

## TRAVAIL D'ETUDES ET DE RECHERCHE

Présenté dans le cadre de l'année i4 GM

### DÉFINITION ET CRÉATION DE MODÈLES 3D DE NAVIRES À PROPULSION VÉLIQUE

Auteurs

Julien RIEFFEL – Lilou CORLAY – Malo SELOSSE



*Figure 1: Cargo E-Ship 1, Emden Hafen, CN-02.jpg*

Préparé sous la direction de : PEDRO MERINO-LASO, professeur à l'ENSM -  
CHRISTOPHE VANHORICK, professeur à l'ENSM – FLORENT RICHARD, développeur  
(PROJET SOMOS)

Année scolaire de soutenance : 2024/2025

## Remerciements :

Tout d'abord, nous souhaitons remercier l'ensemble des enseignants et intervenants de l'Ecole Nationale Supérieure Maritime de Nantes pour la transmission de leurs connaissances.

Nous remercions Monsieur Pedro MERINO-LASO, chargé de recherche en informatique et tuteur de projet, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils tout au long du projet.

Nous tenons vivement à remercier Monsieur Florent RICHARD, développeur informatique et tuteur de projet pour, son engagement, sa flexibilité et sa capacité à toujours trouver des solutions adaptées aux défis rencontrés. Son soutien technique et ses conseils pratiques ont été essentiels à l'avancement du projet.

Enfin, nous tenons à remercier Monsieur Christophe VANHORICK, enseignant hydrodynamique et tuteur de projet pour son expertise.

# Table des matières

Remerciements : .....	2
Abstract .....	5
Résumé .....	6
Introduction : .....	7
I. Etat des lieux.....	10
1. Formation des marins .....	10
1.1. Objectifs généraux .....	11
1.2 Exigences pour l'évaluation des compétences : .....	11
1.3 Exigences spécifiques aux simulateurs de navigation .....	11
1.4 Objectifs pédagogiques .....	12
2. Sociétés de classification .....	12
3. Simulateurs existants.....	14
4. Technologies WASP existantes .....	15
5. Analyse de l'état des lieux.....	16
5.1 Scénarios essentiels .....	16
5.2 Gestion des défaillances .....	17
5.3 Modélisation .....	17
5.4 Système WASP .....	19
II. Bridge Command.....	20
1. Le fichier .obj.....	20
2. Le dossier Boat.ini .....	20
2.1 Variables thermiques .....	22
2.2 Variables véliques .....	22
3. Le dossier environnement.ini.....	22
3.1 Initialisation via le fichier Environment.ini .....	22
3.2 Contrôle dynamique via le Map Controller .....	23
3.3 Limites actuelles du modèle météo .....	23
III. Modélisation 3D.....	24
1. Identification des besoins pour la modélisation .....	24
2. Création d'un modèle de navire sur Delftship .....	24
3. Modification des textures sur blender .....	28
IV. Modélisation des variables .....	37
1. Variables thermiques et véliques .....	37
1.1 Variables du boat.ini pour la propulsion thermique .....	37
1.2. Variables pour la propulsion vélique .....	42
2. Le fichier .nc .....	49
2.1 Génération des données : Shiplify et structure du fichier NetCDF .....	50
2.2 Intégration dans Bridge Command .....	50

V. La modélisation du vent .....	52
1. État des lieux de la modélisation du vent dans les simulateurs.....	52
1.1 Modèles météorologiques utilisés .....	52
1.2 Traitement du vent dans les simulateurs .....	53
2. Extensibilité .....	54
2.1 Code source en C++17.....	54
2.2 Réseau et communication .....	55
3. Vers une modélisation plus réaliste du vent dans Bridge Command .....	55
VI. Conclusion.....	56
Bibliographie & Sitographie : .....	58
Table des illustrations .....	60
Tables des annexes: .....	61

# Abstract

To respond to the climate emergency and growing environmental standards, sail propulsion is emerging as a sustainable alternative for maritime transport. This report is part of the SOMOS project and proposes an integrated approach to modelling and training in wind-assisted navigation for bridge simulators. The main objective is to develop a realistic simulator for merchant ships equipped with wind-assisted propulsion systems (WASP). It must comply with regulatory requirements.

Our work begins with a review of regulations, classification standards and existing simulator technologies to determine our criteria for 3D ship modelling, the corresponding variables and the essential scenarios to be integrated. Next, a significant part of our work details the modelling of ships and their implementation in the simulator (Bridge Command). Finally, this report also analyses wind modelling in the simulator and the integration of aerodynamic forces into the open-source simulator.

Keywords: [WASP, simulator, modelling, STCW, variables]

# Résumé

Afin de répondre à l'urgence climatique et aux normes environnementales grandissantes, la propulsion vélique apparaît comme une alternative durable pour le transport maritime. Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet SOMOS et propose une approche intégrée de la modélisation et de la formation à la navigation assistée par le vent, pour les simulateurs passerelles. L'objectif principal, est de développer un simulateur réaliste pour les navires marchands équipés de systèmes de propulsion assistée (WASP). Il doit être conforme aux exigences réglementaires.

Notre travail commence par un état des lieux réglementaire, des standards de classification et des technologies existantes de simulateurs afin de déterminer d'abord nos critères de modélisation de navires 3D, les variables correspondantes et les scénarios essentielles à intégrer. Ensuite, une part importante de notre travail détaille la modélisation des navires et leur implémentation dans le simulateur (Bridge Command). Enfin, ce rapport est aussi consacré à une analyse de la modélisation du vent dans le simulateur, ainsi qu'à l'intégration des forces aérodynamiques dans le simulateur open source.

Mots clés : [WASP, simulateur, modélisation, STCW, variables]

### Introduction :

Le transport maritime représentant 3% des émissions de gaz à effet de serre, il est devenu un enjeu important au niveau mondial. Les normes internationales évoluent donc en se rigidifiant afin de limiter la pollution et d'encourager les constructeurs à se tourner vers des solutions plus durables.

La voile est le plus ancien mode de propulsion utilisé en mer, elle a évolué au fil du temps en tirant partie des avancées technologiques pour proposer une solution durable face aux grands défis maritimes actuels que sont la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution marine.

La navigation à voile est sous développée dans la marine marchande et la défense alors qu'elle présente de nombreux avantages du fait de son accessibilité, sa permanence et sa gratuité. De plus, les technologies modernes et les techniques de simulation apparaissent très prometteuses pour réinventer la voile comme moyen d'opérations commerciales, scientifiques et de Défense. Ce rapport souligne l'importance de la navigation à voile pour des raisons environnementales et opérationnelles, en affirmant qu'elle joue un rôle majeur dans la réduction des émissions du transport maritime, dans l'amélioration de l'autonomie des navires et dans la promotion de la durabilité des activités de recherche océanique, tout en se concentrant sur les besoins en formation à travers l'utilisation de simulateurs de passerelle.

La voile est souvent perçue comme obsolète. Pourtant, le développement récent de systèmes de propulsion utilisant l'énergie vélique ou encore des techniques de navigation par optimisation dynamique montre son rôle central dans les activités maritimes actuelles. De nombreux systèmes existent aujourd'hui, comme les rotors Flettner, les kites ou les voiles rigides. Selon des études<sup>1</sup>, ces technologies pourraient réduire de manière substantielle les émissions et les coûts du transport maritime si elles sont mises en œuvre efficacement. De plus, les compétitions de voile ont encouragé l'utilisation de la simulation et l'optimisation aérodynamique, ce qui pourrait aider à améliorer la formation et l'adaptation des marins aux nouveaux dispositifs de navigation à voile. Initialement développés pour la compétition, ces systèmes se révèlent très efficaces pour améliorer les performances des sportifs.

Aujourd'hui, le secteur maritime est confronté à un durcissement des réglementations environnementales, notamment concernant l'annexe VI<sup>2</sup> de la convention MARPOL et de l'Accord

---

<sup>1</sup> A review of wind-assisted ship propulsion for sustainable commercial shipping: latest developments and future stakes L Khan, J J R Macklin, B C D Peck, O Morton, J-B R G Souppiez

<sup>2</sup> Annexe VI de la MARPOL concerne la prévention de la pollution de l'air par les navires.

## Introduction

de Paris<sup>3</sup> sur le climat. L'énergie vélique pourrait permettre de réduire jusqu'à 30 % les émissions de gaz à effet de serre. On peut s'attendre à un durcissement de ces réglementations, impliquant que les futurs navires devront être exempts d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier ceux construits après 2030. En anticipation de ces renforcements permettant la protection environnementale, les navires à voile représentent donc une opportunité précieuse pour la pérennité d'une activité indispensable, répondant aux contraintes environnementales actuelles.

En effet, la propulsion vélique présente de nombreux avantages comme la réduction de la pollution sonore sous-marine, de la pollution atmosphérique... Elle permet également d'augmenter l'autonomie des navires et réduire les coûts d'exploitation et de maintenance.

Cependant, les navires utilisant des systèmes de propulsion vélique nécessitent que les marins disposent d'une formation spécifique. En effet, un manque de formations sur simulateur, spécifique aux technologies WASP, peut être dangereux. Nous avons pu constater par exemple l'accident récent du Cuhautémoc<sup>4</sup> qui permet d'illustrer la nécessité d'une formation complète au préalable (avant formation en mer, ce navire étant un navire école) afin d'éviter les accidents pouvant, comme celui-ci, être graves.

Il est de plus crucial que les marins soient formés sur différents types de navires, car les caractéristiques du navire influencent fortement son comportement. Il faut être conscient des différents paramètres à prendre en compte lors de la navigation à voile tels que la surface de voile, l'orientation de la voile, la traînée générée par le système, ou encore la dérive créée par la voile.

Pour ce faire, les simulateurs sont des outils couramment utilisés pour la formation maritime et évoluent pour s'adapter à de nouvelles exigences. Par exemple, un simulateur d'hélicoptère a été adapté aux vols maritimes, et un simulateur de passerelle a été utilisé pour l'entraînement aux manœuvres économes en énergie. Concernant la navigation à voile, les formations devront évoluer pour prendre en compte ces problématiques. Aujourd'hui, les simulateurs de passerelle pleine mission n'intègrent pas de navires marchands équipés de systèmes de propulsion assistée par le vent. Par conséquent, plusieurs évolutions doivent être réalisées. Ce travail explore les exigences techniques et pédagogiques pour ces simulateurs nouvelle génération.

La pratique de la navigation à voile, soutenue par les développements technologiques actuels, offre une voie réelle et profitable vers un avenir durable pour l'industrie maritime. En adoptant la propulsion vélique combinée à d'autres sources d'énergie renouvelable, il ne fait aucun doute que cela contribuera à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à améliorer l'ingénierie

---

<sup>3</sup> Accord de Paris - 2015

<sup>4</sup> CNN - A Mexican Navy training ship struck the Brooklyn Bridge



## Introduction

des navires et à répondre aux divers défis écologiques et sociaux du XXI<sup>e</sup> siècle. Ces innovations conditionneront de nombreuses exigences pour assurer la durabilité de l'environnement marin.

Dans ce cadre, le projet de recherche SOMOS, porté par l'ENSTA Bretagne et l'ENSM sur 4 années, en partenariat avec l'École Navale, vise à apporter des avancées scientifiques et technologiques dans les outils numériques pour la conception et l'exploitation de navires civils et/ou militaires utilisant une propulsion vélique auxiliaire. Il s'agit plus précisément, d'une part, de développer et de valider une suite logicielle d'outils numériques permettant une évaluation rapide et précise des performances de différentes configurations données par une classe de navire, une technologie de propulsion vélique, ainsi qu'un profil opérationnel et/ou une route maritime, afin d'identifier des configurations optimales. Et d'autre part, d'appliquer ces outils à des situations d'intérêt pour le transport maritime et la défense. Ce projet est financé par l'Agence de l'Innovation de Défense (AID).

Les objectifs qui nous ont été attribué dans le cadre de ce projet sont les suivants :

« - Définition des besoins techniques et pédagogiques pour un simulateur de navigation 3D en identifiant les configurations types de navires / dispositifs de propulsion vélique pertinentes et rédiger le cahier des charges de création de ces modèles de navire ;

-Création d'un ou de plusieurs modèles de navire équipés de dispositifs de propulsion vélique précédemment identifiés, avec une contrainte de compatibilité avec le simulateur Bridge Command. Deux points seront à aborder : création du modèle 3D avec de la CAO et la définition des paramètres physiques »

Dans le cadre de notre Travail d'Etude et de Recherche, nous participons à la réalisation de ce projet. L'ENSM est équipée d'un simulateur open-source modulaire pour étudier ces problématiques. Dans ce rapport, nous présenterons un état de l'art à la fois réglementaire et technique nous permettant dans un second temps, de décrire les besoins techniques et pédagogiques pour les simulateurs passerelles « full mission » afin d'assurer la formation à la navigation assistée par la propulsion vélique. Ensuite, nous vous présenterons différents modèles 3D réalisée en CAO sur le logiciel DelftShip et son implémentation dans le simulateur Bridge Command. Pour terminer, nous vous évoquerons les perspectives du projet.

### I. Etat des lieux

Pour former efficacement les marins à la navigation à voile, les simulateurs passerelles doivent respecter les exigences réglementaires tout en proposant des scénarios réalistes et contrôlés qui répondent aux besoins du marin. Pour cela, nous présentons dans cette section une étude réglementaire et technique des besoins en matière de formation des marins, des équipements utilisés, ainsi que des différentes technologies WASP.

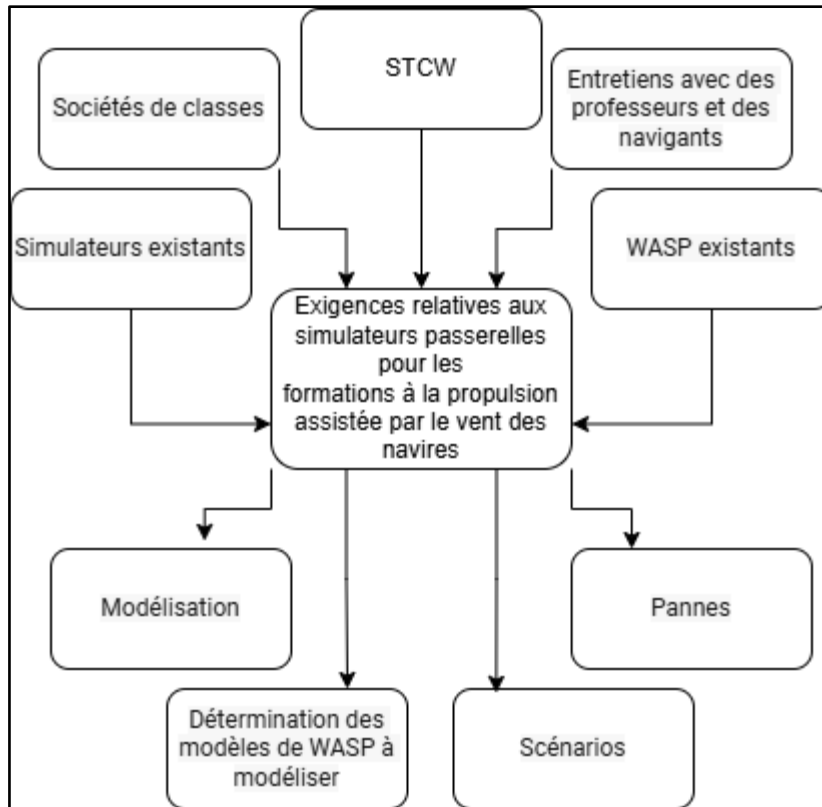


Figure 1 : Méthodologie d'élaboration de l'état des lieux

Cet état de l'art détermine les bases de notre travail, il nous permet de comprendre, d'adapter les besoins au travail demandé et notamment de déterminer les scénarios à implémenter et les modèles de WASP à modéliser.

#### 1. Formation des marins

Tout d'abord, la convention STCW<sup>5</sup> régit la formation maritime à l'échelle internationale. Cette convention ne prévoit pas de contrainte spécifique pour la formation à la navigation à voile. Les officiers de la marine marchande reçoivent donc uniquement une formation théorique sur les effets du vent et de la mer, mais celle-ci n'est pas adaptée aux spécificités des navires équipés de

<sup>5</sup> Standards Training Certification and Watchkeeping

## I. Etat des lieux

systèmes de propulsion assistée par le vent. De plus, aucun module pratique n'est inclus dans les cursus standards, limitant ainsi la capacité des marins à opérer sur ces navires.

Cependant, la STCW impose certaines fonctionnalités aux simulateurs de formation, et des exigences relatives à la formation.

### 1.1. Objectifs généraux

Tout simulateur utilisé pour une formation doit :

- Être adapté aux objectifs pédagogiques définis.
- Reproduire de manière réaliste les capacités de fonctionnement des équipements de bord (y compris leurs limites et erreurs).
- Permettre un niveau de réalisme comportemental suffisant pour que l'élève développe les compétences visées.
- Offrir un environnement contrôlé, incluant des situations normales, d'urgence ou dangereuses.
- Fournir une interface interactive entre l'élève, le simulateur et, si nécessaire, l'instructeur.
- Permettre à l'instructeur de contrôler, surveiller et enregistrer les exercices pour des débriefings efficaces.

### 1.2 Exigences pour l'évaluation des compétences :

Les simulateurs utilisés pour évaluer les compétences doivent :

- Répondre aux objectifs d'évaluation définis.
- Simuler les équipements avec un réalisme physique approprié, en incluant erreurs et limites.
- Permettre au candidat de démontrer ses compétences de manière réaliste.
- Fournir une interface interactive adaptée à l'évaluation.
- Proposer un environnement simulé varié, avec conditions normales, d'urgence ou complexes.
- Autoriser l'évaluateur à contrôler, observer et enregistrer les performances pour une évaluation fiable.

### 1.3 Exigences spécifiques aux simulateurs de navigation

#### 1.3.1. Simulateur radar

Le simulateur radar doit pouvoir :

- De fonctionner en mouvement vrai et relatif stabilisé par rapport à la mer et par rapport au fond.

## I. Etat des lieux

- Simuler les conditions météo, courants, effets parasites (échos fantômes, zones d'ombre...).
- Générer des éléments de navigation : côtes, balises, transpondeurs de détresse.
- Gérer au moins deux navires propres et 20 cibles avec moyens de communication associés.

### 1.3.2. *Simulateur ARPA*

Le simulateur ARPA doit permettre :

- L'acquisition manuelle/automatique des cibles.
- L'affichage des traces passées.
- La gestion des zones d'exclusion.
- L'affichage graphique vectoriel avec échelles de temps.
- La réalisation de manœuvres d'essai.

### 1.4 Objectifs pédagogiques

- Les objectifs pédagogiques doivent être clairement définis dans le programme global de formation.
- Les tâches simulées doivent reproduire les situations réelles de navigation à bord (manœuvres à la voile, quart à la mer, réaction au vent, etc.).

De plus, la procédure de formation avec simulateur comprend que « Les exercices soient surveillés et documentés (audio/vidéo si possible) ».

## 2. Sociétés de classification

Nous nous sommes ensuite tournés vers les sociétés de classification qui certifient la conformité des simulateurs aux exigences de la STCW et garantissent un certain niveau de qualité. Elles jouent donc un rôle clé dans la définition des standards pour l'utilisation et la formation via des simulateurs maritimes. Par exemple, la société de classification DNV<sup>6</sup> a développé une classification des simulateurs en quatre catégories, de A (full mission) à D (limité). Bien que ces standards ne soient pas obligatoires pour la conformité STCW, ils garantissent un niveau de qualité et de performance du simulateur adapté aux besoins de la formation maritime. Les documents de certification de la DNV communiquent des informations détaillées pour chaque exigence, y compris sur les aspects techniques. Ils permettent ainsi d'affiner les exigences imposées par la STCW. Même si la certification DNV est principalement utilisée à des fins marketing, les

---

<sup>6</sup> Det Norske Veritas

## I. Etat des lieux

documents associés sont précieux pour construire des simulateurs compatibles avec la réglementation et optimaux pour les marins.

<i>Simulator class</i>	<i>Description</i>
Class A (NAV)	A full mission simulator capable of simulating a total shipboard bridge operation situation, including the capability for advanced manoeuvring in restricted waterways.
Class B (NAV)	A multi task simulator capable of simulating a total shipboard bridge operation situation, but excluding the capability for advanced manoeuvring in restricted waterways.
Class C (NAV)	A limited task simulator capable of simulating a shipboard bridge operation situation for limited (instrumentation or blind) navigation and collision avoidance.
Class D (NAV)	A cloudbased distant learning simulator capable of simulating a shipboard bridge operation for training through a remote desktop solution by enabling physical and operational realism through virtual reality.

*Figure 2: Classification des simulateurs passerelles par DNV*

DNV détermine également les compétences abordées par la classe de simulateur passerelle (Voir Annexe 3). Et à partir de ces compétences, détermine et précise les exigences détaillées pour chaque classe de simulateurs.

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
1.1.1	Equipment, consoles and workstations shall be installed, mounted, and arranged in a ship-like manner in accordance with design criteria described in DNV rules for classification: Ships and/or DNV rules for classification: HSLC as appropriate to the ship types represented in the simulator. For class D, displays shall be arranged in a usable manner, and controls shall be adapted to the limitations of class D system.	X	X		X
The following equipment shall at least be included in the simulator:					
1.1.2	Controls of propulsion plant operations, including engine telegraph, pitch-control and thrusters. There shall be indicators for shaft(s) revolutions and pitch of propeller(s). There shall be controls for at least one propeller and one bow thruster.	X	X		
1.1.3	Controls of propulsion plant operations.			X	X
1.1.4	Controls of propulsion plant for mooring operations. By any method, it shall be possible to observe the ship's side and the dock during operation of such controls.	X			
1.1.5	Controls of auxiliary machinery. There shall be controls for at least two auxiliary engines, including electric power supply control.	X			
1.1.6	Steering console, including recognized facilities for hand steering and automatic steering with controls for switch over. There shall be indicators of rudder angle and rate of turn.	X	X		
1.1.7	Steering and bearing compass (or repeater) with deviation table (Magnetic) and possibility to adjust for speed and latitude (Gyro).	X	X	X	X
1.1.8	Heading control system (autopilot).	X	X	X	X
1.1.9	At least one radar/ARPA display/unit (automatic radar plotting aid). It shall be possible to simulate both a 10 cm and a 3 cm radar. The radar shall be capable to operate in the stabilised relative motion mode and sea and ground stabilised true motion modes (see STCW Section A-1/12.4. and 5 and paragraph 2 of section B-1/12).	X	X	X	X

*Figure 3 : Exigences requises selon la classe de simulateur*

Dans ces exigences, on retrouve les critères obligatoires imposées par la STCW et des critères répondant à un niveau de performance du simulateur. A l'issue de la création et de

## I. Etat des lieux

l'implémentation du modèle 3D dans le simulateur et la réalisation de son Interface Homme Machine nous pourrions déterminer à quelle classe correspond le simulateur Bridge Command.

