HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

ETUDE AERODYNAMIQUE APPLIQUEE AUX PORTE-CONTENEURS

Mathis Rangée

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

Promoteur: Rafaël Maes

année académique: 2021 - 2021

Avant Propos

C’est avec beaucoup de joie que je partage avec vous ce mémoire dont le sujet est « L’aérodynamisme des porte-conteneurs ».

Aboutissement de trois années d’études à l’Ecole Supérieure de Navigation d’Anvers, j’ai eu l’opportunité à travers ce mémoire d’appliquer des connaissances assimilées au cours de ma formation. De la conception 3D à la réalisation d’instruments de mesure, chaque étape a été un veritable challenge, aussi bien sur le plan théorique que pratique: près d’un an de travail et de remise en question ont été nécessaire à la réalisation de ce document.

Avant de vous inviter à le lire, je tiens à remercier toutes les personnes qui m’ont aidé et soutenu dans la réalisation de ce projet:

Pierre Landoeuer, le créateur de la première version soufflerie en 2019. Afin de réaliser les tests suivant, nous avons optimisé cet outil formidable afin qu’il puisse être utilisé par les futures générations d’étudiants;

Monsieur Raf Maes, promoteur du projet, et Monsieur Peter Bueken pour leur réactivité et leur enthousiasme;

Merci à mes collègues, et notamment à Clément Pile qui a activement contribué à la construction de la soufflerie; sans sa participation, le relevé des mesures aurait pris beaucoup plus de temps.

Merci à ma famille et à Souen Lê Vân.

Et bien évidemment, toute l’équipe pédagogique qui m’a accompagné au cours de ces trois années passées à l’Ecole Supérieur de Navigation d’Anvers.

Résumé

Soucieux de participer à la réflexion sur les enjeux économiques et écologiques de demain, cette étude porte sur l'aérodynamisme des porte-conteneurs. En effet, sur des navires qui consomment jusqu'à 200 tonnes de HFO par jour en éco speed, chaque pourcentage de carburant économisé a son importance.

Pour mener à bien cette étude, nous allons tout d'abord créer plusieurs modèles de porte-conteneurs modifiés en 3D grâce au logiciel Inventor. Par la suite, nous analyserons leurs comportements aérodynamiques dans une soufflerie virtuelle réalisée à l'aide du logiciel Autodesk CFD.

Afin de mettre à l'épreuve les résultats obtenus en simulation virtuelle, les modèles les plus prometteurs seront imprimés en 3D puis seront étudiés en soufflerie réelle. Cela nous permettra d'avoir une idée quantitative du gain d'énergie.

Pour finir, à l'issue de ces tests, nous analyserons la faisabilité et la rentabilité de telles modifications sur des unités neuves ou existantes.

Abstract

Mindful to participate in the reflection on the economic and ecological challenges of tomorrow, this study focuses on the aerodynamics of container ships. Indeed, on ships that consume up to 200 tons of HFO per day in eco speed, each percentage of fuel saved is important.

To complete this study, we will first create several container ship models modified in 3D using Inventor software. Next, we will analyze their aerodynamic behavior in a virtual wind tunnel created using Autodesk CFD software.

In order to test the results obtained during the virtual simulation, the most promising models will be 3D printed and then studied in a real wind tunnel. This will allow us to have a quantitative idea of the energy gain.

Finally, at the end of these tests, we will analyze the feasibility and profitability of such modifications on new or existing units.

TABLE DES MATIERES

Avant Propos ..... **i**

Résumé ..... **iii**

Abstract ..... **v**

Liste des Tableaux ..... **xiv**

Liste des Abréviations ..... **xvi**

Liste des Symboles ..... **xviii**

1. Introduction **1**

Chapitre 2 ..... **3**

2. L'aérodynamisme **3**

2.1. Histoire et Etudes 3

2.2. Principes de base 9

2.3. Application maritime 11

3. Question de Recherche – L'optimisation aérodynamique peut-elle diminuer la consommation d'un porte-conteneurs ? **14**

4. Logiciels et Conception **16**

4.1. Virtuel 16

4.1.1. Trainée de Pression 19

4.1.2. Trainée de Frottement 23

4.1.3. Trainée de forme 25

5. Résultats Virtuels **27**

5.1. Porte-Conteneurs de Base 27

5.2. Trainée de Pression 30

5.3. Trainée de Frottement 33

5.4. Trainée de Forme 35

6. Soufflerie **38**

7. Mesures en Soufflerie **47**

8. Résultats en Soufflerie 52

9. Calculs 55

10. Conclusion 56

Bibliographie 58

Liste des Figures

Figure 1: Appareil à chute Eiffel, 1909 4
Figure 2: Dirigeable 1900 4
Figure 3: Soufflerie Eiffel 5
Figure 4: Peugeot L45, 1912 6
Figure 5: Bleriot XI, 1913 6
Figure 6: Albatros D Va, 1918 7
Figure 7: Bugatti Type 57SC, 1934 7
Figure 8: Hugo Boss 7, 2019 8
Figure 9: Camion en Soufflerie 8
Figure 10: Exemple Cx 10
Figure 11: Cx 10
Figure 12: Porte-Conteneurs Inauguration 11
Figure 13: Porte-Conteneurs Chargement Réel 12
Figure 14: Plan Porte-Conteneurs 16
Figure 15: Porte-Conteneur de base 17
Figure 16: Porte-conteneurs de Base, chargement idéal 18
Figure 17 : Porte-conteneurs de base, chargement idéal, side view 18
Figure 18: Déflecteur de Proue 19
Figure 19: Porte-conteneurs avec Déflecteur 20
Figure 20: Bourbon Orca 21
Figure 21: Porte-conteneurs château avant 22
Figure 22: Porte-conteneurs château avant, vue de coté 22
Figure 23 : Porte-conteneurs Side Gards 24
Figure 24 : Porte-conteneurs Fermé 24
Figure 25: MSC Gulsun 25
Figure 26 : Poupe modèle 3D 26
Figure 27: Chargement Optimisé 26
Figure 28: Porte-Conteneurs de Base 27
Figure 29: Porte-Conteneurs de Base Chargement Réel 28
Figure 30: Porte-Conteneurs de Base, Vue Latérale 29

Figure 31: Porte-conteneur de base, chargement idéal, top view 29
Figure 32: Vue latéral porte-conteneur chargement non idéal, side view 29
Figure 33: Vue du dessus porte-conteneur chargement non idéal, top view 29
Figure 34 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs de Base 30
Figure 35 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Déflecteur 30
Figure 36 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Château Avant 31
Figure 37 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs de Base 31
Figure 38 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Déflecteur 32
Figure 39 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Château Avant 32
Figure 40 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs de Base 33
Figure 41 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Déflecteur 33
Figure 42 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Château Avant 34
Figure 43 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Château Avant et Side Gards 34
Figure 44: Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs, Vue de Coté 35
Figure 45 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs, Vue de dessus 35
Figure 46 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes, Vue de Coté 36
Figure 47 : Test Trainée de de Forme Porte-Conteneurs avec Formes, Vue de dessus 36
Figure 48 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes et Chargement Optimisé , Vue de Coté 37
Figure 49 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes et Chargement Optimisé, Vue de dessus 37
Figure 50 : Soufflerie Début de Projet 38
Figure 51 : Soufflerie Eiffel Paris 39
Figure 52 : Modélisation Soufflerie de Base 3D 40
Figure 53 : Modélisation Soufflerie avec Grille 3D 40
Figure 54 : Tests CFD Soufflerie de Base 41
Figure 55 : Testes CFD Soufflerie avec Grille 41
Figure 56 : Tests CFD Soufflerie de Base 42
Figure 57 : Tests CFD Soufflerie avec Grille 42
Figure 58 : Nouveau Module Centrale 43
Figure 59 : Ancien Boitier de Commande 43
Figure 60 : Nouveau Circuit de Commande 44

