1461.
- [HFB18] Stephen HORVATH, Mahdi FASIHI et Christian BREYER. "Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector : Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040". In : *Energy Conversion and Management* 164 (mai 2018), p. 230-241. ISSN : 0196-8904. DOI : [10.1016/J.ENCONMAN.2018.02.098](https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.02.098).
- [HSH18] Jun HOU, Jing SUN et Heath HOFMANN. "Adaptive model predictive control with propulsion load estimation and prediction for all-electric ship energy management". In : *Energy* 150 (mai 2018), p. 877-889. ISSN : 0360-5442. DOI : [10.1016/J.ENERGY.2018.03.019](https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.019).
- [Int09] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *MEPC.1/Circular.684 – Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)*. 2009. URL : https://www.imorules.com/MEPCCIRC_684.html.

- [Int12] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Resolution MEPC.213(63) – 2012 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. Accessed : 2023-06-23. 2012. URL : https://www.imorules.com/MEPCRES_213.63.html.
- [JCP16] Tor A. JOHANSEN, Andrea CRISTOFARO et Tristan PEREZ. “Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control”. In : *IFAC-PapersOnLine* 49 (23 jan. 2016), p. 14-21. ISSN : 2405-8963. DOI : [10.1016/J.IFACOL.2016.10.315](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.315).
- [Kim+22] Ji Yoon KIM, Jong Hak LEE, Ji Hyun OH et Jin Seok OH. “A Comparative Study on Energy Consumption Forecast Methods for Electric Propulsion Ship”. In : *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (1 jan. 2022). ISSN : 20771312. DOI : [10.3390/jmse10010032](https://doi.org/10.3390/jmse10010032).
- [Kis+21] Lukas KISTNER, Fritjof L. SCHUBERT, Christine MINKE, Astrid BENSMANN et Richard HANKE-RAUSCHENBACH. “Techno-economic and Environmental Comparison of Internal Combustion Engines and Solid Oxide Fuel Cells for Ship Applications”. In : *Journal of Power Sources* 508 (oct. 2021), p. 230328. ISSN : 0378-7753. DOI : [10.1016/J.JPOWSOUR.2021.230328](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230328).
- [KV12] Odysseas T. KOSMAS et Dimitrios S. VLACHOS. “Simulated annealing for optimal ship routing”. In : *Computers and Operations Research* 39 (3 mars 2012), p. 576-581. ISSN : 03050548. DOI : [10.1016/j.cor.2011.05.010](https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.05.010).
- [Lag+22] Benjamin LAGEMANN, Elizabeth LINDSTAD, Kjetil FAGERHOLT, Agathe RIALLAND et Stein Ove ERIKSTAD. “Optimal ship lifetime fuel and power system selection”. In : *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 102 (jan. 2022), p. 103145. ISSN : 1361-9209. DOI : [10.1016/J.TRD.2021.103145](https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.103145).
- [Lau+21] Anastasia LAURIE, Enrico ANDERLINI, Jesper DIETZ et Giles THOMAS. “Machine learning for shaft power prediction and analysis of fouling related performance deterioration”. In : *Ocean Engineering* (2021), p. 108886. ISSN : 0029-8018. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108886>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821003218>.
- [MW18] Timothy MACNEILL et David WOZNIAK. “The economic, social, and environmental impacts of cruise tourism”. In : *Tourism Management* 66 (2018), p. 387-404. ISSN : 0261-5177. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.002>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261517717302418>.
- [OB22] Orkun Burak OZTURK et Ersan BAŞAR. “Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping”. In : *Ocean Engineering* 243 (jan. 2022), p. 110209. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/J.OCEANENG.2021.110209](https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110209).
- [Per20] Doris PERUČIĆ. “Analysis of the world cruise industry”. In : *DIEM : Dubrovnik International Economic Meeting*. T. 5. 1. Sveučilište u Dubrovniku. 2020, p. 89-100.
- [PJW12] Jóan Petur PETERSEN, Daniel J. JACOBSEN et Ole WINTHER. “Statistical modelling for ship propulsion efficiency”. In : *Journal of Marine Science and Technology* 17 (1 mars 2012), p. 30-39. ISSN : 09484280. DOI : [10.1007/s00773-011-0151-0](https://doi.org/10.1007/s00773-011-0151-0).