### 3. Simulateurs existants

Dans le secteur maritime, différents types de simulateurs ont été développés pour répondre aux besoins spécifiques de formation des professionnels, notamment :

- Simulateurs de navigation de passerelle : ces outils reproduisent fidèlement les conditions d'exploitation d'un navire, permettant aux officiers de s'entraîner à la manœuvre dans un environnement contrôlé. Ils proposent souvent plusieurs types de navires pour comprendre les particularités de chacun. Les conditions extérieures, comme le vent et l'état de la mer, peuvent être modulées pour créer des situations réalistes. Certains simulateurs sont spécialisés, comme "Le Seamulateur", dédié au pilotage maritime pour fiabiliser le trafic portuaire et protéger l'environnement.
- Simulateurs de salle des machines : conçus pour la formation des ingénieurs et mécaniciens, ils recréent l'environnement de la salle des machines pour s'entraîner à la gestion du système de propulsion et aux procédures de maintenance. Un exemple notable est le Wärtsilä Engine Room Simulator (ERS TechSim), qui forme le personnel du département machine à travers une reproduction détaillée des systèmes d'un navire.
- Simulateurs de course océanique : dans la course au large professionnelle, des simulateurs spécialisés sont utilisés pour l'entraînement des skippers. Ces outils reproduisent fidèlement les conditions de navigation en haute mer pour perfectionner les compétences, tester des stratégies, et se familiariser avec l'équipement en toute sécurité. Le logiciel Adrena Pro est un exemple de solution avancée pour la navigation et la stratégie en course au large.

Ainsi, même si des simulateurs existent pour la voile de compétition et pour la formation des équipages de la marine marchande, le développement de simulateurs spécifiques aux navires marchands équipés de WASP n'est pas encore assez mature. Cependant, la volonté de développement d'un simulateur reflète l'intérêt croissant pour la propulsion vélique comme alternative dans le transport maritime. À notre connaissance, aucun simulateur passerelle n'intègre actuellement de systèmes WASP.

### 4. Technologies WASP existantes

La propulsion à voile est l'un des moyens de transport les plus anciens de l'histoire. Elle a constitué la base du développement des systèmes de propulsion modernes. Afin de déterminer la technologie de WASP que nous souhaitons modéliser ensuite, nous avons répertorié de ces dernières :

Les types de voiles historiques les plus connus sont :

- Voiles latines : voiles triangulaires utilisées sur de petits bateaux, offrant une grande surface de propulsion pour les vents de travers.
- Voiles au tiers (fore-and-aft) : voiles asymétriques à quatre angles, combinant manœuvrabilité et propulsion.
- Voiles carrées : utilisées sur les caravelles pour capter efficacement les vents arrière et progresser rapidement.

Toutes ces techniques de propulsion ont été largement documentées et ont donné lieu à des méthodes de navigation très élaborées.

Face aux impacts environnementaux anthropiques actuels (pollution, bruit sous-marin, exploitation humaine), après une longue tradition d'utilisation des moteurs, le monde maritime se tourne à nouveau vers la propulsion par le vent. Actuellement, plusieurs technologies de propulsion vélique sont en usage ou en développement pour réduire l'empreinte carbone du transport maritime :

- Systèmes de kite : utilisent des cerfs-volants pour exploiter les vents d'altitude. Toutefois, cette technologie reste marginale (seulement trois navires équipés à ce jour) en raison de la complexité du déploiement et du contrôle du cerf-volant.
- Voiles souples : similaires aux voiles classiques mais optimisées avec des matériaux modernes et des systèmes automatisés. Elles restent simples à mettre en œuvre et bénéficient d'une longue expérience pratique.
- Voiles rigides : inspirées des ailes d'avions, elles offrent une meilleure efficacité aérodynamique. Aujourd'hui, 16 navires sont équipés de voiles rigides, avec 9 commandes en cours.
- Rotors Flettner : exploitent l'effet Magnus pour générer une force propulsive via des cylindres rotatifs. Avec 38 navires équipés et 25 commandes en cours, cette technologie est actuellement la plus répandue sur le marché de la propulsion marine.

## I. Etat des lieux

À ce jour, 101 navires<sup>7</sup> sont équipés ou en cours d'équipement avec des systèmes de propulsion assistée par le vent. Le nombre de commandes a fortement augmenté ces dernières années, avec 29 installations entre 2018 et 2023, et 72 nouvelles commandes prévues pour 2024 et au-delà.

## 5. Cahier des charges

Après analyse des différentes données collectées présentées précédemment, nous en avons déduit plusieurs exigences. Etant donné qu'il existe de nombreux types de solutions de propulsion vélique, mais que certaines sont plus utilisées que d'autres, nous concentrons nos efforts sur les trois types de propulsion les plus courantes. Il s'agit des voiles souples et rigides et des rotors Flettner. Cela permet d'identifier les différents navires qui devraient être mis en œuvre dans ces simulateurs.

### 5.1 Scénarios essentiels

Après étude des simulateurs existants et plusieurs entretiens avec des marins et professeurs de l'ENSM, nous avons déterminé plusieurs scénarios que notre simulateur doit inclure, notamment :

- Navigation en haute mer : c'est la situation la plus courante pour un navire utilisant la propulsion vélique. Il est essentiel de former les marins aux réglages optimaux des systèmes de propulsion en fonction des conditions météorologiques.
- Entrée ou sortie d'un port : il s'agit d'une phase risquée où les *WASP (Wind Assisted Ship propulsion)* peuvent avoir un impact sur la stabilité du navire ou la visibilité, y compris lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Ces deux scénarios sont très intéressants et permettraient aux marins d'être formés à la plupart des situations qu'ils pourraient rencontrer. Le premier scénario est imposé par la STCW et pourrait aider les marins à comprendre les effets du vent sur leur navire. La navigation dépend de nombreux facteurs. L'état de la mer en est un exemple. Les vagues et les courants agissent sur le navire, limitant la capacité de manœuvre et d'action des marins. Le vent, qui va souvent de pair avec l'état de la mer, est également impératif à prendre en compte pour les marins et essentiel lors de l'utilisation de technologie véliques. De plus, si le vent est contraire, il faut savoir "lofer" le navire (le faire virer de bord) pour pouvoir remonter face au vent, technique indispensable au marin. Et,

---

<sup>7</sup> Review of Wind-Assisted Propulsion Systems in Maritime Transport - Marcin Kolodziejski and Mariusz Sosnowski



## I. Etat des lieux

au-delà d'une certaine force de vent, qui dépend du type de propulsion et de l'état structurel du navire, le marin ne peut plus naviguer avec ses voiles et doit les affaler.

L'entrée et la sortie des ports sont des opérations très particulières pour les voiliers. Les voiliers doivent tenir compte de la hauteur de leurs mâts mais ne peuvent pas naviguer avec la force du vent, car leur manœuvrabilité serait trop faible pour entrer dans le port sans subir d'avarie. Le marin doit donc apprendre à naviguer avec le moteur à bord, sans oublier la hauteur des mâts et le handicap que cela représente. Enfin, les voiles vont modifier la hauteur *KTM* (*Keel To Mast*, quille au mât), l'inertie du navire, sa capacité à prendre le vent, son tirant d'eau et la visibilité depuis la passerelle.

### 5.2 Gestion des défaillances

Comme vu précédemment, la convention STCW exige que les simulateurs incluent des situations de gestion de crise, y compris des scénarios de panne et d'urgence tels que l'incendie. Il est évident que les simulateurs existants ne prennent pas en compte les défaillances techniques concernant les *WASP* car certaines contraintes techniques sont propres aux voiliers. En effet, sur un navire à propulsion mécanique, certaines problématiques n'existent pas. Le marin doit donc s'entraîner à ces nouvelles préoccupations afin de savoir comment réagir si elles se présentent en situation réelle. Il convient donc de développer un ensemble pertinent de défaillances pour chaque technologie vélique afin d'apprendre aux marins comment réagir en cas de défaillance.

Parmi les exemples de défaillance, on peut citer l'endommagement du gréement pour les voiles souples et rigides, la défaillance des systèmes de contrôle automatisés pour les rotors Flettner, les problèmes mécaniques avec les systèmes de déploiement des kites, ou des informations météorologiques erronées.

### 5.3 Modélisation

Pour la modélisation, des navires dans le Bridge command, différents éléments doivent être pris en compte :

#### 1) Interface homme-machine

Un simulateur efficace doit offrir une interface qui permet aux marins de :

- Surveiller et régler des paramètres des systèmes véliques.
- Visualiser l'effet du vent apparent, des forces de portance et de traînée en temps réel.
- Accéder à des données météorologiques simulées pour anticiper l'évolution des conditions.

## I. Etat des lieux

Ces informations sont essentielles pour que le marin ait conscience de la situation afin de piloter le navire en toute sécurité. Les interfaces homme-machine doivent être ergonomiques et présenter ces données sans ambiguïté.

### 2) Simulation du vent

Contrairement aux simulateurs conventionnels, où le vent est principalement un paramètre externe, notre simulateur devra intégrer une modélisation fine des flux aérodynamiques.

La modélisation initiale devrait inclure un vent uniforme pour simplifier l'analyse et se concentrer sur les effets fondamentaux de l'écoulement autour de l'objet étudié. En éliminant les variations de direction ou d'intensité du vent, cette approche permet de mieux comprendre les interactions fondamentales entre le vent et la géométrie, sans la complexité d'autres facteurs. Elle constitue un point de départ solide avant d'ajouter des éléments de complexité, tels que des vents turbulents ou des gradients de pression. Cette méthode facilite également les comparaisons entre différentes configurations et assure une meilleure validation des résultats avant d'introduire des conditions plus réalistes.

### 3) Variables du simulateur Bridge Command

Lors de l'état des lieux du simulateurs, nous nous sommes rendu compte que le simulateur utilisait un certain nombre variable. Nous avons donc déterminé le rôle de ces variables et défini leur valeur en fonction des caractéristiques de nos navires.

<i>engineMaxChangePerSecond</i>	Not used		Constant usefull for Z-Drive vessels. Constant read from file boat.ini. Default is 0.
<i>rollAngle</i>	Roll range	-	Constant read from file boat.ini. Value between 0 and 1.
<i>pitchPeriod</i>	Pitch cycle period	s	
<i>pitchAngle</i>	Pitch range	-	Constant read from file boat.ini. Value between 0 and 1.
<i>buffet</i>	Yaw range	-	Constant read from file boat.ini. Value between 0 and 1.
<i>buffetPeriod</i>	Yaw cycle period	s	
<i>Depth</i>	The vessel's depth under the water line	m	Constant read from file boat.ini
<i>bowThrusterMaxForce</i>	Maximum bow thruster force	N	Constant read from file boat.ini
<i>sternThrusterMaxForce</i>	Maximum stern thruster force	N	Constant read from file boat.ini
<i>bowThrusterDistance</i>	Distance of the bow thruster forward of the centre of rotation of the vesse	m	Constant read from file boat.ini
<i>sternThrusterDistance</i>	Distance of the stern thruster forward of the centre of rotation of the vesse	m	Constant read from file boat.ini
<i>dynamicsLateralDragA</i>	Lateral drag coefficient A (speed <sup>2</sup> )	N.s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Constant read from file boat.ini
<i>dynamicsLateralDragB</i>	Lateral drag coefficient B (speed)	N.s/m	Constant read from file boat.ini
<i>cB</i>	Block Coefficient	-	Constant read from file boat.ini
<i>aziToLengthRatio</i>	Expressed as proportion of vessel length, the distance from the stern of the azimuth drives	-	Constant read from file boat.ini. Value between 0 and 1.
<i>maxSpeed</i>	Maximum vessel speed	Knots	Constant read from file boat.ini
<i>maxSpeed_mps</i>	Maximum vessel speed	MPS	Constant read from file boat.ini
<i>length</i>	Vessel length	m	Read from boat.x file
<i>breadth</i>	Vessel breadth	m	Read from boat.x file
<i>draught</i>	Vessel draught	m	Read from boat.x file
<i>rudderMinAngle</i>	Minimum rudder angle	deg	Hardcoded : - 30
<i>rudderMaxAngle</i>	Maximum rudder angle	deg	Hardcoded : 30

Figure 4 : Tables des variables du simulateurs

## I. Etat des lieux

Cette partie étant largement développée lorsque nous évoquons *La modélisation des variables*, nous ne rentrerons pas dans les détails ici.

### 5.4 Système WASP

Les simulateurs passerelles comprennent un ensemble de navires à utiliser. Ces navires doivent être suffisamment variés pour permettre une formation pertinente et complète selon les différents systèmes WASP. C'est pourquoi, nous avons modélisé deux technologies de WASP (voiles souple et rotor flettner).

L'objectif est de réaliser une simulation réaliste des systèmes WASP. Pour ce faire, il faut tenir compte de plusieurs points. Premièrement, la disposition des moyens de propulsion. De manière à simuler l'inconfort que représente les gréements, sans négliger les aspects physiques qui influent sur la position des moyens de propulsions. Les systèmes véliques doivent être suffisamment espacés pour que la turbulence apparente du vent résultant de la diffraction de l'air du système précédent n'ait pas trop d'impact sur le système suivant. Deuxièmement, la taille du navire doit également être cohérente avec les moyens de propulsion et l'évolution du marché de la navigation. Enfin, le nombre de systèmes devra être cohérent avec la taille du navire, la force de propulsion nécessaire à la navigation et l'évolution du marché maritime. Le navire doit donc pouvoir être propulsé tout en gardant un espace exploitable nécessaire à la rentabilité du navire.

## II. Bridge Command

Dans un premier temps l'objectif est d'appréhender la méthode d'intégration de navires dans Bridge Command sans modification du code source.

### 1. Le fichier .obj

Pour ce faire nous avons choisi un modèle de navire préexistant sur internet.<sup>8</sup> Cette partie vise à comprendre le fonctionnement de Bridge Command, sans pour autant débiter la modélisation à proprement parler. Cette compréhension nous permettra ultérieurement une modélisation cohérente avec les capacités et les modes de fonctionnement du logiciel.

L'intégration d'un navire se divise en 2 parties. La première étant la conception du navire et la deuxième le formatage du fichier pour qu'il soit compatible avec Bridge Command.

Le moteur graphique qu'utilise Bridge Command, « Irrlicht Engine », nous impose d'utiliser des navires sous format .3ds, .X ou .obj. Cela influe sur le choix des logiciels de CAO. La conversion d'un type de fichier à un autre pouvant les corrompre ou les dégrader, le choix été fait de prendre le logiciel pour la CAO qui exporte directement en .obj. Cela nous permet de ne pas avoir à convertir le navire. Ainsi pour faire la CAO nous avons choisi de prendre DelftShip.

Néanmoins le format .obj seul ne permet pas d'afficher la texture pour cela il nous faut rajouter un fichier .mtl.

### 2. Le dossier Boat.ini

Pour intégrer le navire dans Bridge Command il est nécessaire de créer un document nommé *boat.ini*<sup>9</sup>. Ce document régit les caractéristiques du navire, sa compréhension et sa bonne appréhension sont donc nécessaires.

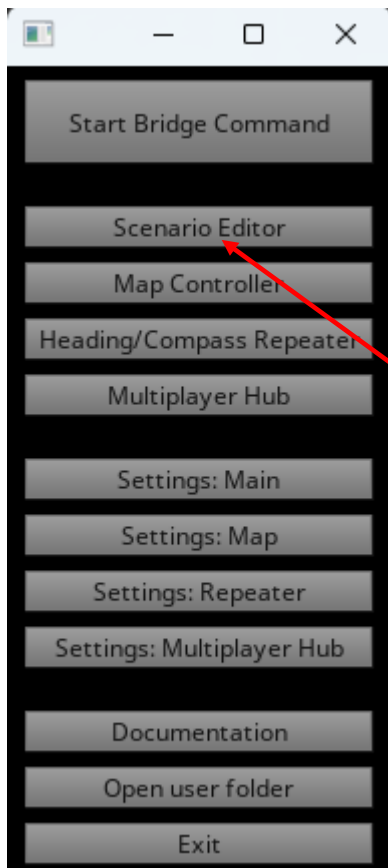
Dans ce document on peut notamment retrouver les coordonnées des vues du navire (qui sont à régler de manière empirique, en essayant des coordonnées et les modifiant si elles ne sont pas cohérentes), le rapport de taille entre la modélisation et le simulateur, la force de propulsion maximale.

---

<sup>8</sup> Model 3D Ship-1589585

<sup>9</sup> Documentation Bridge Command – Ship Models

## II. Bridge Command



De plus, afin d'implémenter notre navire dans bridge command il faut réaliser un nouveau scénario. On peut les modifier les scénarios dans la section « *scénario editor* ».

Figure 5 : Création d'un scénario sur Bridge Command

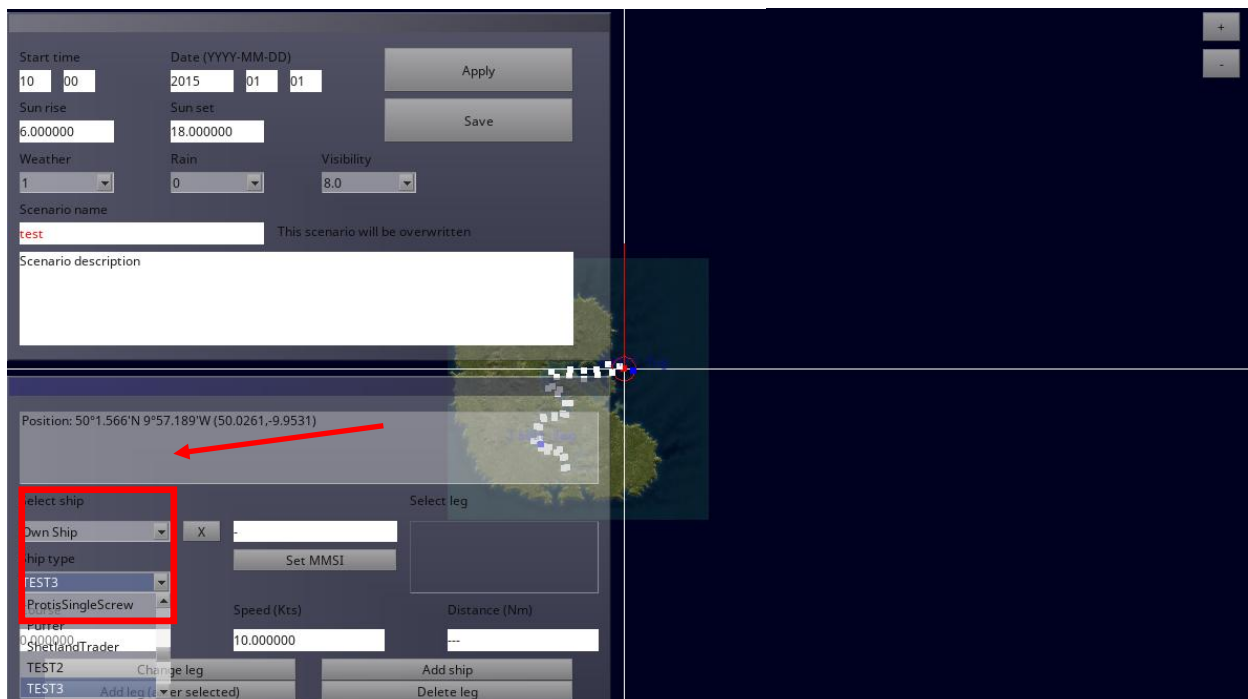


Figure 6 : Modification d'un scénario sur Bridge Command

Ainsi nous pouvons créer un scénario pour rajouter le navire de notre choix.

## II. Bridge Command

### 2.1 Variables thermiques

La simulation des navires en propulsion thermique semble relativement complète, le nombre de variable est cohérent avec la capacité du système. Néanmoins les variables boat.ini ont des unités singulières qui demande un effort de réflexion à l'utilisateur afin de leur donner des valeurs cohérentes.

La valeur de la propulsion maximale, la valeur de l'inertie de rotation, et le nombre d'hélice sont des éléments qui sont connus ou qui peuvent être calculés avec les informations que nous donne DelftShip (coefficient block, moment d'inertie longitudinal, transversal ...).

### 2.2 Variables véliques

Il est possible d'activer le mode Propulsion à voile, en configurant Sailing=1 (Sailing=0 correspondant à la propulsion par moteur). En activant ce mode les variables thermiques sont théoriquement (même si, après une expérience, ces dernières restent partiellement activées) mises de côté en laissant place à des variables véliques. Ces dernières permettent une modélisation significativement simplifiée en l'état actuel. Les voiles (au nombre maximum de deux) sont simulées de forme rectangulaires et ne nous permettant de modifier que la surface des voiles, l'effet de gîte et de dérive créer par le vent. Ainsi la simulation ne nous permet pas une prise en main efficace et complète. Le simulateur ne nous permet pas de voir pleinement comment la simulation est réalisée ainsi seuls les tests empiriques nous permettent de voir le fonctionnement de cette simulation, qui s'est montrée être peu réaliste. La propulsion du vent semble incohérente, le navire atteint à peine 7 nœuds avec 50 nœuds de vent arrière, la rotation des voiles ne semble pas affecter la réaction du navire face au vent, il nous est impossible de remonter le vent.

## 3. Le dossier environnement.ini

### 3.1 Initialisation via le fichier Environment.ini

Le fichier Environment.ini<sup>10</sup> est un fichier de configuration utilisé pour régler les conditions météorologiques au lancement de la simulation. Il contient les paramètres suivants :

- L'environnement météo, utilise l'échelle de Beaufort allant de 0 (calme plat) à 12 (tempête extrême), qui règle la puissance des vagues et du vent.
- La direction du vent, en degrés, afin de ralentir ou accélérer les navires.

---

<sup>10</sup> Documentation Bridge Command - Scenarios

## II. Bridge Command

- Les valeurs de visibilité et de pluie permettant de simuler du brouillard, de la pluie ou des conditions de bonne visibilité.

Ces réglages sont par exemple utilisés pour créer des situations-types pour les exercices scénarisés.

### 3.2 Contrôle dynamique via le Map Controller

Bridge Command permet aussi de modifier les conditions météorologiques en temps réel, sans avoir à redémarrer la simulation grâce au protocole Map Controller (MC) qui est un canal de communication entre le simulateur et l'utilisateur.

Les commandes MC permettent de modifier dynamiquement :

- L'intensité du vent (niveau météo)
- La direction du vent
- La présence ou non de la pluie
- Les conditions de visibilité

Ce système dispose d'une interactivité pour les exercices d'entraînement à la gestion de crise notamment lorsqu'un instructeur souhaite simuler une détérioration soudaine des conditions météorologiques.

### 3.3 Limites actuelles du modèle météo

Les conditions météorologiques dans Bridge Command sont actuellement globales et statiques par défaut.

Pour le moment Bridge Command ne permet d'évoluer que dans des conditions météorologiques « globales » :

- Le vent est uniforme dans tout l'environnement : (pas de gradients de vent ni d'effets locaux).
- Il n'y a pas d'évolution automatique dans le temps permettant de faire évoluer automatiquement une situation : sauf si des modifications sont effectuées manuellement via le Map Controller ou des scripts, les conditions restent inchangées tout au long de la simulation.

Les situations sont donc limitées, et ne permettent pas la simulation de situations plus complexes ou précises (comme des fronts, ou des effets topographiques).

### III. La modélisation 3D

#### 1. Identification des besoins pour la modélisation

La modélisation de navires afin de les simuler sur Bridge Command est une composante importante de notre travail. La définition des objectifs et des attendus a été faite avec nos tuteurs Mr. Merino Lasso et Mr. Richard.