Figure 61 : Nouveau Panneau de Commande 45
Figure 62 : Relais Panneau de Commande 45
Figure 63 : Soufflerie Terminée 46
Figure 64 : Maquette Soufflerie 47
Figure 65 : Phidget Bridge 48
Figure 66 : Load Cell 48
Figure 67 : Capteur en Soufflerie 49
Figure 68 : Graph Test Load Cell 50
Figure 69 : Tableau de Mesure 50
Figure 70 : Micro Manomètre 51
Figure 71 : Mesures Trainée de Pression 51

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Mesures Résistance 20 Km/h 52
Tableau 2 : Mesures Résistance 30 Km/h 53
Tableau 3 : Mesures Résistance 60 Km/h 53
Tableau 4 : Mesures Trainée de Pression 54

Liste des Abréviations

HFO : Heavy Fuel Oil

CFD : Computation Fluid Dynamics

TEU : Twenty-foot Equivalent Unit

Liste des Symboles

Chapitre 1

1. Introduction

Ce mémoire a pour but de traiter l'aérodynamisme appliqué aux porte-conteneurs. Habitant au Havre depuis ma naissance j'ai pu observer toute ma vie le ballet incessant des porte-conteneurs, entrant et sortant du chenal. J'ai été forcé de constater qu'aucun de ces navires ne ressemble à un autre bien que leur conception soit très similaire. Bien souvent les plans de chargement sont arrangés de manière à optimiser les mouvements des conteneurs au gré des escales pour ne pas perdre de précieuses et couteuses heures à quai. En conséquence l'aérodynamisme n'est pas pris en compte, ce qui peut parfois donner lieu à des créations pour le moins originales.

Les articles d'Andersson (1978) et Van Berlekom (1981) discutent du problème de l'aérodynamisme appliqué aux navires, cependant, la taille des unités a beaucoup évolué depuis. Les études qui parlent de ce sujet restent rares à ce jour et en 50 ans aucune grande innovation n'a été faite. Pourtant dans certains secteurs comme l'automobile ou le transport routier, des évolutions majeures ont eu lieu au cours des dernières décennies afin d'optimiser cet effort et par la même occasion diminuer la consommation de ces véhicules.

Cela s'explique peut-être par le fait qu'aucune étude ne fait référence en matière de chiffres, Blenderman (1995) arrive aux mêmes conclusions qu'Andersson (1978), un chargement anarchique a bel et bien une influence sur la résistance à l'air d'un porte-conteneurs. Cependant pour ce qui est de la proportion de la résistance à l'air par rapport aux forces totales qui s'opposent à un porte-conteneurs, aucune étude ne donne les mêmes chiffres. Selon Van Berlekom (1981), la résistance aux vagues et au vent est de la même ampleur. Cependant, Aage (1968) déclare que la résistance à l'air contribue rarement à plus de 10% de la résistance totale.

J’ai donc voulu au travers de ce mémoire savoir si l’aérodynamisme de ces géants des mers, porte étendard de la standardisation, pouvait lui-même être quantifié, standardisé et optimisé peu importe le plan de chargement.

Ce mémoire s’articulera donc autour de plusieurs points : nous étudierons tout d’abord les principes théoriques de l’aérodynamique, essentiels à la compréhension de ce mémoire. Nous découvrirons dans un second temps comment le plan de chargement d’un navire de type porte-conteneurs influence les forces aérodynamiques.

Par la suite, nous observerons des solutions mises en place afin d’obtenir une diminution des perturbations et des forces aérodynamiques quelque soit le plan de chargement. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel Autodesk Inventor et Autodesk CFD qui nous permettront de modéliser en taille réelle un porte-conteneurs et son chargement dans un environnement virtuel et de visualiser l’écoulement de l’air de plusieurs manières.

Par le biais de l’impression 3D nous aurons l’occasion de visualiser et de comparer les résultats obtenus dans un environnement réel.

Enfin, après analyse et comparaison des résultats de soufflerie et de simulation, nous déterminerons si une économie conséquente de carburant est théoriquement possible.

Chapitre 2

2. L’aérodynamisme

Science qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure. (Larousse s. d.)

2.1. Histoire et Etudes

Bien que les architectes aient eu depuis des siècles connaissance du principe d’aérodynamisme, ce n’est pas avant le début du XXème siècle que les lois et principes encore utilisés aujourd’hui furent posés.

C’est à cette époque que naissent les premiers prototypes d’objets volants plus lourds que l’air, c’est-à-dire les futurs avions.

Le premier vol d’un « avion » a lieu le 9 octobre 1890 en France. C’est le prototype Eole de l’inventeur Clément Ader qui réalise ce premier exploit, ses ailes sont inspirées de celles de la chauve-souris.

A l’époque on ne s’en rend pas encore compte mais par ce biomimétisme on vient de créer l’une des premières étude aérodynamique. Au début du 2Oème siècle, on ne sait encore presque rien de l’aérodynamique lorsque Gustave Eiffel créateur de la tour du même nom, entreprend ses premiers essais expérimentaux sur la résistance de l’air en 1903.

Il installe au deuxième étage de sa tour un appareil permettant une chute de 115 mètres. Ces premières expériences lui permettent d’établir les principes fondamentaux de l’aérodynamique.

Figure 1: Appareil à chute Eiffel, 1909

Source : Eiffel (2020)

A la surprise générale les études révèlent que la forme qui permet de réduire le plus la trainée est la forme de « goutte d’eau ». Jusqu’ici la forme que l’on utilisait, car considérée comme la plus aérodynamique, était la forme inverse. Pour illustrer ce propos, observez la Figure 2 représentant un des premiers ballons dirigeables. L’avant est pointu, l’arrière est rond. Si vous comparez cette photo avec celle d’un dirigeable moderne, vous constaterez que c’est l’inverse.

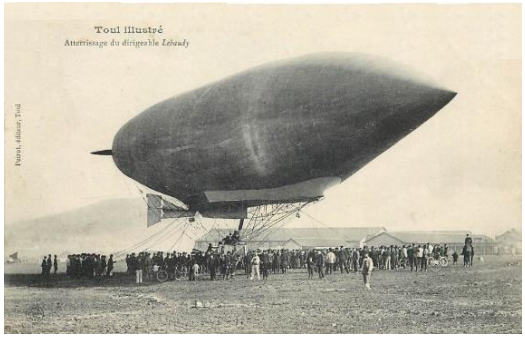

Figure 2: Dirigeable 1900

Source : Catawiki (2018)

A la suite d'une première publication en 1909, Gustave Eiffel conçoit l'une des premières soufflerie au monde. La première de type Eiffel. Il la construira au pied de sa tour, transformée en laboratoire scientifique afin de la sauver de la démolition. Plusieurs modèles d'aéroplanes y seront testés mais aussi des voitures.