- [Pon+21] Aleix PONS, Conall MARTIN, Ella ANDREW, Helen FINNEY, Honj KWON, Katie MILLARD, Marianna BUDARAGINA, Tim SCARBROUGH, Pelopidas SISKOS, Alessia DE VITA et al. *Study on EU ETS for Maritime Transport and Possible Alternative Options of Combinations to Reduce Greenhouse Gas Emissions*. Rapp. tech. 2021.
- [PP+19] César O PERALTA P, Giovani TT VIEIRA, Simon MEUNIER, Rodrigo J VALE, Mauricio BC SALLES et Bruno S CARMO. "Evaluation of the CO2 emissions reduction potential of Li-ion batteries in ship power systems". In : *Energies* 12.3 (2019), p. 375.
- [RHT23] Antti RITARI, Janne HUOTARI et Kari TAMMI. "Marine vessel powertrain design optimization : Multiperiod modeling considering retrofits and alternative fuels". In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M : Journal of Engineering for the Maritime Environment* (2023). ISSN : 20413084. DOI : [10.1177/14750902221145747](https://doi.org/10.1177/14750902221145747).
- [RML14] Maciej REICHEL, Anton MINCHEV et N.L. LARSEN. "Trim Optimisation - Theory and Practice". In : *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8 (3 oct. 2014), p. 387-392. ISSN : 2083-6473. DOI : [10.12716/1001.08.03.09](https://doi.org/10.12716/1001.08.03.09).
- [Smi+15] Tristan WP SMITH, JP JALKANEN, BA ANDERSON, JJ CORBETT, J FABER, S HANAYAMA, E O'KEEFFE, S PARKER, L JOHANSSON, L ALDOUS et al. "Third IMO greenhouse gas study 2014". In : (2015).
- [SP16] Dig Vijay SINGH et Eilif PEDERSEN. "A review of waste heat recovery technologies for maritime applications". In : *Energy Conversion and Management* 111 (2016), p. 315-328. ISSN : 0196-8904. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.073>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415011826>.
- [Tan+22] Eric CD TAN, Kylee HARRIS, Stephen M TIFFT, Darlene STEWARD, Christopher KINCHIN et Thomas N THOMPSON. "Adoption of biofuels for marine shipping decarbonization : A long-term price and scalability assessment". In : *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 16.4 (2022), p. 942-961.
- [TGS18] Nikos THEMELIS, Christos GIORDAMLIS et Christos SPANDONIDIS. *A COMPARATIVE STUDY ON SHIP PERFORMANCE ASSESSMENT BASED ON NOON REPORT AND CONTINUOUS MONITORING SYSTEM DATASETS*. 2018. URL : <https://www.researchgate.net/publication/330400661>.
- [The+21] Panayiotis THEODOROPOULOS, Christos C SPANDONIDIS, Nikos THEMELIS, Christos GIORDAMLIS et Spilios FASSOIS. "Evaluation of different deep-learning models for the prediction of a ship's propulsion power". In : *Journal of Marine Science and Engineering* 9.2 (2021), p. 116.
- [Uus+19] Antti UUSITALO, Janne NERG, Aki GRÖNMAN, Samuli NIKKANEN et Mia ELG. "Numerical analysis on utilizing excess steam for electricity production in cruise ships". In : *Journal of Cleaner Production* 209 (fév. 2019), p. 424-438. ISSN : 0959-6526. DOI : [10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.279](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.279).
- [Vu+17] Tuyen Van VU, David GONSOULIN, Fernand DIAZ, Chris S EDRINGTON et Touria EL-MEZYANI. "Predictive Control for Energy Management in Ship Power Systems Under High-Power Ramp Rate Loads". In : *IEEE Transactions On Energy Conversion* 32 (2 2017). DOI : [10.1109/TEC.2017.2692058](https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2692058). URL : <http://ieeexplore.ieee.org..>