Le but de notre travail est de réaliser des navires pour qu'ils puissent être intégrés dans le simulateur Bridge Command, qu'ils correspondent à un niveau de précision nécessaire pour servir d'outil de travail à la future formation des navigants. La précision de ces navires doit répondre à deux critères principaux :

- Un réalisme au niveau graphisme, que la gêne visuelle des mâts, déflecteurs, rotor flettner... soit représentée, que la dimension des navires soit cohérente, que les proportions des moyens de propulsions soient réalistes ...
- Un réalisme au niveau des caractéristiques techniques du navire, poids, vitesse maximale, tirant d'eau ... Ces critères seront définis dans le boat.ini (voir la section « *Bridge Command – Le dossier Boat.ini* »)

Toutefois le dossier du navire ne devra pas être trop lourd afin d'être lisible par Bridge Command et que le temps de chargement contraint par la capacité des Raspberry pi ne soit pas trop élevé, il faut idéalement que le dossier ne dépasse pas une dizaine de Mo. De plus, le navire doit être conçu dans le bon format (3ds, obj).

Il faut considérer que nos navires n'ont pas pour objectif d'être une représentation parfaite de navires déjà existants ou d'être des navires parfaitement optimisés en termes physiques. Nos modèles ont pour vocation d'être optimisés dans les années à venir, ce TER est la première brique d'un projet plus conséquent. Ainsi, notre but est de modéliser un ou plusieurs navires mais surtout de produire une méthode de modélisation.

#### 2. Création d'un modèle de navire sur Delftship

Au regard des critères précédemment mentionnés dans la partie "*Identification des besoins pour la modélisation*" et après une recherche des différentes applications de CAO nous avons choisi de faire notre modélisation sur **DelftShip**. Ce dernier nous permet de régler la précision du maillage et donc de contrôler la taille du dossier. De plus, il nous permet d'avoir un dossier en .obj



### III. La Modélisation 3D

permettant l'inclusion direct dans Bridge Command, sans devoir convertir le fichier et donc potentiellement perdre en qualité.

Enfin, **DelftShip** nous permet une prise en main plutôt rapide sans réduire nos capacités de création.

La méthode de mise en œuvre suivie comprend ces étapes :

#### 1. Créer le projet et la coque de base

- Dans Delftship, créer un nouveau projet
- Choisir : *Hull type* > *Sailing vessel* (on peut aussi choisir différents types de coque dans la base de données de delftship)
- Définir les dimensions principales : Longueur hors tout, Largeur, Tirant d'eau, localisation maître couple

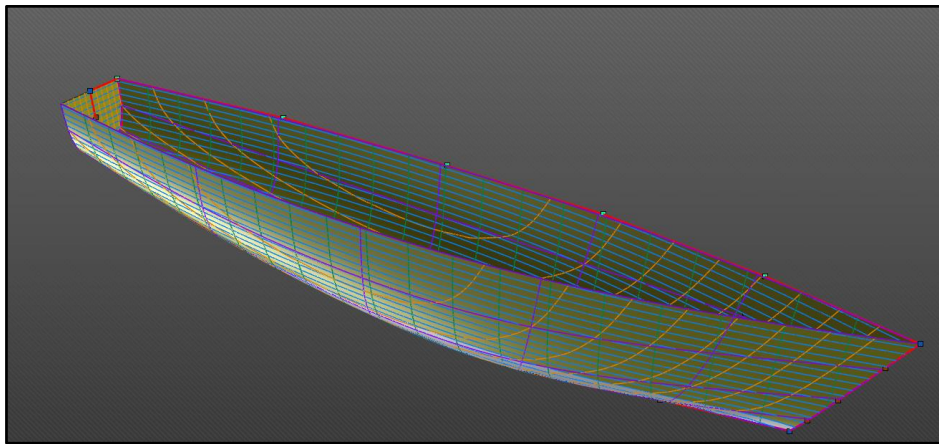


Figure 7 : Coque de navire sur DelftShip

#### 2. Ajouter des images de référence

- Télécharger les 3 différentes vues du navire
- Importer les images : *Editer* > *Ouvrir* (choisir l'image qui convient, téléchargé localement dans l'ordinateur)
- Ajuster la mise à l'échelle et la position pour qu'elles correspondent le mieux aux dimensions du modèle dans l'onglet *voir 3D*

### III. La Modélisation 3D

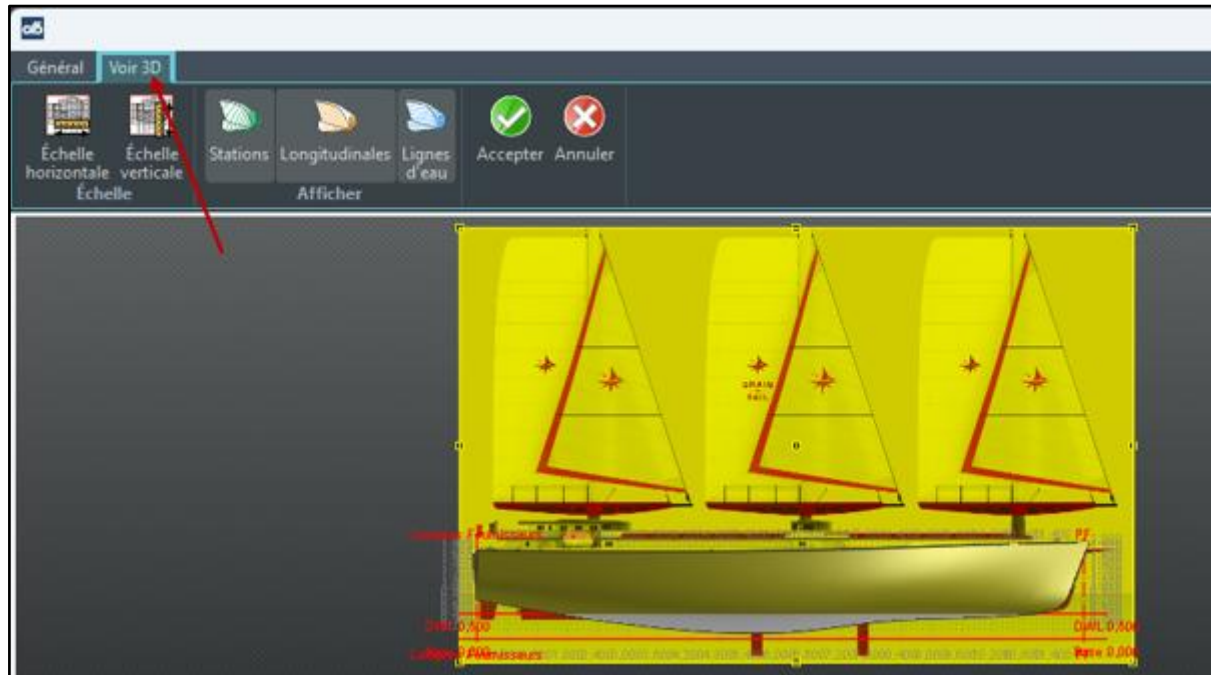


Figure 8 : Image de référence

#### 3. Réaliser la coque

- Appliquer le clavier Alt Q (outil permettant les vues en coupes) pour pouvoir isoler le panneau arrière, le pic avant ...
- Etirer les points de la coque pour les faire correspondre avec ceux des images. Réaliser cette opération sur toutes les vues

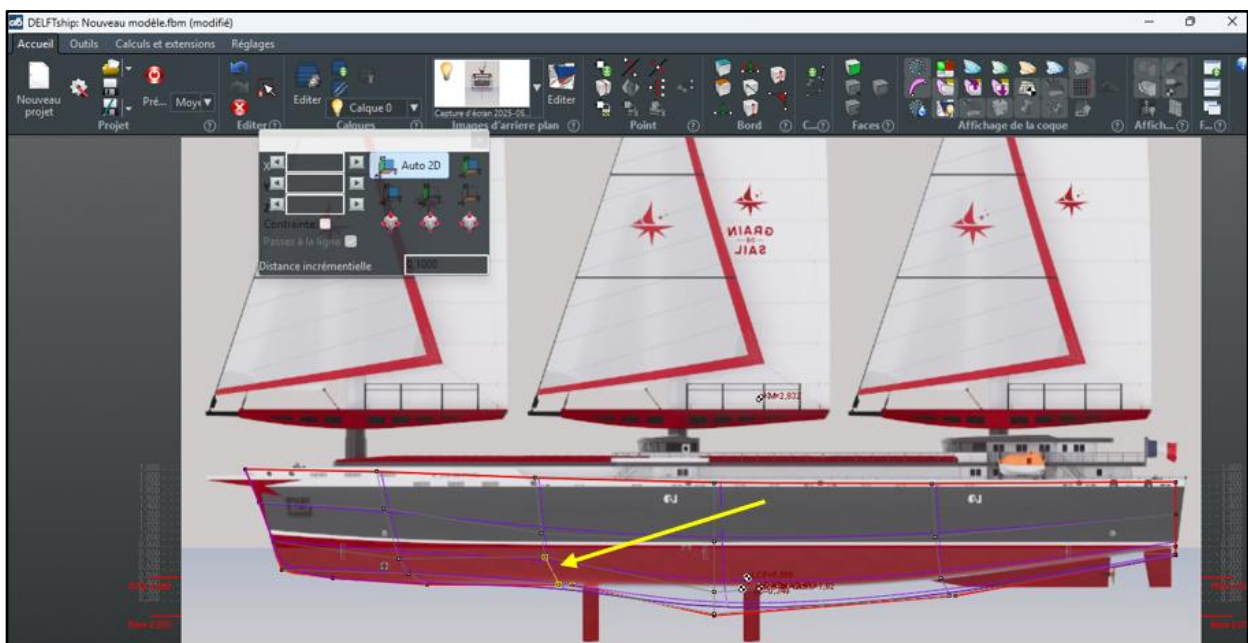


Figure 9 : Réalisation de la coque

### III. La Modélisation 3D

#### 4. Réaliser les appendices et les superstructures en créant des points et en les faisant correspondre sur les images.

- Créer une face pour tous les points créés en définissant bien les points réalisant des angles aigus et droits comme « contraint ». Et en prenant soin de réaliser un calque par volume créé
- Laisser cocher les cases des calques en contact avec l'eau (dans la partie « *éditer les calques* ») et décocher les cases pour les autres calques que la coque et la quille.

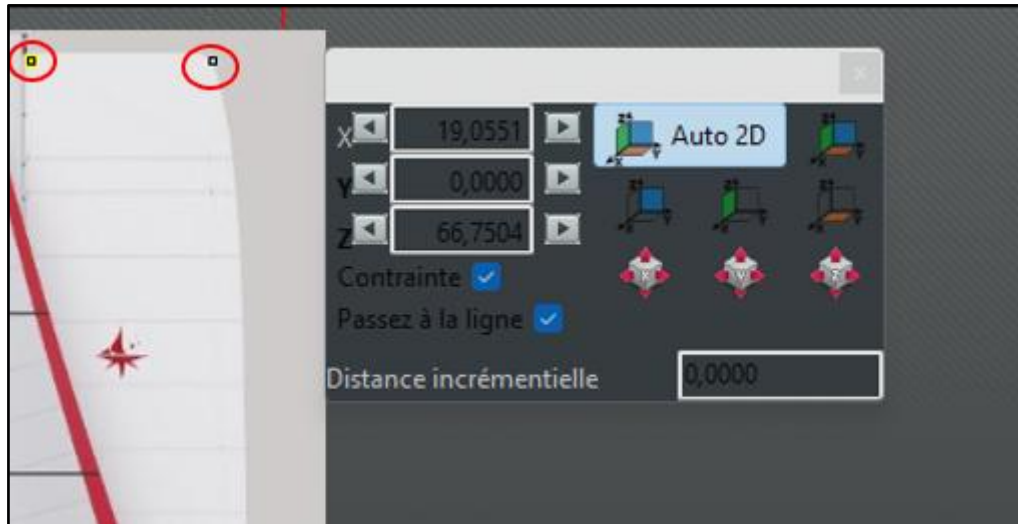


Figure 10 : Réalisation d'appendices et superstructures

#### 5. Appuyer sur « vérification du modèle » jusqu'à ce que DelftShip nous informe que le modèle soit « OK ».

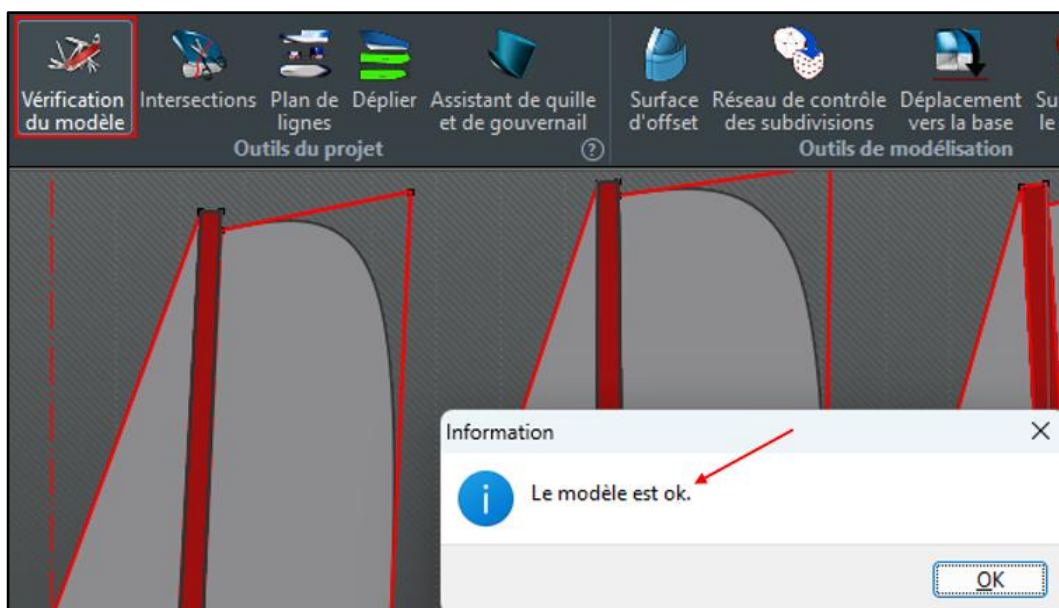


Figure 11 : Vérification du modèle

### III. La Modélisation 3D

Il faut ensuite exporter le fichier en .obj qu'il faudra placer dans un dossier dans le Bridge Command > Model > Ownship.

## 3. Modification des textures sur blender

Afin de respecter les critères en termes de réalisme de la STCW, il y a une nécessité d'ajouter de la texture au modèle 3D avant de les implémenter dans Bridge Command.

Au préalable, il faut disposer d'un modèle 3D du navire (en .obj), et d'un fichier composé des textures d'image (.png ou .jpeg).

L'ajout de texture se décompose en plusieurs étapes :

#### 1. Nettoyer et préparer le modèle

- Sélectionner le navire et passer en mode édition (*Tab*)

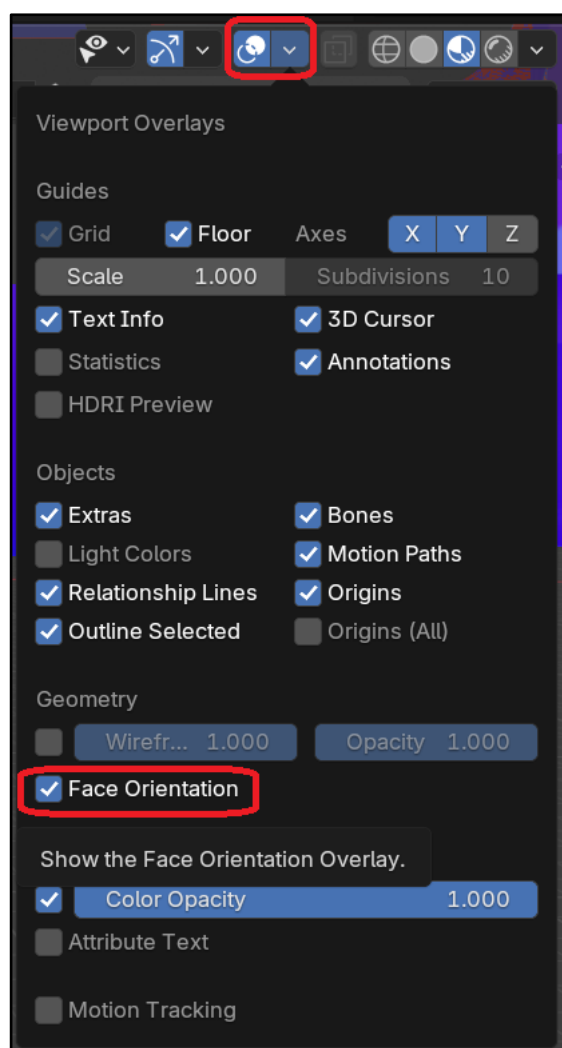


Figure 13: Préparation du modèle

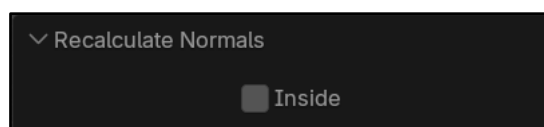


Figure 12: Orientation des faces

- Sélectionner tout (*A*), puis *Mesh > Normals > Recalculate Outside* OU *Shift + N*

Chaque face s'affiche soit vue de l'intérieur ou de l'extérieur, afin d'avoir un affichage homogène sur Bridge Command il est nécessaire d'orienter les faces vers l'extérieur.

Lors de l'application de texture, Blender se base sur l'orientation des normales (les directions vers l'extérieur de chaque face). Si ces normales sont inversées, la texture apparaîtra à l'envers ou invisible.

### III. La Modélisation 3D

#### 2. Déplier le modèle (*UV Unwrap*)

- (En mode édition avec tout le navire sélectionné), *U> Smart UV Project* (accepter les réglages par défaut)

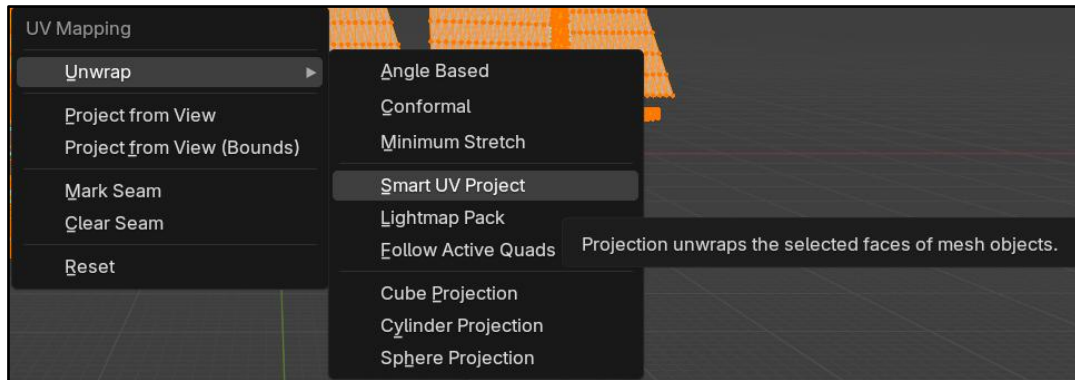


Figure 14 : Déplier le modèle UV

- Passer dans l'espace *UV Editing* et vérifier que toutes les parties sont bien dépliées sur la vue UV

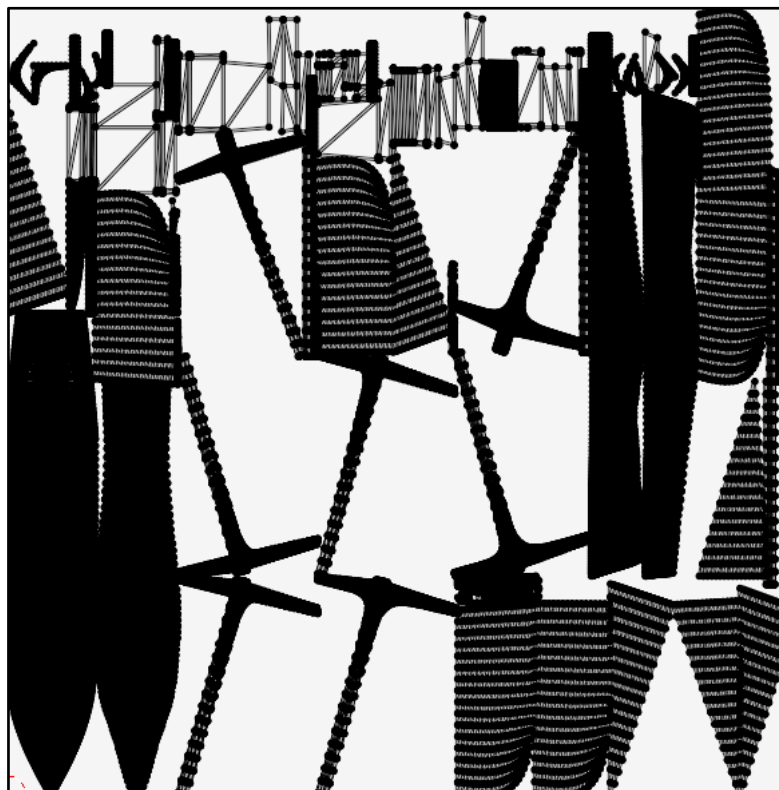


Figure 15 : UV editing vérification

Les textures étant des images 2D, et le navire étant un modèle 3D, cette étape permet d'indiquer à l'application où coller l'image sur le modèle. On « déplie le navire à plat pour poser une image dessus ».

### III. La Modélisation 3D

#### 3. Créer un matériau

- Aller dans l'onglet *Material Properties*
- *New* (pour créer un nouveau matériau) et le nommer

Il est aussi possible d'utiliser la bibliothèque de matériaux BlenderKit.

La détermination de la réaction de la surface à la lumière, la rugosité, la réflexion... sont déterminées par le matériau. Les textures seront connectées à ces matériaux. Cependant, il est inutile de choisir des matériaux trop complexes car seul l'image de base sera prise en compte par la suite.

#### 4. Ajouter et connecter des textures

- Cliquer sur l'onglet *Shading*
- *Shift + A > Texture > Image Texture*
- Charger l'image correspondante
- Connecter l'image au noeud *principled BSDF* :

Texture	Connecter à	Type de données
<i>Albedo (diffuse)</i>	Base color	Color

L'espace de travail *Shading* permet de travailler visuellement les matériaux en établissant des connexions avec nœuds (textures, effets, ...) liés au shader principal (*Principled BSDF*).

Chaque texture possède une fonction différente, ayant pour objectif un rendu réaliste :

-*Albedo* : les couleurs de base (ne doit pas contenir de lumières, reflets ou ombres peintes)

-*Roughness* : détermine si la surface est mate ou brillante (blanc : très mat ; noir : très brillant)

-*Normal Map* : ajoute du relief sans modifier la géométrie (image colorée en violet/bleu).

Attention, il faut indiquer à blender que c'est une image de Normal, pas une image de couleur.

Cependant, Bridge command ne peut gérer que des textures simples, il ne peut pas prendre en compte les matériaux complexes (pas de normal map, roughness, shaders ...), on utilise donc que la texture Albedo.

De plus, nous allons « bake » les informations visuelles dans une seule texture 2D, cette texture 2D ne comprendra que les informations de la texture Albedo. Cette étape permet de réduire le poids de mémoire ce qui est idéal pour les Raspberry Pi.