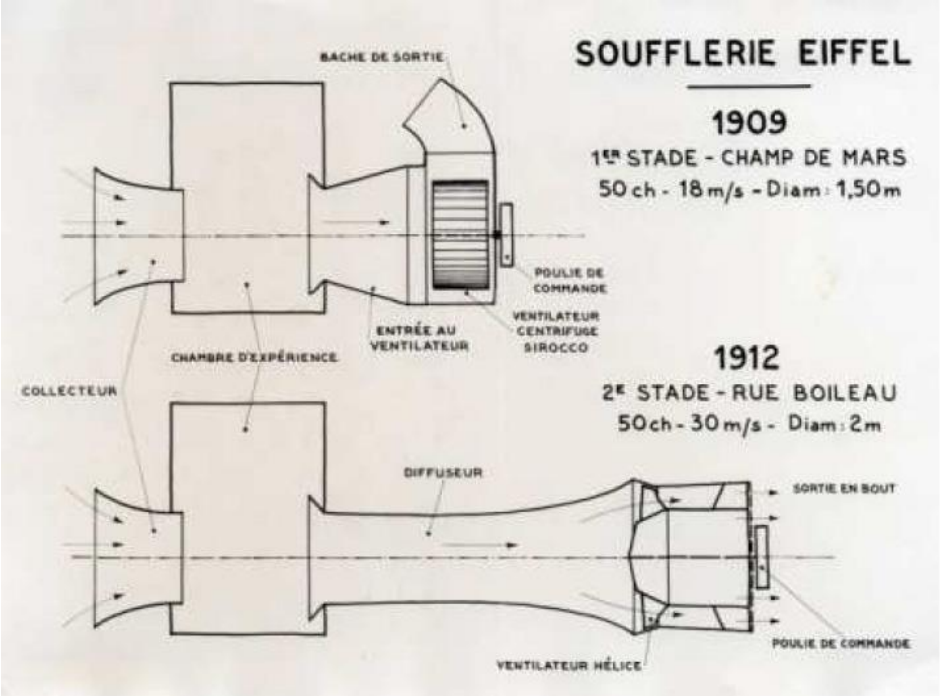

Figure 3: Soufflerie Eiffel

Source : aerodynamiqueeiffel.fr (2020)

En effet dans les années 1910 avec le développement de la technologie et l'arrivée des premières voitures de course, les constructeurs automobiles commencent à s'intéresser à l'aérodynamisme de leurs véhicules. L'une des premières voitures à bénéficier d'une étude aérodynamique de conception est la Peugeot L45, dont on peut remarquer la forme de goutte d'eau.

Figure 4: Peugeot L45, 1912

Source : Bonhams (2017)

Comme c'est malheureusement le cas, les guerres apportent de nombreuses évolutions techniques. Avec la première guerre mondiale, l'usage des avions au combat se développe. De plus en plus l'aérodynamisme est pris en compte dans la conception aéronautique.

Figure 5: Bleriot XI, 1913

Source: Collection Sandrine Sénéchal (1913)

On peut constater en comparant les Figures 5 et 6 que la forme carrée est totalement abandonnée au profit de la forme de goutte d'eau. En seulement quatre années de conflit une amélioration fulgurante est faite tant au niveau des matériaux utilisés qu'au niveau de l'aérodynamisme.

Figure 6: Albatros D Va, 1918

Source: Collection David J. Gautier (1918)

Dans l’entre-deux-guerres les progrès réalisés en aéronautique sont appliqués une fois de plus au milieu automobile. La forme de goutte d’eau est proéminente. Elle permet d’améliorer les performances des véhicules, comme mentionné plus tôt en réduisant la trainée.

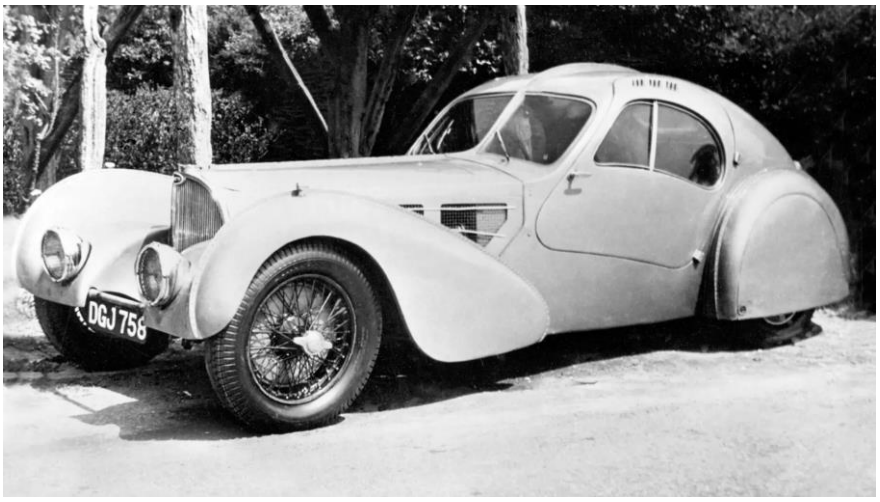

Figure 7: Bugatti Type 57SC, 1934

Source : Bugatti (2020)

Plus récemment, dans le milieu nautique, les voiliers de courses font l’objet d’une attention particulière. Vous trouverez en Figure 8 l’exemple de l’IMOCA Hugo Boss, précurseur d’une nouvelle architecture avec cockpit couvert, intégré dans la coque. Notez ici encore la forme goutte d’eau de l’ensemble coque et cockpit.

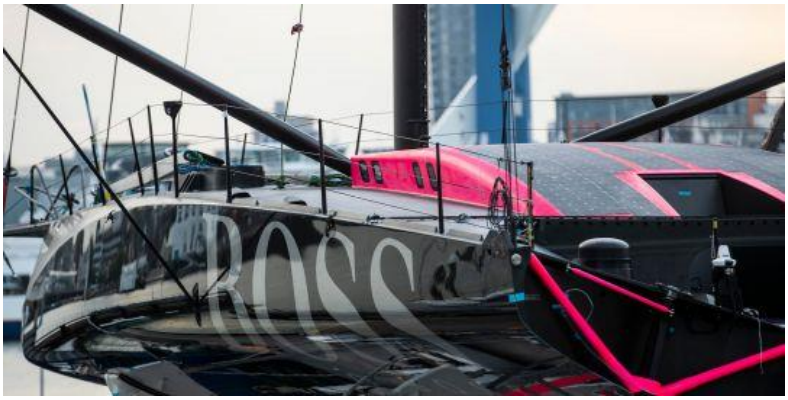

Figure 8: Hugo Boss 7, 2019

Source: Imoca.org (2019)

Le cas se rapprochant le plus de notre sujet reste encore celui des camions. Bien qu'un camion s'apparente à un cube, forme qui est loin d'être la plus aérodynamique, il bénéficie d'études en soufflerie. En effet, si on regarde bien, les écoulements sont dirigés par des déflecteurs semblables à ceux utilisés en formule 1.