- [WB20] Peng WU et Richard BUCKNALL. "Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry". In : *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (4 jan. 2020), p. 3193-3208. ISSN : 0360-3199. DOI : [10.1016/J.IJHYDENE.2019.11.152](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.152).
- [WPB20] Peng WU, Julius PARTRIDGE et Richard BUCKNALL. "Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships". In : *Applied Energy* 275 (2020), p. 115258.

Titre : Fouille de données et Recherche Opérationnelle pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des paquebots de croisière

Mots clés : Machine learning, Recherche opérationnelle, Efficacité énergétique, Paquebots de croisière

Résumé : Les préoccupations croissantes de ces dernières années concernant le réchauffement climatique obligent l'industrie du transport maritime à réduire son empreinte environnementale, et en particulier le secteur des paquebots de croisière. L'objectif principal de cette thèse est l'exploration et le développement de méthodes de *machine learning* et *recherche opérationnelle* afin de fournir des stratégies à même d'améliorer l'efficacité énergétique des paquebots, au niveau des opérations et de la conception.

Du point de vue opérationnel, notre recherche est consacrée à l'optimisation du système de propulsion, le plus grand consommateur d'énergie d'un paquebot de croisière. Nos principales contributions dans ce travail sont le développement de stratégies innovantes de *machine learning* pour modéliser le système de propulsion et une méthodologie systématique pour favoriser des modèles parcimonieux et éviter le risque de sur-apprentissage.

Deux applications visant à optimiser l'efficacité de

la propulsion sont examinées. La première concerne le développement d'une *application de gestion du poids mort des fluides* tandis que la deuxième s'intéresse à l'impact de l'encrassement biologique sur l'efficacité de la propulsion.

La deuxième partie de la thèse se focalise sur la production d'énergie dans le cadre de la conception des paquebots de croisière. La principale contribution de cette deuxième partie est le développement d'un modèle mathématique (MILP) pour les systèmes multi-énergies des paquebots de croisière, qui optimise simultanément la conception et le fonctionnement du système d'énergie. Une optimisation bi-objectif a ainsi été réalisée en considérant *les coûts et les émissions de gaz à effet de serre sur la durée de vie*.

Les résultats de cette thèse ouvrent la voie à de futures applications du *machine learning* et de la *recherche opérationnelle* dans la conception et les opérations de l'industrie des paquebots de croisière.

Title: Leveraging Machine Learning and Operations Research to Enhance Cruise Ship Energy Efficiency

Keywords: Machine learning, Operations research, Energy efficiency, Cruise ship sector

Abstract: Amid growing concerns over global warming, the shipping industry, particularly the *cruise ship sector*, has come under increased scrutiny. This thesis focuses on harnessing *machine learning* and *operations research* to enhance energy efficiency within the industry. The work has focused on two broad aspects of energy efficiency in cruise ships: *operational* and *design* energy efficiency.

From an operational perspective, the research prioritizes the optimization of the propulsion system, a cruise ship's primary energy consumer. Key contributions include innovative machine learning methodologies for the propulsion system, ensuring real-world applicability through hindcast weather data and a systematic data-splitting approach.

Two applications, fluid deadweight management and studying biofouling's impact on propulsion efficiency, are discussed.

On the design front, we introduce a *Mixed Integer Linear Programming* model for cruise ship multi-energy systems, aiming to optimize design and operation concurrently. A bi-objective optimization considering *lifecycle costs and greenhouse gas emissions* was undertaken, with solutions derived from the epsilon-constraint method and by integrating carbon taxes.

Overall, this work underscores the potential of machine learning and operations research in advancing the cruise ship industry's energy efficiency, laying a foundation for their broader applications in the future.