### III. La Modélisation 3D

#### 5. Créer l'image grâce au « bake »

- Aller dans l'éditeur *UV/Image*
- *Image > New*
- Nommer l'image (ex. Navire\_Baked)
- Taille : 1024×1024 ou 2048×2048 (selon qualité désirée)

La couleur choisie n'est pas importante, cette dernière sera écrasée lors du bake.

Lier cette image aux matériaux :

- Dans l'éditeur de nœuds, ajouter un nœud *Image Texture*
- Charger Navire\_Baked
- ***NE PAS le connecter à quoi que ce soit***
- Sélectionner ce nœud (cette image sera utilisée par Blender comme "image de fond" pour le bake)
- Aller dans *Render Properties*
- Sélectionner *Cycles*, et Device : *GPU Compute*
- Dans la section *Bake* :
  - Type : *Diffuse* (car Bridge Command ne supporte que l'équivalent d'une couleur de base)
  - Influence : *Color* : coché ; *Direct et Indirect* : décochés (sinon Blender va "baker" les ombres et lumières de la scène, ce qu'on ne veut pas)
  - Output : *Image Texture*
- Sélectionner l'objet
- Cliquer sur *Bake*



### III. La Modélisation 3D

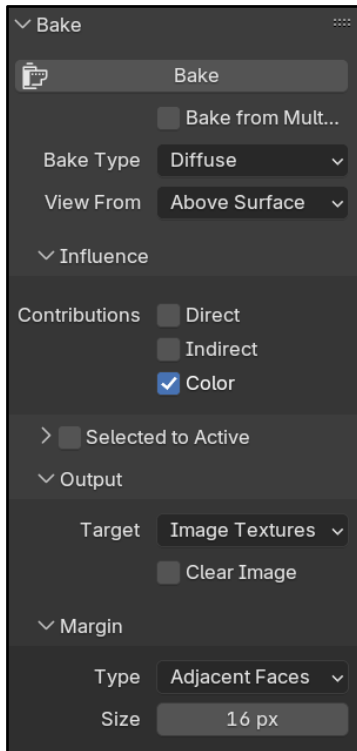


Figure 16 : Bake

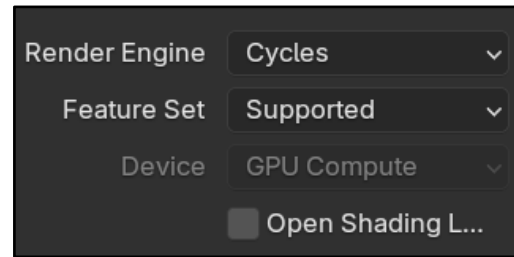


Figure 17 : Création de l'image grâce au Bake

Si plusieurs objets : les fusionner en un seul (Bridge Command ne gère pas les matériaux par sous-objet) ; avec *ctr+J*.

Si plusieurs matériaux : tout doit être fusionné visuellement dans l'image "baked", en effectuant plusieurs fois la méthode ci-dessus et en déplaçant le nœud Image texture d'un Matériau à un autre Matériau.

#### 6. Appliquer la texture de l'image au navire

- Créer un nouveau matériau (dans l'onglet *Material Properties*)
- Cliquer sur l'onglet *Shading*
- *Shift + A > Texture > Image Texture*
- Charger l'image correspondante
- Relier *Base Color* de *Principled BSDF* à *Color* de « *Navire\_Baked* »

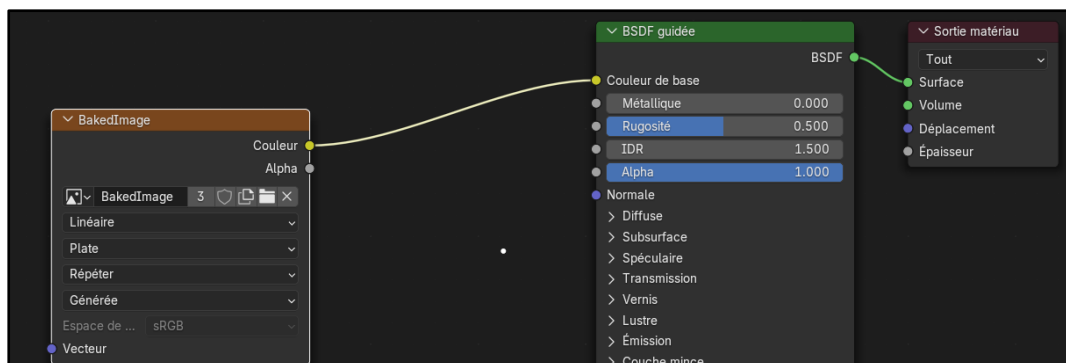


Figure 18 : Application de la texture

#### 7. Vérifier l'UV et ajuster l'échelle :

- Passer en vue *UV Editing* pour voir comment l'image se pose sur le modèle
- Ajuster les îlots UV (morceau de surface) si nécessaire
- Ou ajoute un nœud *Mapping* et *Texture Coordinate* pour régler l'échelle dans les nœuds



### III. La Modélisation 3D

Si le dépliage UV est incorrect, la texture peut apparaître étirée ou mal placée. Il est donc parfois nécessaire de réduire ou déplacer les coordonnées UV ou de modifier l'échelle des textures.

#### 8. Afficher le résultat dans le *viewport*

- Appuyer sur *Z > Material Preview* ou *Rendered View*
- Vérifier l'affichage des textures

Cette étape permet de prévisualiser la texture dans la scène et de corriger les éventuelles erreurs sans avoir à faire un rendu complet.

#### 9. Exporter le modèle texturé

- Aller dans *File > Export > Wavefront (.obj)*
- Vérifier les options suivantes :
  - *Include Normals* (coché)
  - *Include UVs* (coché)
  - *Write Materials (.mtl)* : (coché)
- Dans le même dossier, mettre :
  - Le *.obj*
  - Le *.mtl*
  - L'image *Navire\_Baked.png* ou *.jpg*



Figure 20: Modèle UV

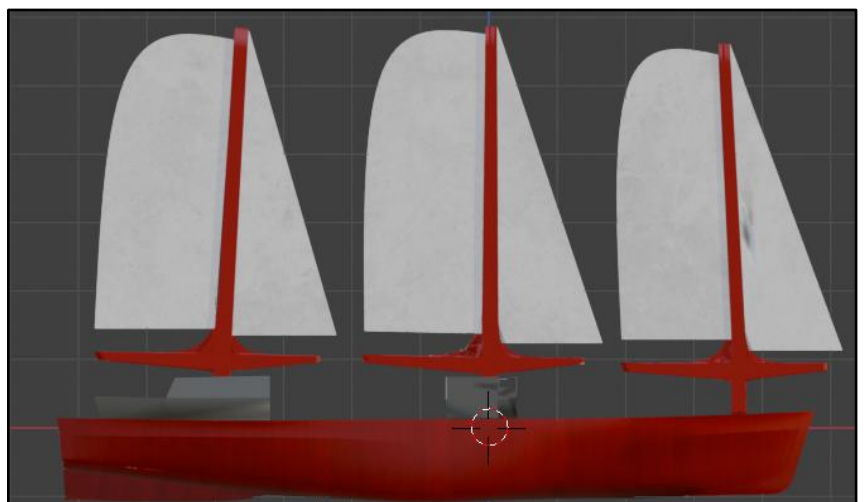


Figure 19: Modèle Baked.png ou .jpg

### III. La Modélisation 3D

#### Ajout de logo/ détails :

Afin d'ajouter des éléments graphiques localisés (tels qu'un logo, des hublots, ou des marquages) sur un modèle déjà texturé via un bake initial, il est essentiel de préserver le déploiement UV principal. Modifier directement cet UV pour positionner de nouveaux détails risquerait en effet de déplacer ou déformer les textures existantes.

#### 1. Préparer le modèle avec son UV principal (UVMap)

Le modèle 3D est initialement déployé sur un UV unique (en général UVMap), utilisé pour le premier bake. Cet UV est optimisé pour couvrir uniformément toute la surface du modèle et ne doit pas être modifié.

#### 2. Créer une seconde UV Map pour les détails

- Créer une seconde UV dans l'onglet *Object Data Properties* > *UV Maps*, nommé par exemple « UV\_Details ».

Ce nouvel UV sera utilisé uniquement pour positionner les éléments à ajouter (logo, fenêtres...).

- Sélectionner les faces concernées uniquement, puis les déplier (*U > Unwrap*) pour positionner les détails sans impacter le reste du maillage.

#### 3. Créer et appliquer un matériau par détail à ajouter

- Créer un nouveau matériau (ou plusieurs, selon les détails).
- Dans l'éditeur de nœuds Shader Editor, ajouter une Texture Image pointant vers l'image du logo ou du détail à ajouter.
- Dans le nœud *Image Texture*, spécifier « UV\_Details » dans le champ *UV Map* (via un nœud "UV Map").
- Appliquer chaque matériau aux faces concernées du modèle (logo sur la coque, fenêtres sur la passerelle, etc.).

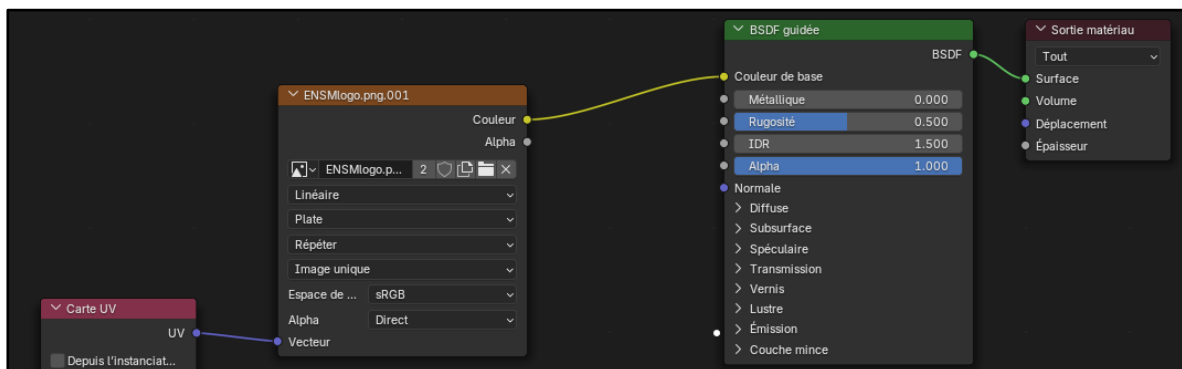


Figure 21 : appliquer un matériau par détail ajouter

### III. La Modélisation 3D



Figure 22: Exemple de logo

#### 4. Préparer le bake final fusionné

- Créer une nouvelle image vierge (ou réutiliser celle du premier bake).
- Dans *UV Editor*, afficher cette image.
- Sélectionner le modèle entier.
- Dans l'onglet *Render Properties* > *Bake*, choisir le type de bake souhaité (Diffuse).

Avant d'effectuer le bake, il est essentiel d'indiquer à Blender dans quel fichier image il doit enregistrer le résultat. Pour cela, on sélectionne dans le nœud *Image Texture* l'image de texture principale, c'est-à-dire celle contenant déjà le bake complet du navire (textures principales). Il faut également s'assurer que l'UV actif est bien l'UV principal ("UVMap"), afin que le rendu final des détails ajoutés (logos, fenêtres...) soit correctement projeté sur la texture existante.

#### 5. Bake le rendu final

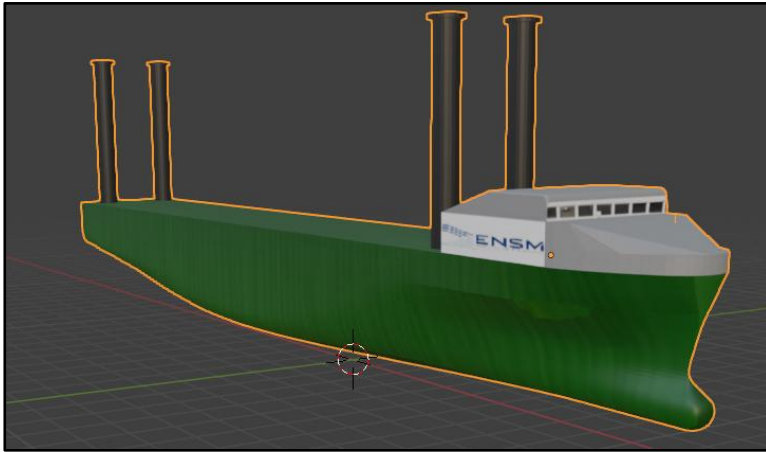
- S'assurer que les détails (logo, fenêtres, ...) sont visibles dans le rendu.
- Lancer le bake : Blender écrasera tout (y compris les détails positionnés sur l'UV secondaire) selon l'UV principal, et l'inscrira dans l'image de texture globale.

Le rendu est donc unifié, sans avoir modifié l'UV principal.

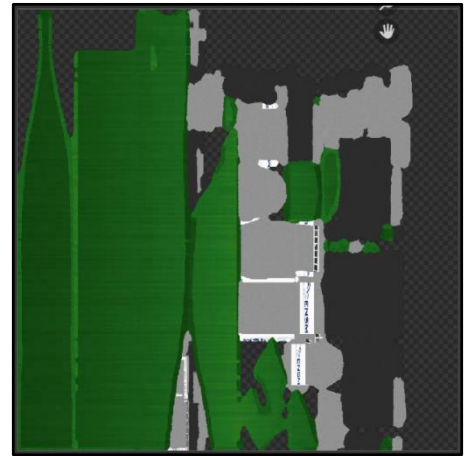
#### 6. Affectation finale et export

- Remplacer le *shader* de l'objet par un nœud *Image Texture* pointant vers l'image bake avec tous les éléments.
- Supprimer ou désactiver les nœuds de composition temporaire.

### III. La Modélisation 3D



*Figure 24 : Affection finale et export*



*Figure 23 : Image bake du E-ship  
1*

L'objet est désormais prêt pour exportation avec une texture propre, et complète.

Cependant, l'image de bake ayant une résolution fixe, l'ajout de détails sur des zones localisées et de faible surface (par rapport à l'ensemble du navire) peut entraîner une pixellisation ou une perte de précision. En effet, ces éléments occupent une portion très réduite de l'espace UV global, ce qui limite la quantité de pixels qui leur est allouée dans la texture finale.

# IV. La modélisation des variables

## 1. Variables thermiques et véliques

### 1.1 Variables du boat.ini pour la propulsion thermique

Afin de réaliser le fichier boat.ini, nous avons calculé ou trouvé, grâce à la CAO par exemple, des valeurs pour chaque variable du fichier.

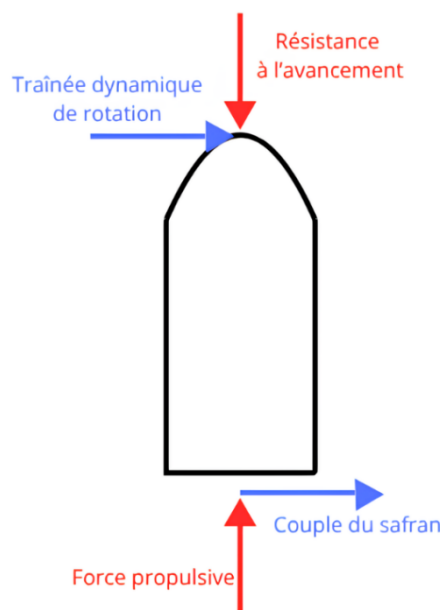
Certaines données doivent être renseignées pour nous permettre de réaliser les calculs. Nous pourrions citer la masse, le tirant d'eau, le nombre de révolution maximum du moteur, la distance entre les hélices (s'il y a deux hélices) et la surface alaire...

D'autres données dépendent de la conception lors de la CAO et lors de l'ajout de la texture sur blender. On pourra citer la position des vues, c'est-à-dire les coordonnées du navire, et l'orientation du navire selon les 3 axes. Cela permet d'aligner le navire avec la vue, et de positionner la hauteur de ce navire par rapport au niveau de la mer. Ces valeurs ne seront pas calculées mais trouvées de façon empirique.

Pour le cas du Grain de Sail 3 que nous simulons dans un premier temps nous avons :

Une masse de 8 800 tonnes soit 6 000 tonnes de déplacement lège et 2 800 tonnes de chargement.

Les forces appliquées sur le navire peuvent se représenter de la façon suivante :



*Figure 25 : Schéma des forces appliquées sur le navire*

#### IV. La modélisation des variables

##### – *Calcul de la force propulsive*

Le calcul de la force propulsive peut se calculer en réalisant le calcul suivant :

$$F_{prop} = \frac{P_{moteur}}{V} \eta$$

$\eta$  : le rendement de puissance transmise du moteur à l'eau que l'on estime à 50%.

$V$  : pour la vitesse du navire nous prenons une valeur de 13 nœuds soit 6,7 m/s.

$F_{prop}$  : nous prenons une puissance de moteur de 3 MW (après s'être renseigné auprès de personnes compétentes)

Ainsi, nous obtenons une force de propulsion de 220 000 N.

##### – *Calcul de la résistance à l'avancement*

Après avoir calculer la force propulsive nous pouvons calculer la résistance à l'avancement. Pour une certaine vitesse la force de propulsive et la résistance à l'avancement s'égalisent :

$$F_{prop} = drag$$

Tel que  $drag = DynamicsSpeedA * Speed^2 + DynamicsSpeedB * Speed$

Pour la suite des calculs nous appellerons *DynamicsSpeedA* et *DynamicsSpeedB* respectivement DSA et DSB.

Néanmoins nous avons une équation pour deux inconnues pour régler ce problème nous fixons un rapport de proportionnalité entre les deux variables DSA et DSB. Nous exprimons DSA en fonction de DSB en analysant les boat.ini des autres navires tel que :

$$DSA = 0,4 * DSB$$

$$DSB = \frac{F_{prop}}{Speed^2 * 0,4 + Speed}$$

Nous obtenons  $DSB \approx 8900 \text{ N.s/m}$

Et  $DSA \approx 3600 \text{ N.s}^2/\text{m}^2$

Après avoir entré ces valeurs dans Bridge Command nous remarquons que le navire en avant toute (moteur en charge maximale) arrête d'accélérer à 6,5 nœuds. En remplaçant les vitesses en m/s par

#### IV. La modélisation des variables

des vitesses en nœuds (13 au lieu de 6,7),  $DSB \approx 2\,700\text{ N/knot}$  et  $DSA \approx 1\,100\text{ N/knot}^2$  le navire n'accélère plus au-delà de 13 nœuds.

##### – Calcul du moment d'inertie

En considérant le navire comme un parallélépipède on peut estimer que son moment d'inertie autour de son axe z est de :

$$I_z = \int_0^V \rho(x, y, z) \cdot (x^2 + y^2) dV$$

De plus, on considère sa masse volumique constante en tout point, on peut écrire :

$$I_z = \rho \int_0^V (x^2 + y^2) dV$$
$$I_z = \frac{M}{V} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-H/2}^{H/2} (x^2 + y^2) dz dy dx$$

L étant la longueur du navire (110m), B son maître-bau (17m) et H sa hauteur.

$$I_z = \frac{M}{V} \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-H/2}^{H/2} \left[ \int_{-L/2}^{L/2} (x^2 + y^2) dx \right] dz dy$$
$$I_z = \frac{M}{V} \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-H/2}^{H/2} \left( \frac{L^3}{12} + Ly^2 \right) dz dy$$
$$I_z = \frac{M}{V} \left( \frac{L^3}{12} B + L \frac{B^3}{12} \right) H$$

Or on a  $V = L \cdot B \cdot H$ , donc:

$$I_z = \frac{M}{12} (L^2 + B^2)$$

On obtient ainsi un moment d'inertie de 9 000 000 000 kg.m<sup>2</sup>.

##### – Calcul du couple du safran

Pour la rotation on peut voir dans la documentation que le navire n'est soumis qu'à 2 moments de rotations : les traînées dynamiques de rotation (*drag*) et le couple du safran (*rudder torque*). De fait, on peut en déduire que pour une certaine vitesse de rotation on a  $drag = rudder\ torque$ . De plus, la documentation de Bridge Command nous permet de définir que :

$$Rudder\ torque = rudder\ A * speed * rudder\ angle + rudder\ B * engine\ thrust * rudder\ angle$$

#### IV. La modélisation des variables

Rudder A et rudder B étant les variables que nous pouvons modifier dans Bridge Command

$$Drag = DynamicsTurnDragA * Rate\ Of\ Turn^2 + DynamicsTurnDragB * Rate\ Of\ Turn$$

DynamicsTurnDragA et DynamicsTurnDragB étant les variables que nous pouvons modifier dans Bridge Command. Elles représentent un coefficient des traînées de dynamique de rotation

Pour commencer nous calculons le couple du safran (*Rudder torque*).

Nous utilisons le principe fondamental de la dynamique de rotation :

$$I_{\Delta} * \frac{d\omega}{dt} = M_{\Delta}$$

Ainsi en choisissant la vitesse de rotation maximale du navire nous pourrions ainsi calculer le couple nécessaire à sa rotation sur son axe vertical (mouvement de lacet). On choisira pour la suite une vitesse de rotation *Rate Of Turn* de 40°/min ce qui représente 0,012 rad/s.

On peut ainsi calculer son accélération :  $\frac{d\omega}{dt}$

On considère que le navire atteint cette vitesse de rotation en 20 secondes ainsi  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{0,012}{20} \approx 6,0.10^{-4} \text{ rad.s}^{-2}$

Ainsi le couple du safran vaut  $rudder\ torque = I_z * \frac{d\omega}{dt} = 9,0.10^9 * 6,0.10^{-4} = 5,4.10^6 \text{ N.m}$

Connaissant le couple du safran nous pouvons calculer les variables rudder A et rudder B de Bridge Command tel que  $Rudder\ torque = rudder\ A * Speed * rudder\ angle + rudder\ B * engine\ thrust * rudder\ angle$

Dans un raisonnement analogue à DSA et DSB, nous fixons un rapport de proportionnalité entre les deux variables rudder A et rudder B tel que :

$$Rudder\ torque = 0.8\ rudder\ A + 0.2\ rudder\ B.$$

Ce rapport de proportionnalité a été choisi après avoir comparé les boat.ini des navires déjà implémentés. Ainsi :

$$rudder\ A = \frac{rudder\ torque * 0,8}{speed * rudder\ angle}$$

Nous prenons une vitesse de 13 nœuds soit 6,7 m/s et un angle de safran de 10°, la spécification de Bridge Command impose que l'angle du safran soit exprimé en ° et non en radian dans la formule.



#### IV. La modélisation des variables

De cette manière nous obtenons rudder A  $\approx 8,1 \cdot 10^4$  N.s/° et :

$$\text{rudder } B = \frac{\text{rudder torque} * 0,2}{\text{engine thrust} * \text{rudder angle}}$$

On trouve la valeur : rudder B  $\approx 7 \cdot 10^{-2}$  m/°.

##### – *Calcul de la traînée dynamique de rotation*

Après avoir calculé le couple nécessaire pour le faire tourner nous devons calculer la traînée que le navire subira lors de son mouvement en rotation.