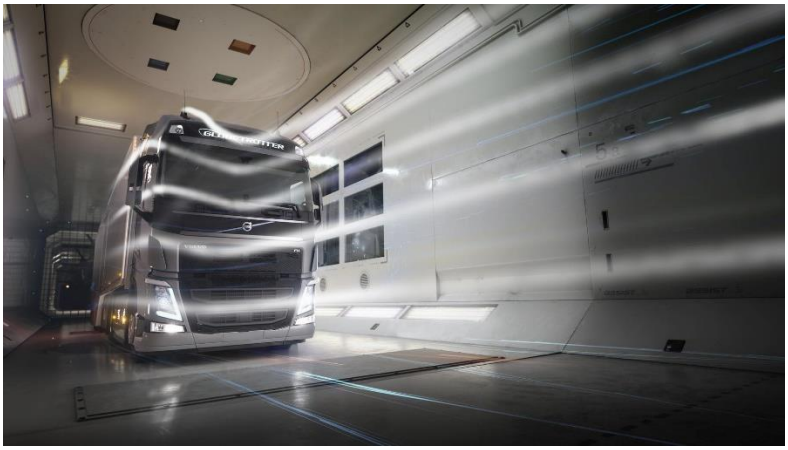

Figure 9: Camion en Soufflerie

Source : Volvotrucks.eu (2016)

Lorsque de telles technologies sont appliquées à un véhicule aussi bien similaire de par son domaine d'exploitation, à savoir le transport de marchandises, que par sa forme géométrique dominante, à savoir le rectangle, alors n'est-il pas légitime de se poser la question : Pourquoi pas un porte-conteneurs ?

2.2. Principes de base

Résumons donc quelques principes de base publiés en 1909 par Mr Eiffel à la suite des expériences effectuées à l’aide de son appareil à chute.

En aérodynamique trois forces principales s’appliquent à un objet :

- La trainée de Pression : elle correspond à l’onde de pression qui se crée à l’avant d’un objet qui se déplace dans un fluide.
- La trainée de Frottement : elle dépend de la rugosité de l’objet étudié, de la vitesse relative entre l’objet et le fluide qui l’entoure ainsi que de la viscosité de ce dernier.
- La trainée de Forme : elle dépend, comme son nom l’indique, de la forme de l’objet. En effet, en fonction des profils les écoulements sont différents, on obtient donc des différences de pressions entre les bords d’attaques et les bords de fuite. Lorsque la pression du bord d’attaque est plus haute que la pression du bord de fuite une force aérodynamique se crée alors, des hautes pressions vers les basses pressions, c'est la trainée de forme.

Ces trois trainées sont regroupées en une seule valeur, le coefficient de trainée Cx (Cd en Anglais). Ainsi, une sphère aura un Cx plus petit qu’une surface plane perpendiculaire à l’écoulement ou encore un cube.

Afin de mieux visualiser ce principe, regardons sur la page suivante la Figure 10 et la Figure 11.

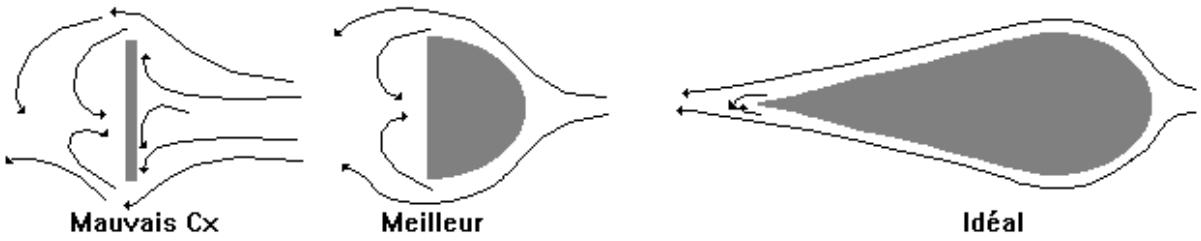

Figure 10: Exemple Cx

Source: Grandvol.com (2020)

On peut retrouver sur la figure suivante quelques exemples de Cx prédéterminés, biens que ceux-ci changent légèrement en fonction des dimensions et de la rugosité des objets.

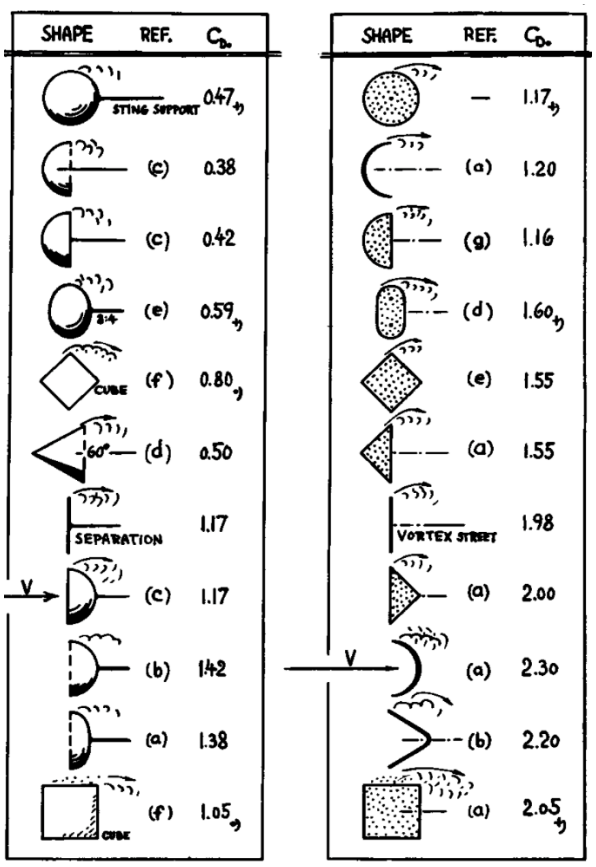

Figure 11: Cx

Source: Physics Satck Exchange (2020)

On note également que plus la surface est rugueuse, plus le Cx augmente.

2.3. Application maritime

Comme nous l'avons précédemment mentionné, la forme créant le moins de trainée est la goutte d'eau, avec un Cx de 0,04. La forme créant le plus de trainée est une paroi perpendiculaire à l'écoulement du flux avec un Cx de 1,17. Le cube, si l'on compare notre porte-conteneurs à un cube, possède un Cx qui se situe aux alentours de 1,05.

Notre objectif ici est donc bien de nous rapprocher au maximum de la goutte d'eau.

Figure 12: Porte-Conteneurs Inauguration

Source : Les Echos (2019)

En observant la Figure 12, on constate sans grand effort que notre porte-conteneur est encore bien loin d'un corps profilé. Cependant, ce chargement a au moins le mérite d'être uniforme et donc assez peu rugueux à son échelle. Malheureusement, ce chargement d'inauguration représente rarement la réalité.

La réalité ne permet ni aux ship-planners ni aux officiers de réaliser un chargement esthétique et aérodynamique. Les conteneurs sont arrangés de façon à être chargés et déchargés le plus rapidement possible, les escales à quai étant particulièrement couteuses.

D'autres facteurs sont également à prendre en compte : la stabilité du navire, la ligne de visée depuis la passerelle, l'alimentation des conteneurs en électricité pour les conteneurs réfrigérés et bien sûr la contenance d'éventuels produits dangereux.

Dans le monde réel, le chargement d'un porte-conteneur ressemble le plus souvent à la Figure 13.

Figure 13: Porte-Conteneurs Chargement Réel

Source : Le Monde (2018)

Cette fois-ci, notre porte-conteneurs a toujours sa forme carrée mais son chargement lui offre une rugosité particulièrement importante. Cette configuration est très propice à la création de trainée. Selon Andersson (1978), les grandes irrégularités de chargement (ex : plusieurs baies de conteneurs vides) augmenteraient la force longitudinale de 70 à 100%.