Nous savons que le navire aura une accélération nulle pour une certaine vitesse de rotation or si l'accélération est nulle nous pouvons dire que :

$$\text{Rudder torque} = \text{drag}$$

Or d'après Bridge Command:

$$\text{drag} = \text{DynamicsTurnDragA} * \text{Rate Of Turn}^2 + \text{DynamicsTurnDragB} * \text{Rate Of Turn}$$

Nous noterons pour la suite *ROT* pour *Rate Of Turn* et *DTDA* et *DTDB* pour respectivement *DynamicsTurnDragA* et *DynamicsTurnDragB*.

$$\text{Rudder torque} = \text{DTDA} * \text{ROT}^2 + \text{DTDB} * \text{ROT}$$

*DTDA* et *DTDB* étant tous deux des inconnues. Nous avons deux inconnues pour une équation, nous devons donc rajouter une équation pour trouver les valeurs de *DTDA* et *DTDB*. Dans les autres boat.ini on trouve *DTDA* = 15 \* *DTDB* ainsi on a :

$$\text{DTDB} = \frac{\text{Rudder Torque}}{15 * \text{ROT}^2 + \text{ROT}}$$

Nous obtenons ainsi *DTDB*  $\approx 4,0 \cdot 10^8$  N.m.s

Nous pouvons ainsi calculer *DTDA* :

$$\text{DTDA} = \frac{\text{Rudder Torque}}{\text{ROT}^2 + \frac{\text{ROT}}{15}}$$

$$\text{DTDA} \approx 5,9 \cdot 10^9 \text{ N.m.s}^2$$

Après une vérification empirique sur Bridge Command, on peut remarquer que les valeurs calculées sont cohérentes avec un comportement d'un cargo de 110m de long.

## IV. La modélisation des variables

### 1.2. Variables pour la propulsion vélique

#### 1.2.1. Intégration de la propulsion par la voile

##### – *Présentation du simulateur Bridge Command et limites actuelles*

Le simulateur Bridge Command est un environnement immersif de simulation de navigation maritime. Gratuit, open source, et multiplateforme, il permet de configurer différents types de navires et de naviguer en conditions météo variables. Cependant, ses possibilités sont limitées pour les navires à propulsion hybride voile et moteur.

Actuellement, un seul mode de propulsion est autorisé à la fois : moteur (*Sailing*=0) ou voile (*Sailing*=1). Cette limitation empêche la modélisation de navires modernes qui combinent moteur et assistance vélique, comme ceux équipés de voiles rigides, de kite ou de rotors Flettner.

Par ailleurs, la modélisation aérodynamique est très simplifiée : elle utilise des coefficients empiriques et des forces fixes, sans calcul physique du vent apparent, de la portance ni de la traînée.

##### – *Intégration d'un mode hybride de propulsion (*Sailing* = 2)*

Le fichier boat.ini contient les paramètres du navire. Actuellement, le champ *Sailing* prend les valeurs 0 (moteur) ou 1 (voile). Nous ajoutons une nouvelle valeur :

*Sailing* = 2 : active à la fois la propulsion thermique et vélique.

Dans ce mode, le simulateur lit simultanément les paramètres des deux modes précédents.

Paramètres moteurs (déjà existants) :

- Max\_propulsion\_force : poussée maximale de l'hélice en newtons.
- MaxRevs, PropWalk, AsternEfficiency, etc. : caractéristiques de la propulsion.

Paramètres véliques (déjà existants) :

- NumberOfSails, MainSailArea, JibSailArea : nombre et surfaces des voiles.
- minMainAngle, maxMainAngle, etc. : débattement des voiles.
- heelEffect, leewayEffect : effets empiriques (à remplacer par une modélisation physique).

Les formules des parties suivantes pourraient être intégrées dans ce mode *Sailing*=2.

##### – *Modélisation du vent apparent et des forces aérodynamiques*

##### *Calcul du vent apparent*

#### IV. La modélisation des variables

Le vent apparent est le vent ressenti par le navire en mouvement. Il résulte de la combinaison vectorielle du vent réel et du vent induit par l'avancement du navire.

Si :

- VWT est la vitesse du vent réel (en m/s),
- $\theta_{WT}$  est l'angle du vent réel (par rapport à l'axe du navire) en radians,
- VB est la vitesse du navire,
- $\theta_B$  est le cap du navire,

Alors :

- La vitesse du vent apparent  $V_{app}$  est donnée par :

$$V_{app} = \sqrt{VWT^2 + VB^2 - 2VWT \cdot VB \cdot \cos(\theta_{WT})}$$

L'angle du vent apparent  $\beta_{app}$  (par rapport à l'axe longitudinal du navire) est donné par :

$$\beta_{app} = \arccos\left(\frac{VWT \cos(\theta_{WT}) - VB}{V_{app}}\right)$$

Ce vent apparent permet de calculer les forces aérodynamiques réellement ressenties par la voile.

##### ***Portance et traînée***

La portance L est la force qui génère la poussée grâce au vent apparent, et la traînée D est la force qui freine le navire.

Elles dépendent de l'angle d'attaque  $\alpha$ , défini comme la différence entre l'orientation de la voile  $\delta$  et la direction du vent apparent  $\beta_{app}$ .

On utilise les formules classiques<sup>11</sup> :

- Portance :

$$L = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_L(\alpha) V_{app}^2$$

- Traînée :

---

<sup>11</sup> Larsson, Lars, et Rolf E. Eliasson. 1994. *Principles of Yacht Design*.

#### IV. La modélisation des variables

$$D = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_D(\alpha) V_{app}^2$$

$\rho_{air} \approx 1,225 \text{ kg/m}^3$  (masse volumique de l'air),

- S : surface vélique,
- $C_L(\alpha)$  : coefficient de portance,
- $C_D(\alpha)$  : coefficient de traînée.

Les coefficients dépendent de la forme de la voile, de la densité (souple ou rigide) et de l'angle d'attaque. Ils peuvent être définis par une table ou de manière empirique.

##### *Approximations simplifiées des coefficients*

Selon la théorie de l'aile mince, adaptée aux voiles souples, les coefficients peuvent être exprimés comme suit <sup>12</sup>:

$$C_L(\alpha) \approx 2\pi \cdot \frac{ARe(ARe + 1)}{(ARe + 2)^2} \cdot \sin(\alpha)$$

$$C_D(\alpha) \approx C_{D0} + \frac{1.1}{\pi ARe} \cdot C_L^2$$

Où :

- $\alpha$  : angle d'incidence (radians)
- ARe : allongement effectif de la voile
- $C_{D0}$  : traînée parasite (typiquement entre 0,01 et 0,03)

##### *Allongement effectif de la voile*

L'allongement effectif ARe est défini par :

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

Où :

- b : hauteur de la voile (m)
- S : surface projetée de la voile (m<sup>2</sup>)

---

<sup>12</sup> Moran Charlou. Méthodes et outils d'aide à la conception pour l'assistance à la propulsion vélique des navires.

#### IV. La modélisation des variables

Cependant, les effets de bout, la courbure du plan de voilure, et l'interaction avec le pont réduisent l'efficacité réelle de la voile. On parle donc d'allongement effectif  $ARe$ . Pour des voiles souples verticales de grande taille (ex. grand-voile sur cargo), une valeur typique est :  $ARe \approx 3$  à 4.

##### – *Décomposition des efforts dans le plan du navire*

##### *Décomposition des forces dans le plan du navire*

Les forces aérodynamiques sont ensuite projetées dans l'axe du navire :

- La composante propulsive (dans l'axe longitudinal) :

$$F_{prop} = L \cdot \cos(\beta_{app} - \gamma)$$

- La composante latérale (perpendiculaire à la coque, responsable de la dérive et de la gîte) :

$$F_{lat} = L \cdot \sin(\beta_{app} - \gamma)$$

Où,  $\gamma$  est l'angle de traînée induite (environ  $10^\circ$ ) ; c'est l'angle d'orientation des voiles par rapport à l'axe du navire.

##### *Poussée totale combinée*

La force de propulsion totale appliquée dans l'axe du navire est :

$$F_{totale} = F_{moteur} + F_{propvoile}$$

Cette force est ensuite utilisée dans les équations du mouvement pour calculer la vitesse, l'accélération et le comportement dynamique du navire.

##### – *Effets dynamiques : roulis, tangage et gîte*

##### *Gîte du navire sous l'effet de la propulsion vélique*

La gîte désigne l'inclinaison transversale d'un navire, résultant de l'action combinée de la force latérale exercée par le vent sur la voilure et de la réponse hydrostatique du navire. En régime stationnaire, l'angle de gîte  $\phi$  est déterminé par un équilibre entre le moment de gîte aérodynamique et le moment stabilisateur hydrostatique.

La voilure soumise à un vent apparent génère une force aérodynamique, dont la composante perpendiculaire au plan longitudinal du navire (force latérale  $F_{lat}$ ) induit un moment de renversement autour de l'axe longitudinal (roulis).

Ce moment est donné par :

$$M_{renversement} = F_{lat} \cdot hCE$$

Où :

#### IV. La modélisation des variables

- $F_{lat}$  est la force latérale générée par la voile,
- $h_{CE}$  est la hauteur du centre de voilure par rapport au centre de carène.

Ce moment tend à incliner le navire sous l'effet du vent.

La stabilité transversale du navire s'oppose à cette inclinaison. La carène, en modifiant sa forme immergée lors de la gîte, génère un moment de redressement exprimé par :

$$M_{redressement} = \Delta \cdot GZ(\phi)$$

Où :

- $\Delta$  est le déplacement du navire (poids en newtons),
- $GZ(\phi)$  est le bras de levier hydrostatique, dépendant de l'angle de gîte.

Pour des angles modérés ( $\phi \lesssim 20^\circ$ ), ce bras peut être approché par :

$$GZ(\phi) \approx GM \cdot \sin(\phi)$$

Avec  $GM$  la hauteur métacentrique transversale.

À l'équilibre, donc pour un certain angle de gîte, le moment de gîte est compensé par le moment hydrostatique stabilisateur. On obtient :

$$F_{lat} \cdot h_{CE} = \Delta \cdot GM \cdot \sin(\phi)$$

D'où l'angle de gîte statique :

$$\phi = \arcsin\left(\frac{F_{lat} \cdot h_{CE}}{\Delta \cdot GM}\right)$$

Cette approche permet de calculer directement l'inclinaison du navire à partir des caractéristiques hydrostatiques et des efforts aérodynamiques.

#### ***Assiette du navire sous l'effet de la propulsion vélique***

Le tangage correspond à la rotation du navire autour de son axe transversal (axe Y), induisant un mouvement de bascule avant-arrière. Ce phénomène est principalement influencé par la répartition verticale des forces appliquées, notamment celles provenant de la propulsion vélique et mécanique.

Les forces de propulsion génèrent des moments de tangage si leur ligne d'action n'est pas centrée verticalement par rapport au centre de carène. On distingue principalement deux contributions :

#### IV. La modélisation des variables

- Moment de tangage dû à la voile :

$$M_{tangage, voile} = F_{prop} \cdot z_{voile}$$

Où :

- $F_{prop}$  est la force propulsive résultante de la voile dans la direction longitudinale,
- $z_{voile}$  est la hauteur verticale du point d'application de la force de la voile par rapport au centre de carène (positive vers le haut).
- Moment de tangage dû à l'hélice ou moteur :

$$M_{tangage, helice} = F_{moteur} \cdot z_{helice}$$

Où :

- $F_{moteur}$  est la force propulsive générée par l'hélice,
- $z_{helice}$  est la hauteur d'application de cette force par rapport au centre de carène.

Le moment total de tangage appliqué au navire est la somme de ces contributions :

$$M_{tangage} = M_{tangage,voile} + M_{tangage,helice} = F_{prop} \cdot z_{voile} + F_{moteur} \cdot z_{helice}$$

Ce moment tend à incliner le navire vers l'avant (assiette) ou vers l'arrière, selon le signe de  $z$  et les forces appliquées.

À l'instar du roulis, le navire oppose un moment hydrostatique stabilisateur qui tend à ramener l'assiette vers une position d'équilibre. Ce moment dépend du déplacement, du bras de levier longitudinal  $GM_{long}$  et de l'angle d'assiette  $\theta$  :

$$M_{rest, tangage} = \Delta \cdot GM_{long} \cdot \sin(\theta)$$

En régime stationnaire, l'angle d'assiette  $\theta$  est tel que :

$$M_{tangage} = M_{rest, tangage}$$

$$F_{prop} \cdot z_{voile} + F_{moteur} \cdot z_{helice} = \Delta \cdot GM_{long} \cdot \sin(\theta)$$

D'où :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{F_{prop} \cdot z_{voile} + F_{moteur} \cdot z_{helice}}{\Delta \cdot GM_{long}}\right)$$

## IV. La modélisation des variables

### 1.2.2 Détermination des forces d'un navire équipé de rotor flettner

Afin de déterminer les différentes forces aérodynamiques à implémenter dans le simulateur Bridge Command pour le navire *E-ship1*, nous avons établi un tableur reprenant les dimensions du navire et des rotors flettner.

A partir de ce tableur (annexe 4), l'objectif est d'établir des premières données de forces et de résistance liés au navire E-ship 1 et à ses rotors pour à terme optimiser ses performances.

Tout d'abord, voici informations sur le navire dont nous disposons :

Rotor data			
D <sub>RS</sub> (diamètre du rotor flettner)	6	m	
De (diamètre end plate)	8	m	
H <sub>RS</sub> (hauteur du rotor flettner)	27	m	
Max RPM	350	rpm	
Masse volumique air	1,29	kg/m <sup>3</sup>	
U <sub>RS</sub> (vitesse de rotation en bout de rotor)	109,96	m/s	
CD (coefficient de traînée)	2,61128	/	

Figure 26 : Rotor data

Ship data			
LOA	Length over all	130	m
LPP	length Between perpendicular	123,5	m
B	beam	22,5	m
T	Design Draft	7,5	m
D	Depth	11,1	m
DWT	Dead weight	10 500	dwt
MCR		6300 kW	kW
Vship	Vitesse du navire	8,75	m/s

Figure 27 : Ship data

Pour cette modélisation, nous simulons une vitesse apparente du vent (AWS) de 15km/h soit 8 nœuds correspondant un vent de force 3 sur l'échelle de Beaufort avec un angle apparent de 90° sur le rotor. De plus, la surface projetée de notre rotor est son diamètre multiplié par sa hauteur. On obtient donc Area = 162 m<sup>2</sup>.

Afin de déterminer la puissance générée par un rotor, il faut d'abord déterminer :

- Le coefficient de portance du rotor, qui représente l'efficacité avec laquelle le rotor génère une force perpendiculaire au vent apparent :  $CL = 2 \times \pi \times \left(\frac{U_{rs}}{AWS}\right) = 166.1$

La valeur de notre coefficient de portance est totalement aberrante et irréaliste en comparaison des coefficients de portance des rotors actuels (compris entre 3 et 7), et aussi selon la thèse de Mr.PILI<sup>13</sup>. Cependant, notre analyse dimensionnelle nous permet de confirmer la cohérence de notre calcul, ainsi la différence peut s'expliquer par des effets de turbulence, des

<sup>13</sup> Étude numérique de la tenue à la mer de navires-énergie – Mr PILI



#### IV. La modélisation des variables

pertes de frottement, du décrochage. Après différents échanges, nous décidons de fixer un CL à 5 ainsi qu'un coefficient de traînée à 0.8.

- La force de portance générée par le rotor :  $FL = 1/2 \times \rho \times AWS^2 \times Area \times CL = 9$  kN
- Force de traînée :  $FD = 1/2 \times \rho \times AWS^2 \times Area \times CD = 1.44$  kN
- La poussée utile générée par le rotor :  $FR = FL \cdot \sin(AWA) - FD \cdot \cos(AWA) = 8.73$  kN

Nous pouvons ainsi calculer la puissance d'un rotor :  $P_{rotor} = FR \times V_{ship} = 76,39$  kW. Il nous faut retirer la puissance nécessaire à la rotation du rotor pour connaître le gain net.

Dans ce cas, si on suppose que la puissance utile générée par le rotor est la même pour les 4 rotors (ce qui n'est réellement pas le cas dû à l'effet de masque), on a donc  $FR_{totale} = 4 * 76,39 = 305.5$  kW. De plus, nous savons que la puissance des deux générateurs diesels = 7MW.  $FR_{totale}$  représente donc 4,35% de la puissance disponible.

## 2. Le fichier .nc

Shiplify est un Velocity Prediction Programm (VPP), c'est-à-dire un programme informatique qui calcule les performances d'un voilier dans différentes conditions de vent en équilibrant les forces exercées sur la coque et les voiles, développé par Dice Engineering. Ce programme permet de calculer les performances hydrodynamiques et aérodynamique d'un navire. Il permet d'évaluer en fonction du navire et de son type de propulsion vélique, ainsi qu'en fonction des conditions environnementales (vent, vitesse, direction...) la force de poussée, la puissance consommée, et de nombreuses autres grandeurs.

Shiplify produit donc un « résultat » exportable en format NetCDF (.nc). Ce format est un standard beaucoup utilisé dans le domaine scientifique afin de stocker des données multidimensionnelles. Il permet une meilleure gestion des données car il représente des variables dépendantes de plusieurs paramètres en indices multiples. Chaque dimension correspond à un index dans un tableau de données.

Le choix du format NetCDF s'avère particulièrement pertinent pour ce type d'application, car il offre une grande souplesse dans le stockage de grilles multidimensionnelles et garantit une portabilité optimale entre différentes plateformes logicielles.

## IV. La modélisation des variables

### 2.1 Génération des données : Shiplify et structure du fichier NetCDF

Le logiciel Shiplify simule différentes conditions de navigation, en tenant compte des contributions aérodynamiques (voiles), hydrodynamiques (carène, gouvernail), et mécaniques (propulsion, consommation). Il détermine, pour chaque cas, une configuration stable et réaliste du navire, c'est-à-dire une situation où toutes les forces (vent sur les voiles, résistance de l'eau, propulsion) s'équilibrent, permettant une navigation stable et efficace. Il utilise pour cela un solveur d'optimisation, qui cherche à maximiser l'usage des voiles tout en respectant les contraintes de stabilité, de faisabilité et de puissance moteur disponible.

Comme indiqué précédemment les résultats de ces simulations sont enregistrés dans un fichier NetCDF. Le fichier contient une grille de points définie selon cinq axes principaux :

- STW\_kt (vitesse du navire à travers l'eau, en nœuds),
- TWS\_kt (vitesse du vent réel),
- TWA\_deg (angle du vent réel),
- WA\_deg (angle des vagues),
- Hs\_m (hauteur significative des vagues).

À chaque combinaison de ces paramètres correspond un ensemble de grandeurs simulées, telles que :

- Les efforts aérodynamiques totaux (TotalSails\_X, TotalSails\_Y, TotalSails\_N),
- Les efforts hydrodynamiques (TotalRudderSwayLoads, TotalRudderYawTorque, CalmWaterResistance\_X, etc.),
- Les variables dynamiques (HEELING, LEEWAY, SurgeVelocity, RPM),
- Les bilans énergétiques (BrakePower, TotalFuelConsumption, SailsActivePower),
- Les indicateurs de validité numérique (EquilibriumSolverConverged, OptimizerStatus).

*(La table complète se trouve en annexe – Annexe 2)*

Ce fichier représente ainsi une table de performance 5D. Il est possible de l'interroger à l'aide d'un système d'interpolation ou par extraction directe de cas pré-calculés.

### 2.2 Intégration dans Bridge Command

- **Objectif de l'intégration**

#### IV. La modélisation des variables

Bridge Command utilise par défaut des modèles simplifiés de force basés sur des coefficients paramétriques constants. L'objectif de cette intégration est de remplacer ces modèles par une dynamique dérivée des résultats de Shiplify, assurant une continuité dans la modélisation depuis le calcul de performance jusqu'à la navigation simulée.

Deux stratégies principales d'intégration peuvent être envisagées :

- ***Interpolation dynamique à partir du NetCDF***

Dans cette première approche, le fichier .nc est chargé au lancement de la simulation. À chaque cycle de mise à jour du simulateur, les conditions de navigation réelles (vitesse, vent, mer) sont mesurées ou estimées, puis utilisées pour interroger dynamiquement la base de données de Shiplify.

L'interrogation passe par une interpolation multidimensionnelle sur les cinq dimensions du fichier NetCDF. L'interpolation multidimensionnelle est une méthode mathématique qui permet d'estimer une valeur inconnue à partir de données connues réparties dans un espace à plusieurs dimensions, comme un tableau reliant la vitesse du vent (TWS), l'angle du vent (TWA) et la force propulsive des voiles. Elle est utilisée pour obtenir des valeurs entre des points mesurés ou simulés, sans avoir à recalculer toute la physique. Cette approche permet d'obtenir les valeurs précises des efforts aérodynamiques et hydrodynamiques.

Cette solution apporte de la précision à la simulation mais à un haut coût de calcul. Elle est adaptée à des postes de simulation disposant de ressources suffisantes (ce qui n'est pas le cas pour le moment, le simulateur fonctionnant à l'aide de Raspberry py).

- ***Utilisation d'une table de cas pré-calculés***

La deuxième méthode consiste à effectuer en amont une réduction de la base de données. On sélectionne un sous-ensemble de cas jugés représentatifs (par exemple, pour un nombre restreint de vitesses et angles de vent). Ces sous-ensembles sont exportés sous forme de fichier CSV ou JSON. La table est ensuite chargée dans Bridge Command, et l'interpolation est effectuée sur un espace réduit (2D ou 3D au lieu de 5D).

Bien que cette méthode réduise la précision hors des points calculés, elle adaptée aux simulations en temps réel, en particulier pour des environnements pédagogiques.

# V. La modélisation du vent

Pour que le simulateur de navigation soit fidèle à la réalité, il est nécessaire de modéliser de manière « réaliste » le vent. En effet, logiquement sur un simulateur de navires à propulsion vélique le vent est plus qu'essentiel.

## 1. État des lieux de la modélisation du vent dans les simulateurs

### 1.1 Modèles météorologiques utilisés

Les simulateurs de navigation de course à voile sont les plus performants actuellement parmi les simulateurs de navigation vélique, car le vent est la variable extérieure prédominante lors des courses au large, exerçant une influence directe sur la performance et la stratégie.

Ces simulateurs utilisent des modèles de prévision numérique du temps qui repose principalement sur la mécanique des fluides pour simuler l'évolution de l'atmosphère.

Les modèles utilisés sont produits par des centres météorologiques nationaux ou internationaux, et ont une résolution et une fréquence variables. Les principaux modèles utilisés sont :

- GFS (Global Forecast System) : modèle global américain, résolution environ 27 km, prévisions jusqu'à 15 jours, actualisation 4x/jour.
- ECMWF IFS (Integrated Forecast System) : modèle global européen de très haute qualité, résolution environ 9 km.
- AROME / ARPEGE : modèles français haute résolution (AROME : 1.3 km de précision mais ne fonctionne que pour l'Europe), le premier est un modèle affiné de petite échelle et le second est un modèle global couvrant l'ensemble du globe.
- ICON : modèle allemand utilisé pour les prévisions européennes et mondiales.
- WRF (Weather Research and Forecasting) : modèle configurable utilisé pour les régates, permettant des calculs locaux à ultra-haute résolution de l'ordre de 500 m.

Ces modèles délivrent des prévisions de champ de vent sous forme de composantes vectorielles : Est-Ouest et Nord-Sud et en altitude.

Les valeurs sont calculées à différentes altitudes standard, notamment à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer, cette hauteur correspondant à la hauteur de référence en navigation.

Les données sont exportées dans des formats standard :

## V. La modélisation du vent

- GRIB (GRIdded Binary) : c'est un format compressé, très utilisé dans la navigation et les logiciels météo.
- NetCDF(Network Common Data Form): plus fréquent dans les applications scientifiques, ce format est adapté au traitement par des scripts Python/Matlab ou par des logiciels d'analyse climatique.