Reprenons les trois trainées énoncées dans le chapitre précédent :

- **La trainée de Pression :**

  Elle est créée par les premières rangées de conteneurs que rencontre l'air. La forme prédominante à l'avant de notre navire est donc cubique. Nous savons dorénavant que cette forme n'est pas optimale si nous voulons réduire les forces de trainée.

- **La trainée de Frottement :**

  Dans notre étude, cette trainée sera toujours présente car même dans le cas de la Figure 12, la surface est rugueuse. Plus le chargement comportera de trous, plus elle augmentera.

- **La trainée de Forme :**

  Ici la trainée de forme est essentiellement représentée par le bord de fuite que crée la cargaison à la poupe du navire.

Chapitre 3

3. Question de Recherche – L'optimisation aérodynamique peut-elle diminuer la consommation d'un porte-conteneurs ?

Nous avons pour le moment parcouru l'histoire de l'aérodynamisme. Nous avons observé comment, au fil des années, des études et des progrès techniques, les moyens de transport se sont adaptés pour améliorer toujours plus leur aérodynamisme. Ces progrès ont été faits à des fins de performance, pour augmenter la vitesse maximale d'un objet ou bien pour réduire sa consommation moyenne.

Nous avons introduit les principes fondamentaux qui nous servirons de fil conducteur lors de notre étude.

Et enfin nous avons pu constater l'absence de notion aérodynamique dans le milieu du transport maritime avec l'étude du cas spécifique du porte-conteneurs.

Nous allons donc essayer de rattraper des années de design inchangé en terme de construction navale. Notre objectif sera d'appliquer à un porte-conteneurs type, les connaissances que nous avons emmagasiné lors des chapitres précédents. Ainsi d'une forme carrée nous allons nous rapprocher au maximum de la forme de goutte d'eau.

Ces modifications techniques seront premièrement testées dans un univers virtuel à des fins d'économie d'impression 3D. Une fois les modèles les plus prometteurs sélectionnés, nous effectuerons des tests en soufflerie, dans le monde réel cette fois.

Ce mémoire sera donc articulé autour de trois grandes parties.

Tout d'abord, une partie purement virtuelle dans laquelle nous pourrons étudier la conception des modèles pour nos tests, et ainsi observer les résultats obtenus en soufflerie CFD.

Dans un second temps, nous verrons la conception de la soufflerie Type Eiffel que nous utiliserons pour nos tests dans le monde réel, ainsi que les résultats de ces expérimentations.

Enfin, une partie numérique qui consistera à l'analyse des résultats de nos tests. Celle-ci nous dira si une diminution de la consommation est possible.

Chapitre 4

4. Logiciels et Conception

4.1. Virtuel

La première intention était d'acheter une maquette que nous aurions modifiée pour afin de l'étudier en soufflerie. Mais le prix était trop élevé. Nous avons donc décidé de nous tourner vers la modélisation 3D pour plus de praticité. Le modèle réalisé en 3D est basé sur le plan d'un porte-conteneurs réel afin d'être le plus fidèle possible à la réalité. Ce plan est visible sur la Figure 14.

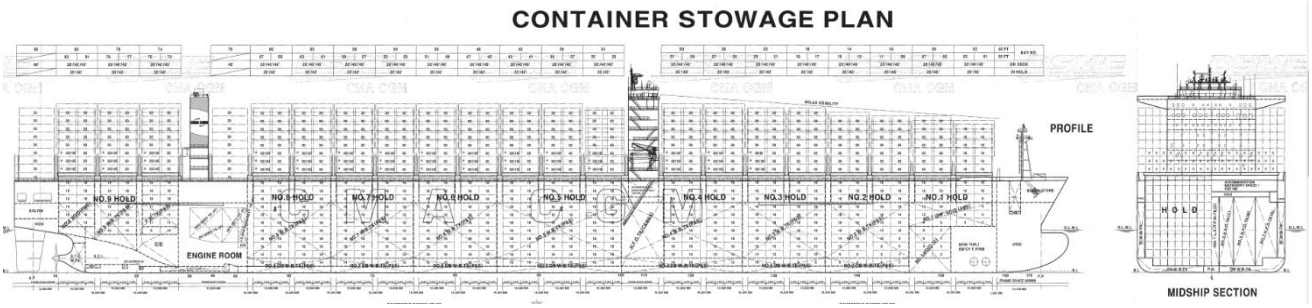

Figure 14: Plan Porte-Conteneurs

Source : CMA CGM (2020)

Le logiciel choisi pour la modélisation 3D est Inventor, de la société Autodesk. La décision de travailler à l'aide de ce logiciel a essentiellement été déterminé par le fait qu'il soit gratuit pour les étudiants. De plus, c'est le logiciel utilisé par l'Ecole Supérieure de Navigation d'Anvers pour les cours de modélisations. A l'aide de ce plan, des cours élémentaires de modélisation 3D reçu en première année de Bachelor Mécanique Navale et de quelques heures de tutoriel trouvés sur YouTube, j'ai réussi à obtenir un modèle 3D assez réaliste bien que plusieurs essais préalables furent nécessaires.

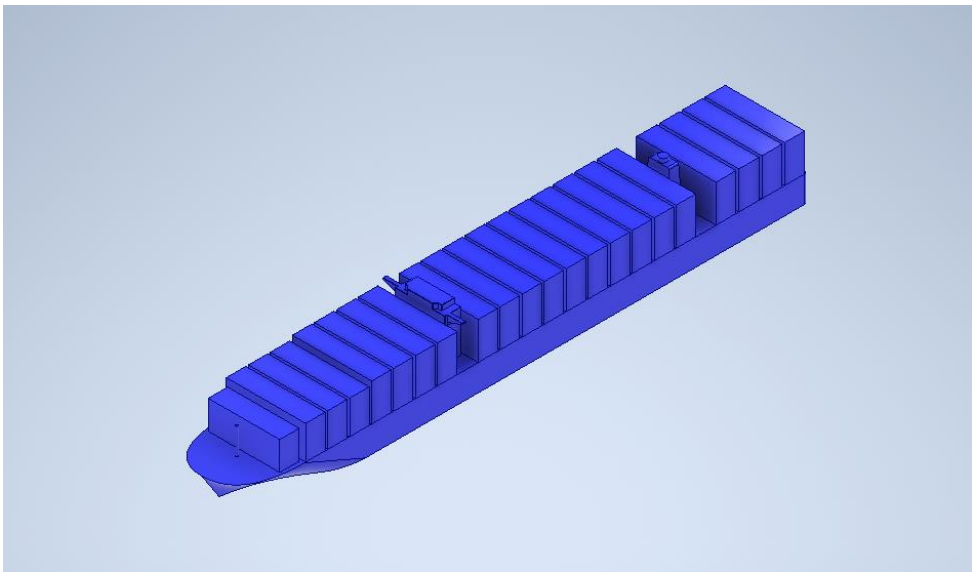

Figure 15: Porte-Conteneur de base

Source : Propre Travail

Comme nous pouvons le constater sur la figure 10, seules les parties aériennes du navire (aussi appelées les œuvres mortes) sont représentées ici.
Grâce à cette base modifiable à l'infini sans le moindre cout, nous avons pu réaliser plusieurs modèles pourvus de modifications structurelles mais également tester plusieurs plans de chargement.