Des logiciels comme SailGrib, Weather4D, TimeZero, Expedition, OpenCPN permettent d'intégrer ces données dans l'interface de navigation :

- L'utilisateur peut choisir la zone géographique et la résolution spatiale et la résolution temporelle (par exemple : 27 km, toutes les 3h).
- Les données peuvent être automatiquement mises à jour ou téléchargées en différé.

### 1.2 Traitement du vent dans les simulateurs

Il y a différents types de traitement des données de vent, ces types dépendent des objectifs. Ces derniers peuvent être le réalisme visuel, la pédagogie, l'entraînement professionnel...

Le traitement des données peut inclure plusieurs niveaux.

#### – **Affichage graphique simple**

Afin de visualiser le vent, on utilise des flèches vectorielles proportionnelles à la vitesse, des tracés de particules animées suivant le vent (Stream line), des cartes iso-vents (comparables aux isobares pour la pression).

#### – **Interpolation spatio-temporelle**

Les données exportées étant discrètes dans l'espace et dans le temps, elles sont transformées en données continues par les simulateurs.

- Interpolation bilinéaire dans l'espace (La valeur interpolée au point inconnu est une combinaison pondérée des valeurs des quatre points voisins, où les poids dépendent des distances relatives du point inconnu par rapport à ces voisins)
- Interpolation linéaire dans le temps (on estime des valeurs intermédiaires en supposant un changement constant et linéaire entre deux tranches horaires)

Ces interpolations permettent de reconstituer un champ de vent fluide et réaliste même entre deux points de grille.

#### – **Ajout des phénomènes météorologiques locaux**

Des effets non modélisés dans les fichiers GRIB peuvent être ajoutés dans certains simulateurs.

## V. La modélisation du vent

Il peut y avoir :

- Des effets de relief (accélération du vent dans les vallées, effet Venturi)
- Des brises thermiques de mer/terre, générées selon l'heure et la position.
- Des canaux de vent dus à la géographie (caps, détroits)

L'ajout de ces effets se fait de manière générale par des règles heuristiques (règles se basant sur le bon sens et l'expérience, même si elles ne sont pas parfaites).

### – **Simulation de la turbulence et des rafales**

Le vent réel n'est pas constant, il comporte des fluctuations rapides. Afin d'intégrer ces fluctuations à la modélisation, on ajoute :

- Un bruit aléatoire filtré (par exemple bruit blanc dans un filtre passe-bas).
- Un modèle stochastique réaliste, comme le spectre de Von Karman Dryden, qui simule des rafales selon une distribution naturelle.

Il est aussi possible de paramétrer l'intensité et la fréquence des rafales.

### – **Contrôle avancé dans les simulateurs professionnels**

Des plateformes comme Kongsberg K-Sim ou Transas Navi-Trainer offrent des options supplémentaires pour les instructeurs :

- Modification dynamique du vent pendant l'exercice.
- Défaillance ou incohérence des capteurs (comme l'anémomètre bloqué, ou la girouette erronée)
- Ajout de conditions météo extrêmes (tempêtes, grains, fronts).

Ces fonctionnalités sont très importantes pour un simulateur destiné à la formation des navigants car la STCW impose de pouvoir proposer un environnement simulé varié, avec conditions normales, d'urgence ou complexes.

## 2. Extensibilité

### 2.1 Code source en C++17

Le code source est écrit en C++17, et possède une architecture modulaire. Parmi les modules principaux nous pouvons trouver :

- Ship : il inclut la logique et l'état des navires simulés (position, vitesse, orientation, entrées utilisateur, communications avec d'autres modules)

## V. La modélisation du vent

- SimulationModel : ce module permet de gérer les forces physiques, notamment le calcul des forces appliquées sur le navire.
- Sky : il intègre le rendu du ciel, des conditions de luminosité, etc.

## 2.2 Réseau et communication

La bibliothèque ENet est utilisée par Bridge Command dans le but de gérer la communication réseau (échanges entre modules ou avec des outils externes). Cette bibliothèque facilite :

- Le pilotage à distance (le simulateur peut recevoir des informations venant d'un autre ordinateur, ce qui peut être très utile pour la gestion des exercices)
- L'injection de données météo extérieures (ex. : des scripts personnalisés de météo dynamiques, ou des modèles GRIB, contenant des champs de vent et de pressions, interprétés en temps réel), cela ajoute du réalisme aux scénarios.

## 3. Vers une modélisation plus réaliste du vent dans Bridge Command

Actuellement, la modélisation du vent dans Bridge Command est définie dans le fichier Environment.ini de manière uniforme sur toute la scène simulée. Les paramètres (direction, force, visibilité, pluie) restent fixes, sauf intervention manuelle via le protocole Map Controller. Le réalisme des exercices est donc limité surtout pour des navires assistés par la propulsion vélique pour lesquels les variations du vent influencent directement la navigation.

L'introduction d'un fichier .grid dans un premier temps permettrait de définir un champ de vent spatialement variable (une composante directionnelle et vectorielle à chaque point d'une grille). Cependant, ces fichiers .grid restent souvent trop lisses et manquent de variabilité fine pour rendre le comportement du vent plus naturel. Il serait ensuite pertinent de calculer le simulateur d'introduire une variabilité spatio-temporelle du vent après. Cela pourrait passer par l'ajout de bruit aléatoire filtré pour simuler des fluctuations naturelles, ou par l'intégration de modèles stochastiques réalistes comme le *spectre de Von Kármán - Dryden*, capables de reproduire les rafales atmosphériques. Une telle évolution permettrait de dépasser le cadre des situations-types statiques, en générant automatiquement des conditions changeantes et localisées, rendant ainsi les scénarios plus proches des réalités maritimes.

## VI. Conclusion

## VI. Conclusion

Notre travail s'inscrit dans le projet SOMOS, un projet en collaboration avec l'ENSTA Bretagne, l'école navale et l'ENSM. Ce projet a pour objectif de simuler des navires à systèmes de propulsion assistée par le vent afin de pouvoir former des marins à la navigation à voile. Pour la bonne réalisation de cette formation, nous nous sommes intéressés à la réglementation en vigueur sur la formation vélique ainsi que sur les simulateurs.

Il a été nécessaire de concevoir des navires en CAO en leur apportant de la texture afin d'obtenir une simulation réaliste des conditions effectives de navigation d'un marin en tenant compte, notamment de la gêne que représente les mats, les rotors Flettners, les déflecteurs... La prise en main de différents logiciels de CAO et de texturage (DelftShip, Blender) a été requise. Le but étant de créer des méthodes utilisables pour développer à l'avenir ce projet. Nous avons réalisé des méthodes simples mais permettant un niveau de réalisme suffisant.

D'autre part, les navires assistés par propulsion vélique étant des systèmes récents la documentation technique n'est pas disponible en open source, nous avons pris en compte ce facteur lors de la réalisation des fiches méthodes. Pour optimiser notre modèle nous avons alors réalisé de la CAO en projetant des images disponibles de navires sur différents axes et en utilisant ces images comme référence.

De plus, nous avons calculé leurs caractéristiques principales, pour les variables de la propulsion thermique en utilisant uniquement les variables déjà présentes (résistance à l'avancement, force de propulsion, moment d'inertie ...). De fait, nous avons proposé des formules permettant de les calculer pour les généraliser à tout navire, afin de simuler un comportement réaliste. De plus nous avons également analysé d'autres manières d'obtenir ces caractéristiques principales, en particulier à l'aide du logiciel Shiplify.

Finalement nous avons réfléchi aux améliorations possibles du simulateur. Avec différents niveaux de maturations, en apportant plus ou moins de modifications au logiciel déjà existant.

Par exemple, le vent dans Bridge Command est actuellement défini de manière uniforme et statique, ce qui limite le réalisme des simulations, en particulier pour les navires à voile.

L'introduction d'un fichier .grid suivi d'une variabilité spatio-temporelle (via un bruit aléatoire ou des modèles tels que Von Kármán-Dryden) permettrait de simuler des conditions de vent plus naturelles et plus dynamiques.

Les objectifs initiaux du sujet étant ambitieux, le choix a été fait de ne pas aborder la partie « Aider à la définition et à la création d'Interfaces Homme-Machine (IHM) pour le contrôle de ces



## VI. Conclusion

navires. ». Il a été jugé judicieux de retirer cet objectif afin de ne pas effectuer un travail rapide et lacunaire sur le sujet, ce qui n'aurait pas été pertinent.

Cependant l'objectif de ce simulateur étant de former des navigants, il sera indispensable de réfléchir à différentes IHMs à intégrer au simulateur. Les navires à systèmes de propulsion assistée par le vent étant encore nouveau dans le monde de la marine marchande ce projet devra être en constante évolution, les moyens de propulsion utilisés lors de ce travail ont été choisis car ils sont les moyens de propulsion véliques les plus courants et ceux qui seront le plus probablement, d'après les commandes déjà effectuées, employés à grande échelle lors de l'exploitation des futurs navires. Cependant d'autres moyens de propulsion vélique étant moins utilisés actuellement pourront être simulés afin de former les élèves sur un échantillon de navire suffisamment large.

Enfin, dans le cadre de notre travail et dans un objectif d'enrichissement personnel, nous avons participé à la conférence « Brest Ocean 2025 ». Cette conférence traitant du sujet de l'océanographie nous avons pu explorer l'utilisation de notre projet dans ce contexte.

## Bibliographie & Sitographie :

« 3D Decorative Boat Interior Model - TurboSquid 1589585 ». s. d. Consulté le 20 mars 2025. <https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-decorative-boat-interior-model-1589585>.

Boyette, Nouran Salahieh, Michelle Watson, Hanna Park, Alex Stambaugh, Gloria Pazmino, Chris. 2025. « A Mexican Navy Training Ship Struck the Brooklyn Bridge, Killing at Least 2. Here's What to Know ». CNN. 18 mai 2025. <https://www.cnn.com/2025/05/17/us/manhattan-brooklyn-bridge-ship> Consulté le 22 mai 2025.

« Bridge Command ». s. d. Consulté le 4 mars 2025. <https://www.bridgecommand.co.uk/Doc/Scenario.php>.

« Bridge Command 5 - Ship models ». s. d. Consulté le 4 mars 2025. <https://www.bridgecommand.co.uk/Doc/Current/newmodels.html>.

Charlou, Moran. s. d. « Méthodes et outils d'aide à la conception pour l'assistance à la propulsion éolienne des navires ». Consulté le 27 mars 2025

Disk/Cat, kaʁstn. 2010. *Deutsch: Das deutsche Frachtschiff E-Ship 1 im Emden Hafen*. Own work. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cargo\\_E-Ship\\_1,\\_Emder\\_Hafen,\\_CN-02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cargo_E-Ship_1,_Emder_Hafen,_CN-02.jpg). Consulté le 18 mai 2025

« DNV-ST-0033 | Maritime simulator systems | Document Center, Inc. » s. d. Consulté le 15 janvier 2025. <https://www.document-center.com/standards/show/DNV-ST-0033>.

Khan, L, J J R Macklin, B C D Peck, O Morton, et J-B R G Souppez. 2021. « A REVIEW OF WIND-ASSISTED SHIP PROPULSION FOR SUSTAINABLECOMMERCIAL SHIPPING: LATEST DEVELOPMENTS AND FUTURE STAKES ». *Wind Propulsion 2021*, septembre. <https://doi.org/10.3940/rina.win.2021.05>. Consulté le 22 janvier 2025

Kolodziejski, Marcin, et Mariusz Sosnowski. 2025. « Review of Wind-Assisted Propulsion Systems in Maritime Transport ». *Energies* 18 (4): 897. <https://doi.org/10.3390/en18040897>. Consulté le 07 février 2025.

Larsson, Lars, et Rolf E. Eliasson. 1994. *Principles of Yacht Design*. Camden, Me. : International Marine. <http://archive.org/details/principlesofyach00lars> Consulté le 20 mars 2025.

Pili, Fabio. 2024. « Étude numérique de la tenue à la mer de navires-énergie ». Thèse, Nantes: L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES. [https://www.researchgate.net/profile/Fabio-Pili-2/publication/389600829\\_Numerical\\_study\\_of\\_the\\_seakeeping\\_behaviour\\_of\\_Energy\\_ships/lin](https://www.researchgate.net/profile/Fabio-Pili-2/publication/389600829_Numerical_study_of_the_seakeeping_behaviour_of_Energy_ships/lin)

[ks/67c9561532265243f582c1cf/Numerical-study-of-the-seakeeping-behaviour-of-Energy-ships.pdf](#) Consulté le 12 avril 2025.

*STCW Convention - IMO [2011, PDF]* › *Marine Tracker*. s. d. Consulté le 15 janvier 2025.  
<https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=92>.

« Vent réel - vent apparent - forces aéro et hydrodynamiques ». s. d. Consulté le 3 mars 2025.  
<http://www.francelaser.org/Nouveau/revue/jvp1.htm>.

# Table des illustrations

Figure 1: Cargo E-Ship 1, Emden Hafen, CN-02.jpg.....	1
Figure 2: Classification des simulateurs passerelles par DNV .....	13
Figure 3 : Exigences requises selon la classe de simulateur .....	13
Figure 4 : Tables des variables du simulateurs .....	18
Figure 5 : Création d'un scénario sur Bridge Command .....	21
Figure 6 : Modification d'un scénario sur Bridge Command .....	21
Figure 7 : Coque de navire sur DelftShip .....	25
Figure 8 : Image de référence .....	26
Figure 9 : Réalisation de la coque .....	26
Figure 10 : Réalisation d'appendices et superstructures .....	27
Figure 11 : Vérification du modèle .....	27
Figure 12: Orientation des faces.....	28
Figure 13: Préparation du modèle .....	28
Figure 14 : Déplier le modèle UV .....	29
Figure 15 : UV editing vérification.....	29
Figure 16 : Bake .....	32
Figure 17 : Création de l'image grâce au Bake.....	32
Figure 18 : Application de la texture.....	32
Figure 19: Modèle Baked.png ou .jpg.....	33
Figure 20: Modèle UV.....	33
Figure 21 : appliquer un matériau par détail ajouter.....	34
Figure 22: Exemple de logo .....	35
Figure 23 : Image bake du E-ship 1 .....	36
Figure 24 : Affectation finale et export .....	36
Figure 25 : Schéma des forces appliquées sur le navire .....	37
Figure 26 : Ship data .....	48
Figure 27 : Rotor data.....	48

## Tables des annexes:

Annexe 1: Article pour la conférence OCEANS BREST

Annexe 2 : Variables et Dimensions Associées

Annexe 3 : DNV Standard Maritime simulator systems

Annexe 4 : Tableur de détermination des forces d'un rotor flettner

# Identifying Key Requirements for Maritime Bridge Simulators in Wind-Assisted Ship Propulsion Training

1<sup>st</sup> Julien Rieffel

*Master Student*

*French Maritime Academy (ENSM)*

Nantes, France

julien.rieffel@supmaritime.fr

2<sup>nd</sup> Lilou Corlay

*Master Student*

*French Maritime Academy (ENSM)*

Nantes, France

lilou.corlay@supmaritime.fr

3<sup>rd</sup> Malo Seloisse

*Master Student*

*French Maritime Academy (ENSM)*

Nantes, France

malo.seloisse@supmaritime.fr

4<sup>th</sup> Pedro Merino-Laso

*IRENAV EA 3634, Brest, France*

*French Maritime Academy (ENSM)*

Nantes, France

pedro.merino-laso@supmaritime.fr

5<sup>th</sup> Hasan Ahmad

*French Maritime Academy (ENSM)*

Nantes, France

ahmad.hasan@supmaritime.fr

6<sup>th</sup> Matthieu Sacher

*UMR CNRS 6027, IRDL*

*ENSTA, Institut Polytechnique de Paris*

Brest, France

matthieu.sacher@ensta.fr

**Abstract**—Maritime transport is responsible for 3 percent of global greenhouse gas emissions. To meet environmental regulations, technologies such as Wind-Assisted Ship Propulsion (WASP) are being considered. However, maritime officers' training needs to be adapted, as sailing is not sufficiently covered in current curricula. The SOMOS project aims to develop a navigation simulator for merchant vessels equipped with WASP, incorporating realistic training scenarios such as failure management. This simulator will enable sailors to prepare for the use of these technologies and contribute to the reduction of emissions in maritime transport. In this paper, we present the results of a student work with the goal of identifying minimal requirements for bridge maritime simulators including WASP technologies.

**Index Terms**—wind propulsion, WASP, mariners' training, bridge simulator

## I. INTRODUCTION

Sail is the oldest propulsion mode used at sea but has evolved to benefit from technological advances that provide a sustainable solution to some of the major current maritime challenges, including the need to reduce greenhouse gas emissions and marine pollution. Sailing navigation is not very developed in the merchant navy, yet it could be very beneficial. Moreover, the modern technology and simulation techniques look really promising to reinvent sailing as a method of both commercial and scientific operations. This paper brings to the fore the importance of sailing for both environmental and operational issues, arguing that it plays a major role in reducing emissions from maritime transport, improving the autonomy of vessels, and promoting the sustainability of oceanic research activities focusing on training requirements when using bridge simulators.

SOMOS is a project financed by the French Innovation Defense Agency (Agence de l'Innovation de Défense, AID).

The restriction of navigation under sail to the training courses of the merchant navy is evidenced by the example of the STCW (Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers) training program, which only dedicates a few weeks to introduce their apprentices to sailing, with everything that implies regarding learning and professional practices. Sailing is often considered old-fashioned. Nevertheless, the recent development of propulsion systems using wind power and navigation techniques by dynamic optimization illustrates its central role within present-day maritime activities. Numerous systems exist nowadays, such as Flettner rotors, turbo sails, kites, or rigid sails [1]. According to studies, these technologies have the potential to substantially reduce emissions and expenses related to commercial naval transport if they are implemented efficiently [2]. In addition, competitive sailing activities have encouraged the use of simulation and the optimization of its even aerodynamics, which could contribute to improve the instructional and adaptation techniques of the sailors of the fleet equipped with devices suitable for sailing [3]. Originally in due form for leisure uses, these systems have proven to be particularly relieving when it comes to enhancing the performance of vessels and providing an eco-sustainable future to them.

The maritime sector is subject to an increase in the number of environmental regulations, including those of the appendix VI of the MARPOL, the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, and the Paris Agreement. These goals could be fulfilled with wind power energy, which could lead to a decrease of 30% of the gas emissions [2]. One would expect a tightening of the rules. This could mean that future oceanographic vessels will have to be free of greenhouse emissions. In addition, vessels constructed after 2030 will have to be free of greenhouse gas emissions [4]. Sailing ships

are a valuable opportunity for oceanography. It could reduce noise and motor heating, increasing the vessel's autonomy and reducing operating and maintenance costs.

Vessels using wind power systems require specific training because it requires mastering much knowledge about these new technologies and wind. Marines must be prepared on different vessels since the boat characteristics are very influential on the ship behaviour. We must control plenty of characteristics such as: the sail area, the orientation of the sail, the curvature of the sail, the drag generated by the system or the drift generated by the sail and that must be compensated, for example, with an anti-drift keel. The thrust centre, often located high up, will have an impact on the ship's attitude. We also need to work on the automatization to help to not overload the mariner's job. A visual job must be done to simulate the vision at the bridge but also with the radar system, simulating blind spots. The rudder surface also must be raised because of the lack of the stream of water lessening its efficacy. A weather routing software processes all environmental data, allowing mariners to travel in good conditions.

Virtual simulators are common tools used for maritime training. These systems frequently evolve or are used in another way to be adapted to new requirements. For example, a helicopter simulator has been adapted for maritime flights [5] and a bridge simulator has been used in energy-efficient manoeuvring training [6]. For navigation under sail, navigation training will evolve to consider these problems. Actual full mission bridge simulators do not include merchant vessels embarking wind-assisted systems. In consequence, multiple evolutions need to be anticipated. This work explores the technical and pedagogical requirements for maritime full mission bridge simulators used for training with merchant vessels with sails.

The practice of sailing navigation, supported by the current technological developments, offers a real and profitable way to arrive at a sustainable approach to the worlds of the maritime industry. In addition to adopting propulsion using the wind with other sources of renewable energy, there is no doubt that the stimulus is going to work to decrease the emissions of greenhouse gases, improve the engineering of the boats, and contribute to the solution to the various ecological and social challenges that are going to be brought before us in the 21<sup>st</sup> century. These new innovations are going to change the structure of oceanic research and concern most of the necessary requirements for the sustainability of the marine environment in the century.

In this paper, we will describe the expected requirements for full mission bridge simulators to perform navigation training using wind-assisted ship propulsion, including new interfaces for smart routing and weather. The results of this work will be implemented by the SOMOS project<sup>1</sup>. This development work will be introduced as perspectives.

<sup>1</sup>Web site of SOMOS project: <https://somos-project.fr/> Visited on April 10<sup>th</sup>.

## I. STATE OF THE ART

For effectively training seafarers in sailing, bridge simulators should comply with regulatory requirements while proposing realistic and controlled scenarios. For this, we present in this section a regulatory and technical survey of the requirements for seafarers' training and used equipment, and the sail propulsion sector. This state of the art provides the more basic requirements of our work.

### A. Seafarers training

STCW Convention governs maritime training on an international scale. This convention does not provide for any specific training in sailing. Merchant navy officers only receive theoretical training on the effects of wind and sea, but this is not adapted to the particularities of vessels with wind propulsion systems. Moreover, no practical modules are included in standard curricula, limiting sailors' ability to operate vessels using wind-assisted propulsion.

However, STCW does impose certain functionalities on training simulators, notably to ensure that they faithfully represent the maritime environment. They must include an offshore navigation module and be capable of simulating emergency situations, including unusual or dangerous scenarios. In addition, they must meet specific RADAR and ARPA simulation requirements, and offer a suitable interface for controlling, monitoring, and recording exercises, to enable effective debriefing.

### B. Classification societies

Classification societies certify that a simulator complies with STCW requirements. In consequence, they play a key role in defining standards for the training and use of marine simulators. For illustration, DNV (Det Norske Veritas) has developed a classification of simulators into four categories, ranging from A (high fidelity) to D (low fidelity). Although these standards are not mandatory for STCW compliance, they do guarantee a level of realism adapted to the needs of maritime training. DNV's certification documents provide detailed information for each requirement, including technical aspects. They also allow going deeper and refining the STCW requirements. Even if DNV certification is mainly used for marketing purposes, the documents indicating how to certify a simulator also inform us on how to make it STCW-compatible.

### C. Existing bridge simulators

In the marine sector, various types of simulators have been developed to meet the specific training needs of professionals. They include:

- Bridge navigation simulators: These tools faithfully reproduce a ship's operating conditions, enabling officers to practice manoeuvring in a controlled environment. A set of different vessels are often proposed to understand the particularities of each type of ship. External conditions as wind and sea state can be controlled for creating realistic conditions. Some of them are specialized, such as "Le

Seamulateur”<sup>2</sup>, which specializes in marine pilotage to make port traffic more reliable and protect the environment.