Il semble nécessaire de commencer par étudier un porte-conteneur « de base » n'ayant aucune modification. Il est primordial de l'étudier dans deux configurations : une première avec un chargement parfait et une autre avec un chargement modifié, afin de permettre de prouver la modification des trainées en fonction du chargement.

L'impression 3D étant couteuse, il est impossible d'imprimer tous les modèles modifiés. Il a été nécessaire de trouver une solution pour tester au préalable les modèles.
Heureusement, le groupe Autodesk propose un logiciel nommé Autodesk CFD (Computation Fluid Dynamics).

Ce logiciel permet de créer une soufflerie virtuelle autour de notre modèle 3D réalisé avec Inventor. On y choisit les paramètres souhaités et on peut obtenir plusieurs visuels de la solution.

Nous pouvons constater sur la figure suivante l'exemple de notre porte conteurs « de base » dans la soufflerie virtuelle CFD.

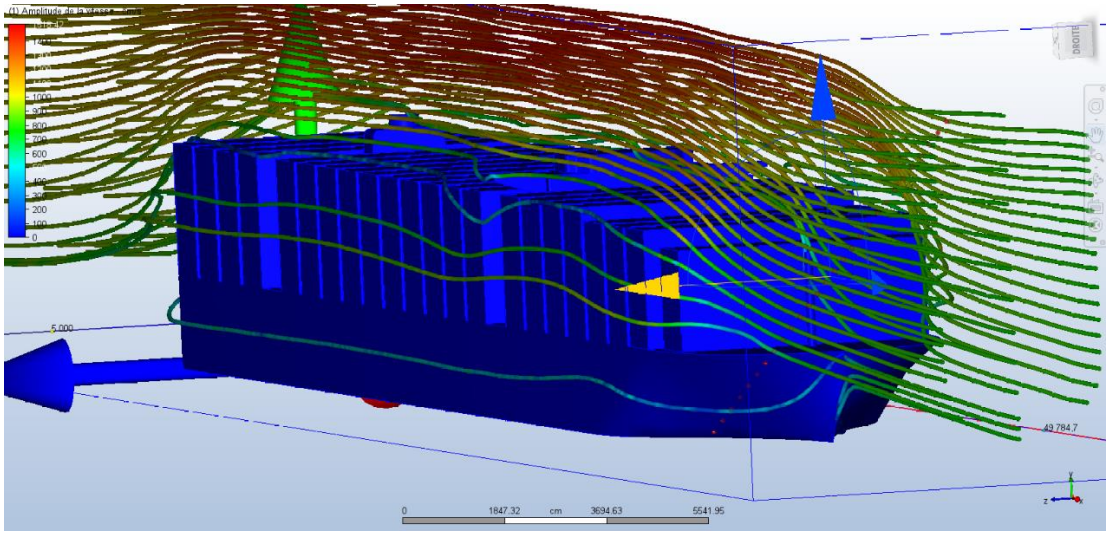

Figure 16: Porte-conteneurs de Base, chargement idéal

Source : Propre Travail

Grâce à ce logiciel, plusieurs méthodes s'offrent à nous pour visualiser les écoulements d'air. Il est possible de mettre en place des vecteurs qui, à l'image de la Figure 16, permettent la visualisation des écoulements d'air. Il est également possible de mettre en place des plans transversaux et longitudinaux ce qui nous permettent de visualiser la vitesse de l'air à un endroit précis comme sur la Figure 17. C'est cette dernière que nous utiliserons pour nos rendus car elle permet de visualiser de manière plus concrète l'amélioration des performances.

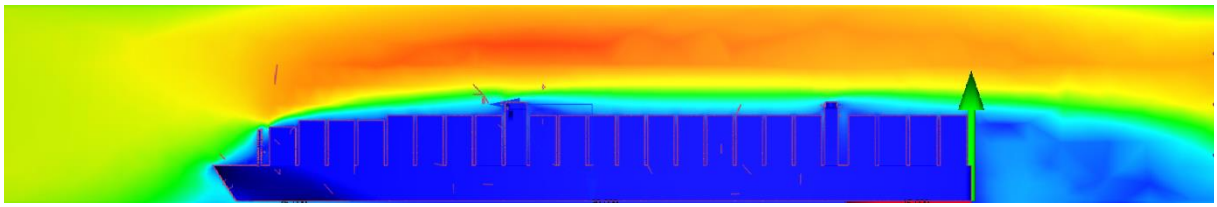

Figure 17 : Porte-conteneurs de base, chargement idéal, side view

Source : Propre Travail

Sur les figures précédentes, en rouge, nous remarquons les zones où la vitesse de l'air est la plus élevée et, en bleu, là où la vitesse est la plus faible.
Grâce à aux connaissances aérodynamiques que nous possédons, nous allons maintenant améliorer nos trois coefficients de trainée.

4.1.1. Trainée de Pression

Pour rappel, la trainée de pression correspond à l'onde de pression qui se crée à l'avant un objet qui se déplace dans un fluide.

Grâce aux connaissances acquises précédemment et après quelques recherches complémentaires, il semble clair que la proue de notre porte-conteneurs optimisé doit être la plus ronde possible. La forme ronde étant la forme la plus aérodynamique pour l'avant de tout objet à vitesse subsonique. Elle permet une bonne diminution de la pression qui se forme à l'avant d'un objet lorsqu'il progresse dans l'air.

Nous allons modifier un premier modèle avec un déflecteur au niveau de la plage de manœuvre à l'avant du navire. Ce modèle est inspiré de réalisations que l'on peut observer sur quelques unités de petite taille. Cette solution est intéressante car elle est assez simple de réalisation et peut être ajouté sur un navire déjà existant.

Figure 18: Déflecteur de Proue

Source : shipspotting.com (2021)

Nous pouvons ici observer un déflecteur à l'avant du porte-conteneurs JPO LEO construit en 2005. Ce porte-conteneurs est une petite unité pouvant transporter 3 100 TEU. Ce navire est assez petit comparé à notre modèle qui a été réalisé d'après le plan d'un porte-conteneurs de 16 000 TEU. En portant attention à la Figure 19, nous constatons que le même principe est repris sur notre modèle, simplement dans des dimensions plus conséquentes, le but étant de protéger la cargaison.