- Engine room simulators: Designed for training engineers and mechanics, these simulators recreate the engine room environment, enabling practice in propulsion system management and maintenance procedures. A notable example is the Wärtsilä Engine Room Simulator (ERS TechSim), designed to train and assess the skills of engine department personnel, providing a detailed replica of the ship’s systems.
- Ocean racing simulators: In professional ocean racing, specialized simulators are used for training and coaching skippers. These tools can faithfully reproduce open-ocean sailing conditions, providing sailors with a realistic training platform to hone their skills, test strategies and familiarize themselves with equipment without the risks associated with training at sea. For example, software such as Adrena Pro<sup>3</sup> offers advanced solutions for navigation and strategy in offshore racing. Used by many professional sailors, this software provides tools for routing, performance analysis and course management, helping to improve decision-making at sea.

So, while simulators exist for competitive sailing and for training merchant navy crews, the development of specific simulators for merchant navy vessels using WASP is underway, reflecting the growing interest in sailing solutions in shipping. For the best of our knowledge, nowadays any commercial bridge simulator includes WASP systems.

## B. Existing WASP

Sail propulsion is one of the oldest means of transport in history. They have served as the basis for the development of today’s propulsion systems. The best known historic sails are:

- Lateen sails: triangular sails used on small boats, they offer a large sail area for good propulsion in crosswind conditions.
- The fore-and-aft sail is a non-symmetrical sail made up of four angles, allowing you to combine manoeuvrability and propulsion.
- Square sails are used on caravels to capture tailwinds efficiently and move quickly.

All these means of propulsion have been extensively documented in numerous texts. They have undergone numerous evolutions and have led to the development of highly advanced navigation methods.

In view of the current anthropogenic environmental impact (pollution, underwater noise, human exploitation), after a long tradition of using engines to propel ships, the maritime world is increasingly turning to propulsion by wind. Currently, several different wind propulsion technologies are in use or

under development to reduce the carbon footprint of maritime transport. Today, the most representative are:

- Kite propulsion systems, also known as traction wings, exploit high altitude winds to provide propulsion assistance. However, this technology is still marginal, with only three vessels equipped to date. This is mainly since kites don’t offer as much traction as other sails. In addition, kite launching and retrieval systems are complicated to build. Designing a kite that returns directly to the ship can prove difficult. Controlling the sail’s movement can also be complicated, requiring expensive and complex systems.
- Flexible sails are similar to conventional sails, but optimized with modern materials and automated systems, flexible sails make more efficient use of wind energy. Compared with other forms of wind propulsion, this technology is still not widely used. Nevertheless, it remains the simplest method to implement and benefits from many years of practical experience, since it represents the oldest propulsion method for ships.
- Wing sails are inspired by aircraft wings. They offers better aerodynamic efficiency. This may explain why it is more widely used than the soft sail. To date, 16 ships are equipped with rigid sails, with 9 new orders in progress.
- Flettner rotors exploit the Magnus effect [7], this device generates propulsive force by means of rotating cylinders. With 38 vessels already equipped and 25 new orders, this technology is currently the most widespread on the marine propulsion market. It is also the simplest method to use, as the speed of the vessel can be controlled directly with the speed of rotation of the rotor. An advantage not found on other wind propulsion systems.

Today, a total of 101 vessels are equipped or in the process of being equipped with wind-assisted propulsion systems. The number of orders has risen sharply in recent years, with 29 installations between 2018 and 2023, and 72 new orders for 2024 and beyond. These solutions offer an emissions reduction potential of up to 30%, depending on operating conditions and specific ship configurations. However, their adoption requires an adaptation of maritime training and a rethinking of operational strategies to maximize their effectiveness.

## I. METHODOLOGY

The used methodology is introduced in Figure 1.

To create the requirements for these simulators, we based ourselves on legislative documents from the STCW and the classification societies. These documents include requirements for simulators and training to be compliant with international legal obligations. They also include scenarios that had to be included in the simulator, or even the obligation to simulate failures. We then examined existing simulators in order to look at their advantages and shortcomings and thus improve the teaching performance of our simulator.

We performed interviews with maritime teachers and sailors. Some of them are experts in navigation training and know well the need for training tools. Other teachers provided us

<sup>2</sup>Website presenting Le Seamulateur: <https://leseamulateur.com/> Visited on April 10<sup>th</sup> 2025

<sup>3</sup>Adrena Pro Website. <https://www.adrena-software.com/en/our-navigation-software-offer/navigation-and-regular-racing/adrena-pro/> Visited on April 9<sup>th</sup>, 2025.



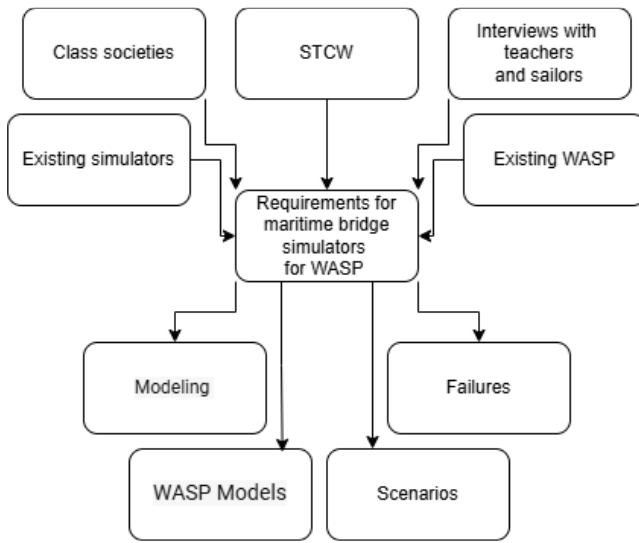


Fig. 1. Used methodology for identifying requirements for bridge simulators.

with technical information on both the legislative and scientific levels. They helped us to understand the expectations of sailors and to refine the simulation of sailing ships, to be able to create a realistic wind model.

We also interviewed experienced sailors with sailing experience who taught us essential information about sailing methods, captains in training who told us about their expectations, and a teacher helping us to understand the simulator's parameters. His expertise enabled us to choose the most relevant variables to model the effect of wind on the ship and design an effective teaching tool. Teachers who are experts in maritime legislation were able to guide us toward the necessities that the simulator needed to encompass to meet STCW requirements.

Finally, the existing means of propulsion for sailing ships have enabled us to create ship models that are consistent with what would be found in real-life conditions. This way, the presented scenarios will include situations that sailors might encounter.

## I. RESULTS

After analysing the different collected data presented in the previous sections, we present our results.

As there exist many different types of wind propulsion solutions, but some are being used more than others, we concentrate our efforts on the four most common and reliable types of propulsion. These are the flexible and rigid sail, the Flettner rotors, and the kite. This allows identifying the different vessels that would need to be implemented in these simulators. Finally, this aided us in our conceptualization of the HMI (Human Machine Interface).

### A. Essential scenarios

In order to provide effective training, our simulator will need to include several scenarios:

- Conducting navigation across open seas: This is the most common situation for a vessel for a vessel employing wind assisted propulsion. It is crucial to train sailors in the optimal settings of the propulsion systems in accordance to the weather conditions.
- Entering or leaving a port: This is a risky phase where WASPs can impact the stability of the vessel, or the visibility, including when they are not in use.

These two scenarios are very interesting and would enable sailors to be trained for most situations they might encounter. The first scenario is mandated by STCW and could help sailors understand the effects of wind on their ship. Sailing depends on many factors. Sea condition is one example. Waves and currents act on the ship, limiting sailors' ability to manoeuvre and act. The wind, which often goes hand in hand with sea state, is also very important for sailors. If the wind is against the ship, you need to know how to "luff up" the ship (make it change tack) to be able to sail upwind, a technique which is indispensable to the sailor. What is more, beyond a certain wind strength, depending on the type of propulsion and the structural condition of the vessel, the sailor can no longer sail with his sails, and must lower them.

Entering and leaving harbours is a very special matter for sailing ships. Sailing ships must consider the height of their masts but cannot sail with the force of the wind, as their manoeuvrability would be too poor to move into port without suffering damage. The sailor must therefore learn to sail his ship with the engine on board, without forgetting the height of the masts and the handicap this will bring. The sails will modify the KTM (Keel To Mast) height, the ship's inertia, its ability to catch the wind, its draught, and visibility from the bridge.

### B. Failures

STCW requires simulators to include crisis management situations, including breakdown and emergency scenarios such as fire. Obviously, existing simulators don't take into account failures concerning WASPs because some of the technical constraints are unique to sailing ships. This means that on a mechanically propelled vessel, these problems do not exist. The sailor therefore needs to practise these new concerns so that he or she knows how to react should they arise in a real-life situation. A pertinent set of failures needs to be developed for each wind technology to learn mariners how to react in the case of failure.

Some examples of failures are rigging or mast failure for flexible and rigid sails, failure of automated control systems for Flettner rotors or rigid wings, mechanical problems with kite deployment systems, or erroneous weather information.

### C. Modelling

1) *Human Machine Interface* : An effective simulator must offer an interface that allows sailors to :

- Monitoring and adjusting the parameters of wind systems.
- Visualize the effect of apparent wind, lift and drag forces in real time.

- Access simulated weather data to anticipate changing conditions.

This information is essential for the sailor to have the situational awareness he needs to pilot the ship safely. Coherent man-machine interfaces need to be ergonomic and present this data unambiguously.

2) *Wind simulation*: Unlike conventional simulators, where wind is mainly an external parameter, our simulator will need to incorporate fine modeling of aerodynamic flows.

Initial modelling should include uniform wind to simplify the analysis and focus on the basic effects of the flow around the object under study. By eliminating variations in wind direction or intensity, this approach provides a better understanding of the fundamental interactions between wind and geometry, without the complexity of other factors. It serves as a solid starting point before adding elements of complexity, such as turbulent winds or pressure gradients. This method also facilitates comparisons between different configurations and ensures better validation of results before introducing more realistic conditions.

There exist different ways to calculate physical movements. Physical equations can help to create general approaches, performance matrices could be useful for simulating known ships, or calculations based on polars can simplify their functioning.

For illustration, some key equations are: Lift force  $F_l = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot C_l \cdot AWS^2$ , drag force  $F_d = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot C_d \cdot AWS^2$  and the apparent wind  $AWS = \sqrt{TWS^2 + V^2 - 2 \cdot TWS \cdot \cos(\vartheta)}$  will have to be integrated to faithfully simulate the behaviour of the ships. With;  $\rho_{air}$ : Air density ( $\rho_{air} = 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$ ); A: Sail area;  $C_l$ : Lift coefficient;  $C_d$ : Drag coefficient; TWS: True wind speed;  $\vartheta$ : Angle between true wind speed and ship's speed; V: Ship's speed.

#### A. WASP system

Bridge simulators include a set of ships to be used. These ships need to represent enough variety for pertinent training. These models can simulate an existing sailing ship, giving values to the variables we have already seen. Then we can see how the ship reacts in the simulator and if it is near to real performances. We can then see whether the ship's behaviour satisfies us. The aim is to create training for an existing vessel or take her as a reference.

It is useful to simulate ships created by our own. To do this, we need to take into account several points. The first one is the layout of the means of propulsion, so as not to obstruct the sailor's view too much, but sufficiently to represent the discomfort that might be found on sailing vessels. In addition, the wind systems need to be spaced far enough apart so that apparent wind turbulence resulting from air diffraction from the previous system does not have too much impact on the next one. The size of the vessel must also be consistent with the means of propulsion and with developments in the shipping market. The number of systems will have to be consistent with the size of the vessel, the force of propulsion needed to

move the vessel, and the amount of free space required for the vessel's profitability. In addition, to comply with classification societies, the ship will have to achieve a certain level of visual realism. This allows simulating different ships of different sizes, different characteristics, and with different means of propulsion.

#### I. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Nowadays, maritime transportation looks for solutions to reduce greenhouse gas emissions. Some vessels started to use WASP with this end. The quantity of the vessels using these systems will increase fast in next years. For this, seafarers' training needs to evolve to take into account WASP and to be aware of new risks. Full training, recognized by the STCW, would be necessary to prepare sailors to operate these vessels. Today's bridge simulators are not suitable for sailboat training. Our work aims to fill this gap by proposing requirements for innovative bridge simulators capable of reproducing various navigation scenarios and adapting sailors to the new requirements of sustainable shipping.

Advanced simulator training could help optimize energy consumption by teaching mariners how to adjust propulsion systems to maximize propulsion and allow them to move at a speed necessary for the operation of the vessel. In addition, simulators allow familiarization with these new technologies and reduce risk. This type of propulsion will probably be imposed on future ships in view of the ecological imperatives that man must respect. Unfortunately, the sailors are not trained in these types of navigation, so this could have a huge impact on future navigation.

Future works consist of building a bridge simulator following these requirements. The advancements of this project can be followed on its website (<https://somos-project.fr>). One important part will be to validate implemented systems and their use for training.

#### REFERENCES

- [1] L. Khan, J. Macklin, B. Peck, O. Morton, and J.-B. R. Soupeze, "A review of wind-assisted ship propulsion for sustainable commercial shipping: latest developments and future stakes," in *Wind Propulsion Conference*. Royal Institution of Naval Architects, 2021.
  - [2] International Windship Association., "The role of wind-assisted propulsion in modern shipping. international windship association," Tech. Rep., 2023.
  - [3] "Olympics-sailing-dry runs on horizon with simulators for generation tech," Aug 2024. [Online]. Available: <https://wkzo.com/2024/08/07/olympics-sailing-dry-runs-on-horizon-with-simulators-for-generation-tech/>
  - [4] Marine Environment Protection Committee, "Mepc 75," 2018.
  - [5] W. A. Memon, I. Owen, and M. D. White, "Motion fidelity requirements for helicopter-ship operations in maritime rotorcraft flight simulators," *Journal of Aircraft*, vol. 56, no. 6, pp. 2189–2209, 2019.
  - [6] S. Jensen, M. Lu'tzen, L. L. Mikkelsen, H. B. Rasmussen, P. V. Pedersen, and P. Schamby, "Energy-efficient operational training in a ship bridge simulator," *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 175–183, 2018.
- p. Nuttall and J. Kaitu'u, "The magnus effect and the flettner rotor: Potential application for future oceanic shipping," *The Journal of Pacific Studies*, vol. 36, no. 2, pp. 161–182, 2016

## Annexe 2 : Variables et Dimensions Associées :

Variable	Nom en Français	Dimensions
STW_kt	Vitesse de surface vraie (noeuds)	('STW_kt',)
TWS_kt	Vitesse du vent vrai (noeuds)	('TWS_kt',)
TWA_deg	Angle du vent vrai (degrés)	('TWA_deg',)
WA_deg	Angle du vent apparent (degrés)	('WA_deg',)
Hs_m	Hauteur significative des vagues (mètres)	('Hs_m',)
AWA	Angle du vent apparent	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AWC	Composante de vent apparent	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AWS	Vitesse du vent apparent	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AddedWaveResistance_K	Résistance ajoutée des vagues (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AddedWaveResistance_N	Résistance ajoutée des vagues (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AddedWaveResistance_X	Résistance ajoutée des vagues (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AddedWaveResistance_Y	Résistance ajoutée des vagues (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
AdvanceRatio	Ratio d'avancement	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
BrakePower	Puissance de freinage	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
CalmWaterResistance_X	Résistance en eau calme (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
EquilibriumSolverConverged	Solveur d'équilibre convergé	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
EquilibriumSolverNbIter	Nombre d'itérations du solveur d'équilibre	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
EquilibriumSolverResidue	Résidu du solveur d'équilibre	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
EquilibriumSolverStatus	Statut du solveur d'équilibre	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
HEELING	Gîte	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
HandlePosition	Position de la poignée	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Hs	Hauteur significative des vagues	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')

LEEWAY	Dérive	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Manoeuvring_K	Manoeuvre (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Manoeuvring_N	Manoeuvre (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Manoeuvring_X	Manoeuvre (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Manoeuvring_Y	Manoeuvre (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
OptimizerNbIter	Nombre d'itérations de l'optimiseur	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
OptimizerStatus	Statut de l'optimiseur	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
OutOfModellingRange	Hors de la plage de modélisation	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
PitchRatio	Ratio de tangage	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
PropellerTorque	Couple de l'hélice	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
QuasiPropulsiveEfficiency	Efficacité quasi propulsive	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
RPM	Tours par minute	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
RuddersAngleOfAttack	Angle d'attaque des gouvernails	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
RuddersDeflectionAngle	Angle de déviation des gouvernails	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
STW	Vitesse de surface vraie	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP1_K	Voile_WP1 (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP1_Lift_coefficient	Coefficient de portance Voile_WP1	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP1_N	Voile_WP1 (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP1_X	Voile_WP1 (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP1_Y	Voile_WP1 (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP2_K	Voile_WP2 (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP2_Lift_coefficient	Coefficient de portance Voile_WP2	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP2_N	Voile_WP2 (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
Sail_Sail_WP2_X	Voile_WP2 (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')

Sail_Sail_WP2_Y	Voile_WP2 (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
SailsActivePower	Puissance active des voiles	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
SolverStatus	Statut du solveur	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
SurgeVelocity	Vitesse de surrection	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
SwayVelocity	Vitesse de dérive	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TWA	Angle du vent vrai	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TWC	Composante du vent vrai	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TWS	Vitesse du vent vrai	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalFuelConsumption	Consommation totale de carburant	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalNumberDigitalTwinEvaluation	Nombre total d'évaluations de jumeau numérique	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalPropellersThrust	Poussée totale des hélices	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalPropulsion_K	Propulsion totale (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalPropulsion_N	Propulsion totale (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalPropulsion_X	Propulsion totale (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalPropulsion_Y	Propulsion totale (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalRudderSwayLoads	Charges totales de dérive des gouvernails	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalRudderYawTorque	Couple total de lacet des gouvernails	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalRuddersSurgeLoads	Charges totales de surrection des gouvernails	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalSails_K	Voiles totales (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalSails_N	Voiles totales (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalSails_X	Voiles totales (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalSails_Y	Voiles totales (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
TotalVesselPowerConsumption	Consommation totale d'énergie du navire	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')

WA	Angle du vent apparent	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
WindLoads_K	Charges de vent (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
WindLoads_N	Charges de vent (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
WindLoads_X	Charges de vent (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
WindLoads_Y	Charges de vent (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
vessel_K	Navire (K)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
vessel_N	Navire (N)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
vessel_X	Navire (X)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')
vessel_Y	Navire (Y)	('STW_kt', 'TWS_kt', 'TWA_deg', 'WA_deg', 'Hs_m')

## Annexe 3: DNV Standard Maritime simulator systems

### 3.3 Simulator requirements

#### 3.3.1 Detailed requirements

**3.3.1.1** The bridge operation simulator shall, according to simulator class, fulfil the requirements given in Table 3-3, Table 3-4 and Table 3-5.

Class S requirements will be dependent upon the type of simulated equipment and/or scenario, and the defined competence requirements.

**Table 3-3 Physical realism**

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
1.1.1	Equipment, consoles and workstations shall be installed, mounted, and arranged in a ship-like manner in accordance with design criteria described in DNV rules for classification: Ships and/or DNV rules for classification: HSLC as appropriate to the ship types represented in the simulator. For class D, displays shall be arranged in a usable manner, and controls shall be adapted to the limitations of class D system.	X	X		X
The following equipment shall at least be included in the simulator:					
1.1.2	Controls of propulsion plant operations, including engine telegraph, pitch-control and thrusters. There shall be indicators for shaft(s) revolutions and pitch of propeller(s). There shall be controls for at least one propeller and one bow thruster.	X	X		
1.1.3	Controls of propulsion plant operations.			X	X
1.1.4	Controls of propulsion plant for mooring operations. By any method, it shall be possible to observe the ship's side and the dock during operation of such controls.	X			
1.1.5	Controls of auxiliary machinery. There shall be controls for at least two auxiliary engines, including electric power supply control.	X			
1.1.6	Steering console, including recognized facilities for hand steering and automatic steering with controls for switch over. There shall be indicators of rudder angle and rate of turn.	X	X		
1.1.7	Steering and bearing compass (or repeater) with deviation table (Magnetic) and possibility to adjust for speed and latitude (Gyro).	X	X	X	X
1.1.8	Heading control system (autopilot).	X	X	X	X
1.1.9	At least one radar/ARPA display/unit (automatic radar plotting aid). It shall be possible to simulate both a 10 cm and a 3 cm radar. The radar shall be capable to operate in the stabilised relative motion mode and sea and ground stabilised true motion modes (see STCW Section A-1/12.4. and 5 and paragraph 2 of section B-I/12).	X	X	X	X

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
1.1.10	Communication equipment in accordance with GMDSS (global maritime distress safety system) frame-work, covering at least the requirements for relevant area (where simulated navigation is planned for). (See STCW paragraph 72 of section B-I/12 and section 5 of this standard.)	X	X		
1.1.11	Communication equipment including at least one VHF (very high frequency) radio with DSC features.			X	X
1.1.12	The simulator shall include a communications system that will allow for internal ship communications to be conducted.	X	X		
1.1.13	ECDIS (electronic chart display and information system) displaying selected information from an electronic navigational chart (ENC) with positional information from navigation sensors like AIS and radar to assist the mariner in route planning and route monitoring, and by displaying additional navigation-related information. (See STCW paragraph 35 of section B-I/12.)	X	X	X	X
1.1.14	GPS (global positioning system), echo-sounder and speed log showing speed through the water (1axis) for ships below 50 000 GRT and in addition speed and distance over ground in forward and athwart ship direction for ships above 50 000 GRT.	X	X	X	X
1.1.15	Instrument for indication of relative wind- direction and force.	X	X	X	X
1.1.16	Sound panel according to the rules of the road.	X	X	X	X
1.1.17	Instrument for indication of navigational lights.	X	X		
1.1.18	Function for transmitting visual signals (morse lamp).	X	X		
1.1.19	Control system for fire detection, fire alarm and lifeboat alarm.	X	X		
1.1.20	AIS (automatic identification system).	X	X		
1.1.21	Ship borne meteorological instrument.	X			
1.2 Additional requirements for simulators intended for training in ice navigation (see STCW Section A Table A-V/4-1 and B-V/g Guidance regarding training of masters and officers for ships operating in polar waters)					
1.2.1	Two speed and distance measuring devices. Each device should operate on a different principle, and at least one device should be capable of being operated in both the sea and the ground stabilized mode.	X	X		
1.2.2	Searchlight controllable from conning positions.	X	X		
1.2.3	Manually operated flashing red light visible from astern to indicate when the ship is stopped.	X	X		
1.2.4	VDR (voyage data recorder) or capability for vessel history track and learner actions log from the instructor and the assessor position.	X	X		
1.2.5	Equipment capable of receiving ice, icing warnings, and weather information charts.	X	X		
1.2.6	Anchoring and towing arrangements.	X	X		
1.3 Additional requirements for simulators intended for training on integrated bridge systems including integrated navigation					



<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
1.3.1	<p>Workstation for navigating and manoeuvring consisting of:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— radar/radar plotting</li> <li>— ECDIS</li> <li>— automatic visual position indicator</li> <li>— information of position fixing systems</li> <li>— information of automatic ship identification system (AIS)</li> <li>— (adjustment) heading/track control system</li> <li>— controls for main engine(s) incl. crash manoeuvres, emergency stop</li> <li>— controls for main rudder (incl. override facility)</li> <li>— controls for thruster</li> <li>— indications for: <ul style="list-style-type: none"> <li>— for propeller revolutions (actual and desired)</li> <li>— main engine revolution in the case of reduction geared engine</li> <li>— propeller pitch in the case of controllable pitch propeller</li> <li>— torque</li> <li>— starting air</li> </ul> </li> <li>— lateral thrust</li> <li>— speed (possibly longitudinal and lateral)</li> <li>— rudder angle</li> <li>— rate-of-turn</li> <li>— gyro compass heading</li> <li>— magnetic compass heading</li> <li>— heading reminder (pre-set heading)</li> <li>— water depth incl. depth warning adjustment</li> <li>— time</li> <li>— wind direction and velocity</li> <li>— air and water temperature <sup>1)</sup></li> <li>— group alarms (with aids for decision-making).</li> <li>— signal transmitter for: <ul style="list-style-type: none"> <li>— whistle</li> <li>— automatic device for fog signals</li> <li>— general alarm</li> <li>— Morse signalling light.</li> </ul> </li> </ul>	X	X	X	

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
1.3.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>— automatic device for emergency alarm</li> <li>— controls for console lighting</li> <li>— two-way VHF radiotelephone (walkie-talkie) with charging connection and/or paging system</li> <li>— internal communication equipment</li> <li>— public address system</li> <li>— VHF point with channel selector</li> <li>— remote control for search light</li> <li>— rudder pump selector switch</li> <li>— steering mode selector switch</li> <li>— steering position selector switch</li> <li>— illumination of equipment and displays in surrounding darkness</li> <li>— sound reception system</li> <li>— acknowledgement of watch alarm.</li> </ul>	X	X	X	
	<sup>1)</sup> Located at the workstation for navigating and manoeuvring or at the workstation for planning and documentation.				
1.3.2	Workstation for monitoring consisting of: <ul style="list-style-type: none"> <li>— radar / radar plotting</li> <li>— signal transmitter for whistle</li> <li>— acknowledgement of watch alarm</li> <li>— indications for:               <ul style="list-style-type: none"> <li>— propeller revolutions</li> <li>— pitch of controllable pitch propeller</li> <li>— speed</li> <li>— rudder angle</li> <li>— gyro compass heading</li> <li>— time</li> <li>— rate-of-turn</li> <li>— water depth</li> <li>— alarms.</li> </ul> </li> <li>— internal communication equipment</li> <li>— VHF point with channel selector.</li> </ul>	X	X	X	
1.3.3	Workstation for manual steering (helmsman's) consisting of: <ul style="list-style-type: none"> <li>— steering wheel / steering lever</li> <li>— rudder pump selector switch</li> <li>— indications for:               <ul style="list-style-type: none"> <li>— gyro compass heading</li> <li>— magnetic compass heading</li> <li>— pre-set heading</li> <li>— rudder angle</li> <li>— rate of turn.</li> </ul> </li> <li>— talkback to bridge wing workstation.</li> </ul>	X	X	X	

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
1.3.4	<p>Workstation for docking (bridge wing) consisting of:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— controls for main engine(s)</li> <li>— controls for thruster</li> <li>— controls for rudder</li> <li>— controls for whistle</li> <li>— steering position selector switch</li> <li>— indications for: <ul style="list-style-type: none"> <li>— gyro compass heading</li> <li>— propeller revolutions</li> <li>— main engine revolution in the case of reduction geared engine</li> <li>— propeller pitch in the case of controllable pitch propeller</li> <li>— lateral thrust</li> <li>— rate-of-turn</li> <li>— rudder angle</li> <li>— longitudinal and lateral movement of ship</li> <li>— wind direction and velocity.</li> </ul> </li> <li>— system for external communication with tugs, pilot boat (VHF point)</li> <li>— controls for Morse lamp and searchlight</li> <li>— acknowledgement of watch alarm.</li> </ul>	X	X	X	
1.3.5	<p>Workstation for planning and documentation consisting of:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— ECDIS including navigation planning station</li> <li>— route planning devices</li> <li>— chart table</li> <li>— position fixing receiver</li> <li>— retaining device for drawing triangles, dividers, magnifying lens, pencils, etc.</li> <li>— weather chart plotter</li> <li>— main clock</li> <li>— chronometer with receiving facility for time signals</li> <li>— radio direction finder</li> <li>— log, incl. distance indicator, course plotter</li> <li>— echo graph</li> <li>— barograph</li> <li>— indication for air and water temperatures</li> <li>— command printer</li> <li>— VHF point.</li> </ul>	X	X	X	

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
1.3.6	Workstation for safety as appropriate for ship type consisting of: <ul style="list-style-type: none"> <li>— fire alarm for areas machinery, superstructure/ accommodations, cargo</li> <li>— remote control and monitoring of fire-extinguishing system</li> <li>— remote control and monitoring of watertight doors/fire doors (open/closed)</li> <li>— emergency stop for air condition, ventilation and refrigerating installations</li> <li>— controls for anti-rolling device</li> <li>— indicator for bilge monitor</li> <li>— indicator for strength load incl. alarm</li> <li>— indicator for further safety systems</li> <li>— clinometer</li> <li>— keys and control-elements for lights and signals (navigation lights, signal lamps, bridge lighting, deck lighting searchlights, as well as all fuses)</li> <li>— internal communication system, in particular to muster stations</li> <li>— adjustment of watch alarm system and acknowledgement button</li> <li>— status indication for bow-, rear-flap</li> <li>— controls/indications for ballast water handling</li> <li>— tools for documentation</li> <li>— main station for two-way VHF radiotelephone (walkie-talkie).</li> </ul>	X	X	X	
1.3.7	Workstation for communications consisting of: <ul style="list-style-type: none"> <li>— GMDSS equipment as required for the applicable sea area:               <ul style="list-style-type: none"> <li>— VHF capable of transmitting and receiving, for distress, urgency, safety and general communication included DSC and radiotelephony.</li> <li>— Radar search and rescue transponder (SART) or AIS-SART</li> <li>— Receiver capable of receiving MSI and SAR related information.</li> <li>— At least one recognized mobile satellite service ship earth station.</li> <li>— MF/HF capable of transmitting and receiving, for distress, urgency, safety and general communication included DSC and radiotelephony.</li> <li>— EPIRB.</li> <li>— Two-way handheld VHF radiotelephone apparatus.</li> </ul> </li> </ul>	X	X	X	
1.3.8	All systems related to the integrated bridge system shall include failure control(s) and method(s) to train and assess the learner in the use of advanced equipment, technology and enable familiarization and training to understand the limitations of automatic systems.	X	X	X	
1.4 Additional requirements for simulators intended for training in anchor handling operations (see STCW Section B-V/e, Offshore supply vessels performing anchor-handling operations)					
1.4.1	Engine telegraph with pitch control for two (2) propellers located at forward bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X			

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
1.4.2	Thruster control for bow and stern thrusters located at forward bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X			
1.4.3	Thruster control for azimuth propeller located at forward bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X			
1.4.4	Control for two (2) rudders (synchronic and independent) located at forward bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X			
1.4.5	Engine telegraph with pitch control for two (2) propellers located at aft bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X	X		
1.4.6	Thruster control for bow and stern thrusters located at aft bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X	X		
1.4.7	Thruster control for azimuth propeller located at aft bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X	X		
1.4.8	Control for two (2) rudders (synchronic and independent) located at aft bridge as appropriate to the simulated vessel(s).	X	X		
1.4.9	A joystick giving possibility to control manoeuvring equipment as selected located at aft bridge.	X	X		
1.4.10	Winch control panel located at aft bridge that will display line tension, payout, and speed.	X	X		
1.4.11	Winch computer located at aft bridge.	X	X		
1.4.12	Clutch panel located at aft bridge.	X	X		
1.4.13	Control handles for winches enabling, haul in, pay out, and control of spooling gear located at aft bridge.	X	X		
1.4.14	Two monitors where the winch operator chooses between a selection of cameras showing the different winches to give a full coverage of the winch.	X	X		
1) Class S requirements will be dependent upon the type of simulated equipment and/or scenario, and the defined competence requirements.					

**Table 3-4 Behavioural realism**

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
2.1.1	The simulation of own ship shall be based on a mathematical model with 6 degrees of freedom.	X	X	X	X
2.1.2	The model shall realistically simulate own ship hydrodynamics in open water conditions, including the effects of wind forces, wave forces, tidal stream and currents.	X	X	X	X
2.1.3	The model shall realistically simulate own ship hydrodynamics in restricted waterways, including shallow water and bank effects, interaction with other ships and direct, counter and sheer currents.	X			

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
2.1.4	The simulator shall include mathematical models of at least the types of own ship relevant to the training objectives.	X	X		
2.1.5	The simulator shall include at least one tug model that can realistically simulate tug assistance during manoeuvring and escort operations by any method. It shall be possible to simulate pull, push, reposition towing and escorting.	X	X		
2.1.6	The tug model shall be affected by own ship's speed and as such include degrading performance depending on the type of tug simulated. It should be possible to operate with both conventional and tractor tugs having different characteristics and response times.	X			
2.1.7	The simulator shall include exercise areas including correct data for landmass, depth, buoys tidal streams and visuals as appropriate to the nautical charts and publications used for the relevant training objectives.	X	X		
2.1.8	The simulator shall include exercise areas including correct data for landmass, depth, buoys and tidal streams as appropriate to the nautical charts and publications used for the relevant training objectives.			X	X
2.1.9	The radar simulation equipment shall be capable of model weather, tidal streams, current, shadow sectors, spurious and false echoes and other propagation effects, and generate coastlines, navigational buoys and search and rescue transponders (see STCW Section A-1/12.4.2).	X	X	X	X
2.1.10	The ARPA simulation equipment shall incorporate the facilities for: <ul style="list-style-type: none"> <li>— manual and automatic target acquisition</li> <li>— past track information</li> <li>— use of exclusion areas</li> <li>— vector/graphic time-scale and data display</li> <li>— trial manoeuvres.</li> </ul> See STCW Section A-1/12.5.	X	X	X	X
2.1.11	The ECDIS simulation equipment shall incorporate the facilities for: <ul style="list-style-type: none"> <li>— integration with other navigation systems</li> <li>— own position</li> <li>— sea area display</li> <li>— mode and orientation</li> <li>— chart data displayed</li> <li>— route monitoring</li> <li>— user-created information layers</li> <li>— contacts (when interfaced with AIS and/or radar tracking)</li> <li>— radar overlay functions (when interfaced).</li> </ul>	X	X	X	X
2.1.12	The simulator shall provide an own ship engine sound, reflecting the power output.	X	X		

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
2.1.13	The simulator shall provide capabilities for realistically conduct anchoring operations by any method. The model shall realistically simulate own ship hydrodynamics in interaction with applicable anchor and chain dimensions with different bottom holding grounds, including the effects of wind forces, wave forces, tidal stream and currents.	X			
2.1.14	The simulator shall provide capabilities for realistically simulate the function of mooring and tug lines and how each line functions as part of an overall system taking into account the capacities, safe working loads, and breaking strengths of mooring equipment including mooring wires, synthetic and fibre lines, winches, anchor windlasses, capstans, bitts, chocks and bollards.	X			
2.2 Additional requirements for simulators intended for training in ice navigation (see STCW Section A Table A-V/4-1 and B-V/g. Guidance regarding training of masters and officers for ships operating in polar waters)					
2.2.1	The own ship model shall realistically simulate hydrodynamics in interaction with solid ice edge.	X	X		
2.2.2	The own ship model shall realistically simulate hydrodynamics and ice pressure in interaction with solid and packed ice. Ship motion in solid ice should affect at least ship speed and turning radius.	X	X		
2.2.3	The own ship model shall realistically simulate the effects of reduced stability as a consequence of ice accretion.	X	X		
2.2.4	It shall be possible to simulate the effect of the following ice conditions with variations: — ice type — ice concentration — ice thickness.	X	X		
2.2.5	It shall be possible to realistically simulate the towing of own ship – own ship, and own ship target ship and target own ship. It shall be possible to introduce different towing gear like rope or steel wire with different strength and elasticity, forward, stern and side towing.	X	X		
2.2.6	It shall be possible to realistically simulate the interaction between the ships propeller wash and the ice.	X	X		
2.2.7	It shall be possible to realistically simulate ice drift.	X	X		
2.2.8	The simulator shall be equipped with iceberg targets of at least six different sizes including realistic underwater bodies which interacts with the sea bottom. The icebergs should be visible on the ship's radar.	X	X		
2.2.9	Motion through ice hummocks should be simulated realistically considering ship icebreaking capabilities and affect ship's speed, roll and pitch.	X	X		
2.3 Additional requirements for simulators intended for training on integrated bridge systems including integrated navigation system					

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
2.3.1	The INS should combine process and evaluate data from all sensors in use. The integrity of data from different sensors should be evaluated prior to distribution.	X	X	X	
2.3.2	The INS shall ensure that the different types of information are distributed to the relevant parts of the system, applying a consistent common reference system for all types of information.	X	X	X	
2.3.3	The INS shall provide the information of position, speed, heading and time, each clearly marked with an indication of integrity.	X	X	X	
2.3.4	The INS shall be able to automatically, continually and graphically indicate the ship's position, speed and heading and, where available, depth in relation to the planned route as well as to known and detected hazards.	X	X	X	
2.3.5	The INS shall, in addition, provide means to automatically control heading, track or speed and monitor the performance and status of these controls.	X	X	X	
2.3.6	Alarms shall be displayed so that the alarm reason and the resulting functional restrictions can be easily understood. Indications should be self-explanatory.	X	X	X	
2.4 Additional requirements for simulators intended for training in anchor handling operations (see STCW Section B-V/e, Offshore supply vessels performing anchor-handling operations)					
2.4.1	<p>The simulator shall include mathematical models of at least two types of anchor handling own ships. The own ships should be set up with wire on winches:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— wire length</li> <li>— dimensions and type on three winches</li> <li>— work wire, dead man wire.</li> </ul> <p>Possibility for the instructor to change wire set up during exercise and place objects, anchors and buoys on deck.</p>	X	X		
2.4.2	<p>The simulator shall include mathematical models of at least two semi-submersible oil rigs operated by the instructor. It shall be possible to change:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— crane positions</li> <li>— anchor patterns</li> <li>— anchor selection</li> <li>— crane ready with PCP (permanent chaser pennant)</li> <li>— anchors racked in bolster/anchor on sea bed</li> <li>— anchors to be laid by position latitude, longitude, or by instructor</li> <li>— rig to be set up with winches, each winch having a chain and an anchor</li> <li>— possibility to insert a wire in the system as to make the system consist of the anchor, connecting link and chain.</li> </ul>	X	X		
2.4.3	The simulator shall include mathematical models of at least two tugs/ assisting vessels) that can be connected in the anchor systems and/or at the towing bridle operated by the instructor.	X	X		



Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
2.4.4	The forces from the environment (wind, current and waves) and forces acting on the anchor handling wire shall act on the own ship.	X	X		
2.4.5	When breaking load is reached on a wire, the wire should break and be slack on deck and have no effect on the vessels model.	X	X		
2.4.6	When the handles of the winch is operated the winch shall respond in a realistic way. It has to run with the speed corresponding to the handle settings, the load on the winch and brake settings.	X	X		
2.4.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>— All values needed by the winch information system shall be calculated.</li> <li>— The effect of band brakes, disc brakes and water brakes to be calculated.</li> <li>— Holding power reduced due to increased diameter shall be included in the calculations.</li> </ul>	X	X		
2.4.8	The own ship control by instructor shall include control of winch operation, shark jaws, tuggers, towing pins/guide pins and capstans.	X	X		
2.4.9	Forces from the wires/chains that are acting on the shark jaws, guide pins or stop pins shall have effect on vessel movement.	X	X		
Class S requirements will be dependent upon the type of simulated equipment and/or scenario, and the defined competence requirements.					

**Table 3-5 Operating environment**

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
Targets					
3.1.1	The simulator shall be able to present different types of target ships, each equipped with a mathematical model, which accounts for motion, drift and steering angles according to forces induced by current, wind or wave.	X	X	X	X
3.1.2	The targets shall be equipped with navigational and signal - lights, shapes and sound signals, according to rules of the road. The signals shall be individually controlled by the instructor, and the sound signals shall be directional and fade with range. Each ship shall have an aspect recognisable at a distance of 6 nautical miles in clear weather. A ship under way shall provide relevant bow- and stern wave.	X	X		

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
3.1.11	The visual system shall present the outside world by a view of at least 120 degrees horizontal field of view. In addition, at least the horizon from 120 degrees port to 120 degrees starboard shall be able to be visualised by any method.		X		
3.1.12	The visual system shall present all navigational marks according to charts used and possibility to introduce faults.	X	X		
3.1.13	The visual system shall show objects with sufficient realism (detailed enough to be recognized as in real life).	X	X		
3.1.14	The visual system shall show mooring and towing lines with sufficient realism in accordance with the forces effecting the tension.	X			
3.1.15	The visual system shall provide a realistic set of bow wave, sea spray and wakes in accordance with ships power output, speed and weather conditions.	X	X		
3.1.16	The visual system shall provide a realistic set of flue gas emission and waving flag effect in accordance with ships power output, speed and weather conditions.	X			
Outside sound					
3.1.17	The simulator shall be capable of providing environmental sound according to conditions simulated.	X			
Navigated waters					
3.1.18	The navigated waters shall include a current pattern, changeable in time, according to the charts used. Tidal waters shall be reflected.	X	X	X	X
3.1.19	The simulation shall include the depth according to charts used, reflecting water level according to tidal water situation.	X	X	X	X
3.1.20	The simulator shall provide at least two different wave spectra, variable in direction height and period.	X	X		
3.1.21	The visual system shall provide a realistic set of wind waves including white caps according to the Beaufort wind force scale.	X	X		
3.2 Additional requirements for simulators intended for training in ice navigation (see STCW Section A Table A-V/4-1 and B-V/g. Guidance regarding training of masters and officers for ships operating in polar waters)					
3.2.1	The visual system shall be capable of showing concentrations of solid and broken ice of different thickness.	X	X		
3.2.2	The visual system shall be capable of showing the result of icebreaking including opening, twin breaking and compacting channel.	X	X		
3.2.3	The visual system shall be capable of showing the effects of searchlight.	X	X		
3.2.4	The visual system shall be capable of showing the effects of the ice accretion to the own ship model.	X	X		
3.3 Additional requirements for simulators intended for training on integrated bridge systems including integrated navigation system					

Item	Requirement	Class A (NAV)	Class B (NAV)	Class C (NAV)	Class D (NAV)
3.3.1	The view of the sea surface from the navigating and manoeuvring workstation should not be obscured by more than two ship lengths or 500 m, whichever is less, forward of the bow to 10° on either side under all conditions of draught, trim and deck cargo.	X	X		
3.3.2	There should be a field of view around the vessel of 360° obtained by an observer moving within the confines of the wheelhouse or may be panned (to move the camera).	X	X		
3.3.3	The horizontal field of view from the navigating and manoeuvring workstation should extend over an arc of not less than 225°, that is from right ahead to not less than 22.5°, abaft the beam on either side of the ship.	X	X		
3.3.4	From the monitoring workstation, the field of view should extend at least over an arc from 90° on the port bow, through forward, to 22.5° abaft the beam on starboard.	X	X		
3.3.5	From each bridge wing the horizontal field of view should extend over an arc at least 225°, that is at least 45° on the opposite bow through right ahead and then from right ahead to right astern through 180° on the same side of the ship.	X	X		
3.3.6	From the main steering position (workstation for manual steering) the horizontal field of view should extend over an arc from right ahead to at least 60° on each side of the ship.	X	X		
3.4 Additional requirements for simulators intended for training in anchor handling operations (see STCW Section B-V/e, Offshore supply vessels performing anchor-handling operations)					
3.4.1	The anchors shall be movable on deck by use of tugger and capstan winches. Anchors to be connected/disconnect to chain, or wires on deck.	X	X		
3.4.2	Anchors of types commonly used should be available. At least 2 different types should be available. This could be: — drag embedment anchors — high efficiency drag embedment anchors — vertical load anchors — suction anchors — torpedo type anchors.	X	X		
3.4.3	Shackles/connections commonly used should be available. This could be: — shackle — pear link — kenter link — detachable link — swivel.	X	X		
3.4.4	The shark jaws, the wire lifter, guide pins and stop pins shall be visible and show the movement when operated. When raised the shark jaws, the wire lifter, guide pins and stop pins shall affect the wire.	X	X		

<i>Item</i>	<i>Requirement</i>	<i>Class A (NAV)</i>	<i>Class B (NAV)</i>	<i>Class C (NAV)</i>	<i>Class D (NAV)</i>
3.4.5	Wire and chain shall bend around objects such as wire guides.	X	X		
3.4.6	When the vessel is chasing an anchor the wire or chain shall jump as the wire passes over chain links.	X	X		
3.4.7	Slack wire and chain shall be shown as slack. Any tension should make the wire lift from the deck, indicating a catenary curve.	X	X		
3.4.8	When breaking load is reached on a wire or chain, they should break and be slack on deck.	X	X		
3.4.9	Capstan winches shall be situated on aft deck, one on the port and one on the starboard side. On the capstan a wire should be used as dead man wire.	X	X		
3.4.10	Tugger winches shall be situated forward on deck, one port and one starboard side. On the 'tugger' a wire should be used as dead man wire.	X	X		
3.4.11	It shall be possible to command and view the deck crew to prepare the capstan /tugger wire. This action can be controlled by the instructor.  The capstan and tugger wires should have the possibility to be connected to all main winches and gipsy wheels and also to be laid ready on deck on predefined positions.	X	X		
3.4.12	It shall be possible for the instructor to control the anchor handling winch of the helper station vessel (target or own ship) including the ability to adjust speed on winch, pay out and haul in.	X	X		
Class S requirements will be dependent upon the type of simulated equipment and/or scenario, and the defined competence requirements.					

## Annexe 4 : Tableur de détermination des forces d'un rotor flettner

1	Rotor sails - E-Ship 1									
2										
3										
4	Ship data				Rotor data					
5	LOA	Length over all	130	m	D <sub>RS</sub> (diamètre du rotor fletner)	6	m			
6	LPP	length Between perpendicular	123,5	m	De (diamètre end plate)	8	m			
7	B	beam	22,5	m	H <sub>RS</sub> (hauteur du rotor fletner)	27	m			
8	T	Design Draft	7,5	m	Max RPM	350	rpm			
9	D	Depth	11,1	m						
10	DWT	Dead weight	10 500	dwt	Masse volumique air	1,29	kg/m3			
11	MCR		6300 kW	kW	U <sub>RS</sub> (vitesse de rotation en bout de rotor)	109,96	m/s	U <sub>rs</sub> /AWS	26,431669	Sans unité
12	Vship	Vitesse du navire	8,75	m/s	CD (coefficient de trainée)	0,8	/	Area (surface projetée)	162	m²
13										
14					Vitesse aparente du vent	AWS	4,16	m/s		
15					Angle du vent apparent	AWA	90	(°)		
16										
17	Calcule de CL, FL, FD, FT, P <sub>Rotor</sub>									
18										
19	$F_T = F_L \times \sin(AWA) - F_D \times \cos(AWA)$				CL	2 x π x (U / V)		5		
20					FL = Lift	1/2 x pair x AWS² x Area x CL		9,041311	kN	
21										
22	$P_{Rotor} = \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times \pi \times S \times U^3 \times CF$				FD = Drag	1/2 x pair x AWS² x Area x CD		1,44661	kN	
23										
24					FT = Thrust	FL x sin(AWA) - FD x cos(AWA)		8,731089	kN	
25					P <sub>Rotor</sub> =	FT x Vship		76,39703	kW	
26										
27										
28										
29										