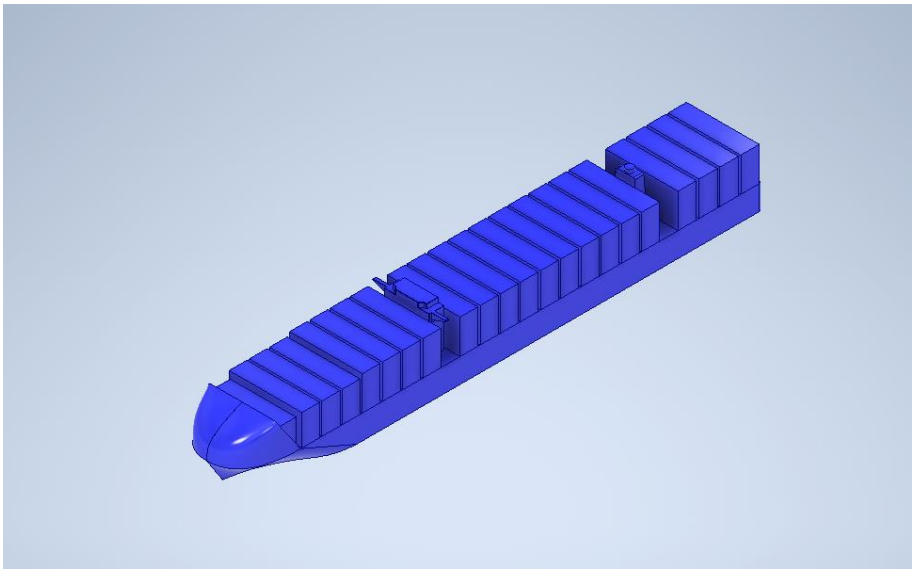

Figure 19: Porte-conteneurs avec Déflecteur

Source : Propre Travail

L'une des plus grandes surfaces planes rencontrées à bord étant celle du château, une autre solution offrant un bon compromis est d'installer le château à l'avant : ouvertement inspiré des supply boat de nouvelle génération, cette idée permet de mieux diffuser la trainée de pression. Ainsi le château sert aussi de déflecteur pour la cargaison. Par la même occasion, cette solution permet éventuellement de récupérer une rangée de conteneurs supplémentaire en utilisant la surface de la plage de manœuvre avant.

Figure 20: Bourbon Orca

Source : marine-marchande.net (2021)

Nous observons sur les Figure 21 et Figure 22 que la forme atypique trouvée sur le Bourbon Orca, ainsi que sur beaucoup d'autres supply boats de nouvelle génération, est répétée sur notre modèle.

Cependant, elle est un peu différente car la forme ronde est plus prépondérante. Comme nous l'avons déterminé, nous voulons que la proue de notre navire soit la plus ronde possible ; vous aurez peut-être noté le changement d'une proue classique vers une proue droite.

Nous optons pour cette solution car bien que ce ne soit pas le sujet de ce mémoire, la tendance actuelle au niveau de l'hydrodynamisme des navires fait que les chantiers produisent des navires avec des proues droites.

En dehors du déflecteur qui peut être appliqué au cours d'un rétrofit, les idées de modifications étudiées lors de ce mémoire seraient appliquées à des navires futurs et donc très probablement à proue droite.

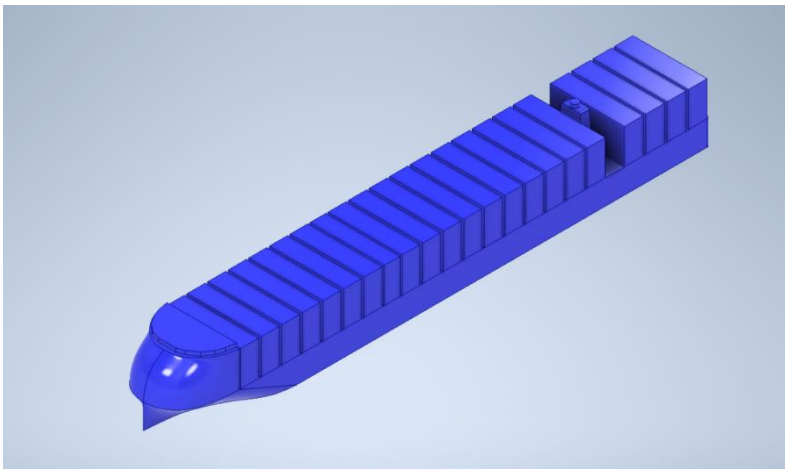

Figure 21: Porte-conteneurs château avant

Source : Propre Travail

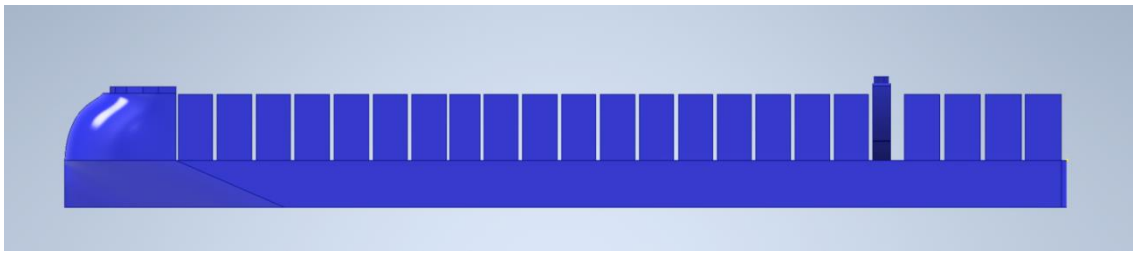

Figure 22: Porte-conteneurs château avant, vue de coté

Source : Propre Travail

4.1.2. Trainée de Frottement

Pour rappel la trainée de Frottement dépend de la rugosité de l'objet étudié, de la vitesse relative entre l'objet et le fluide qui l'entoure, ainsi que de la viscosité de ce dernier.

Pour réduire la trainée de frottement, deux options s'offrent à nous : soit la cargaison doit être très lisse, soit nous devons la contenir dans une enveloppe.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la première proposition n'est pas réalisable dans la pratique. Pour plus de rapidité et de praticité les chargements sont arrangés en fonction de leur poids, de leurs produits transportés et de leur destination. Cela permet de réduire le nombre de mouvements de boîtes lors des escales et par conséquent le temps à quai ce qui permet de dépenser moins d'argent.

L'option de l'enveloppe externe est inspirée de l'article de Van He, Mizutani, et Ikeda (2019). Celui-ci évoque l'installation de side-guards, protections latérales en français, sur les navires afin de réduire les zones de contact avec le flux d'air.

Comme l'indique la figure 40, l'ajout de side-guard à notre modèle est assez efficace. On constate une grosse diminution de la vitesse des flux à l'intérieur des rangées de conteneurs. Cependant, une telle installation serait assez couteuse est très peu pratique.

A moins que ces cloisons ne soient mobiles, les portiques auraient besoin de passer totalement au-dessus. Ceci allongerait la durée des mouvements, donc plus de temps à quai et donc plus d'argent dépensé par l'armateur. Toute économie de consommation grâce à l'installation de side-guards serait donc très probablement perdue à cause du temps supplémentaire passé à quai.

Une autre solution bien plus complexe encore mais plus efficace serait une cargaison complètement enfermée.

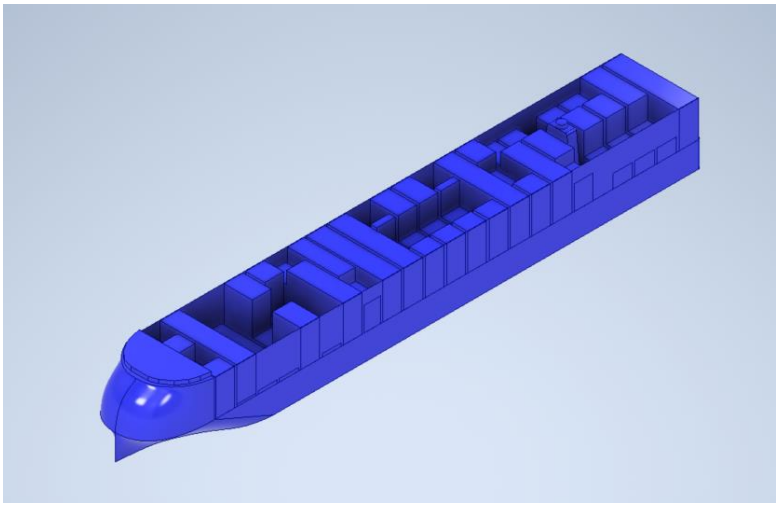

Figure 23 : Porte-conteneurs Side Gards

Source : Propre Travail

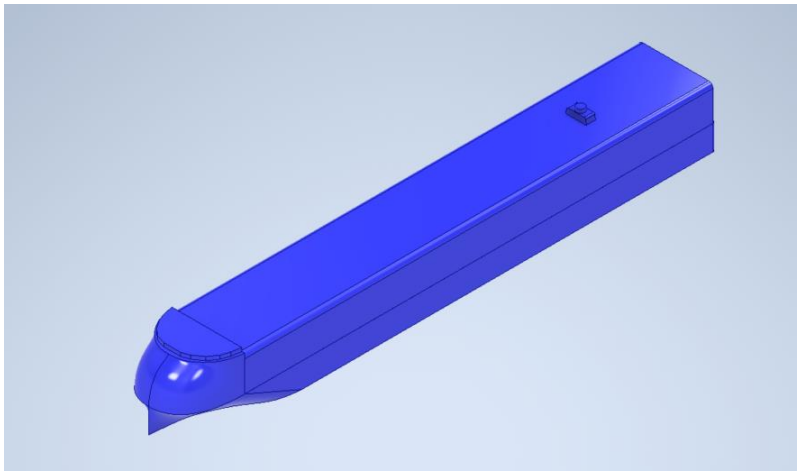

Figure 24 : Porte-conteneurs Fermé

Source : Propre Travail

4.1.3. Trainée de forme

Pour rappel, la trainée de forme dépend, comme son nom l'indique, de la forme de l'objet.

En effet, selon les profils, les écoulements sont différents : on obtient donc des différences de pressions entre les bords d'attaques et les bords de fuite. Lorsque la pression du bord d'attaque est plus haute que la pression du bord de fuite une force aérodynamique se crée alors, des hautes pressions vers les basses pressions. C'est la trainée de forme.

Si la forme de l'objet change brutalement, alors le flux d'air ne peut pas suivre et se décroche de la surface. La plupart des porte-conteneurs ont une poupe très carrée, donc une très grande trainée de forme. Comme on peut le constater notre modèle a pour l'instant une poupe carré.

Nous allons nous inspirer des poupes trouvées sur les porte-conteneurs de la compagnie MSC qui ont une forme assez proche de l'effet recherché. Ces formes vont permettre aux flux latéraux de se diriger vers l'arrière de notre navire plus délicatement que la poupe carrée que nous avions à l'origine.

Figure 25: MSC Gulsun

Source : Port of Rotterdam

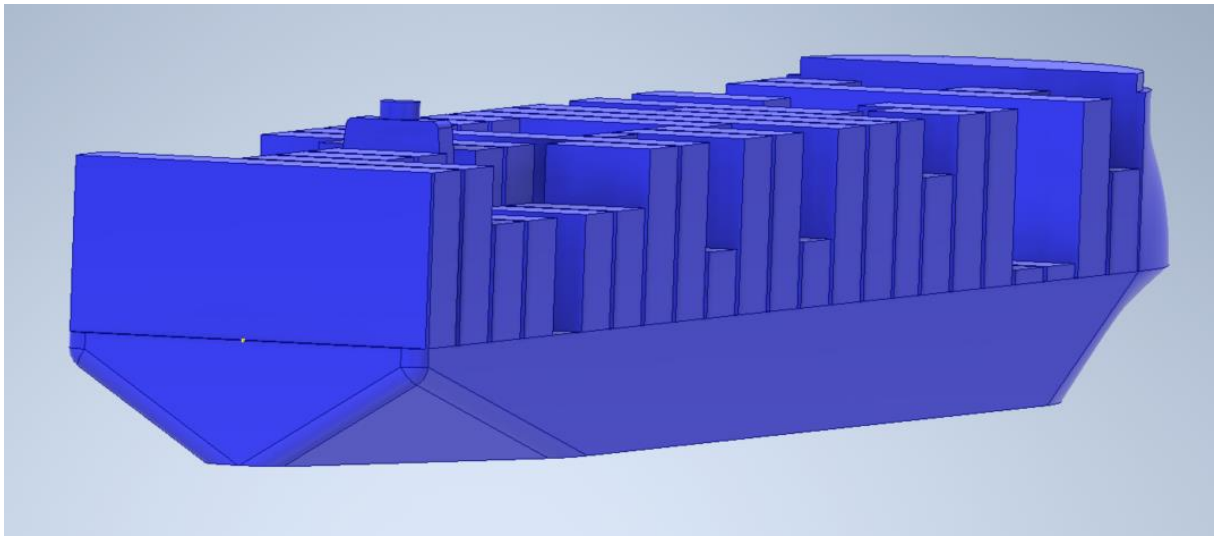

Figure 26 : Poupe modèle 3D

Source : Propre Travail

Ici en Figure 26 observons les modifications apportées au modèle pour être similaire au MSC Gulsun.

Afin d'améliorer les résultats et de nous rapprocher le plus possible de la forme de goutte d'eau, nous allons également optimiser le plan de chargement afin de créer une chute moins brutale. Cette idée est également mentionnée dans l'étude de Majidian et Azarsina (2018).

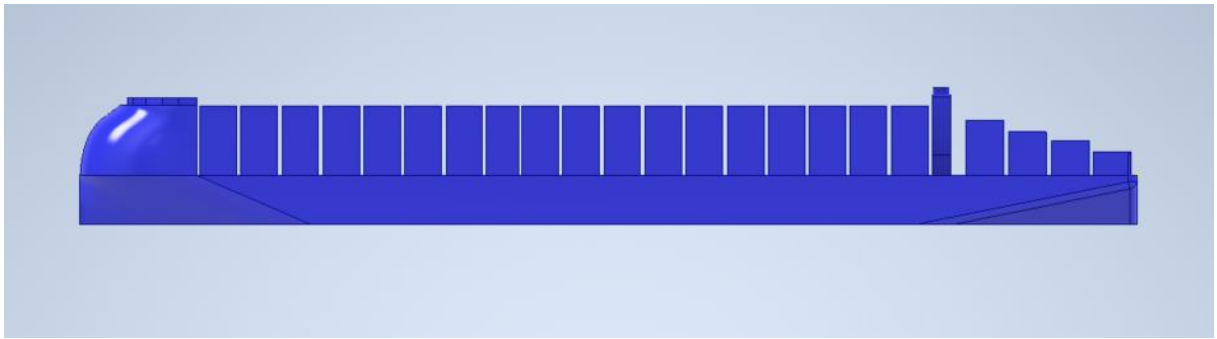

Figure 27: Chargement Optimisé

Source : Propre Travail

On peut ainsi constater que la surface plane à l'arrière de notre modèle d'essai est réduite de plus de sa moitié en comparaison à la surface originale.

Chapitre 5

5. Résultats Virtuels

5.1. Porte-Conteneurs de Base

Nous retrouvons ici les résultats de l'étude en soufflerie virtuelle sur notre porte-conteneurs de base. Pour rappel, ces résultats ont été effectués grâce au logiciel Autodesk CFD .

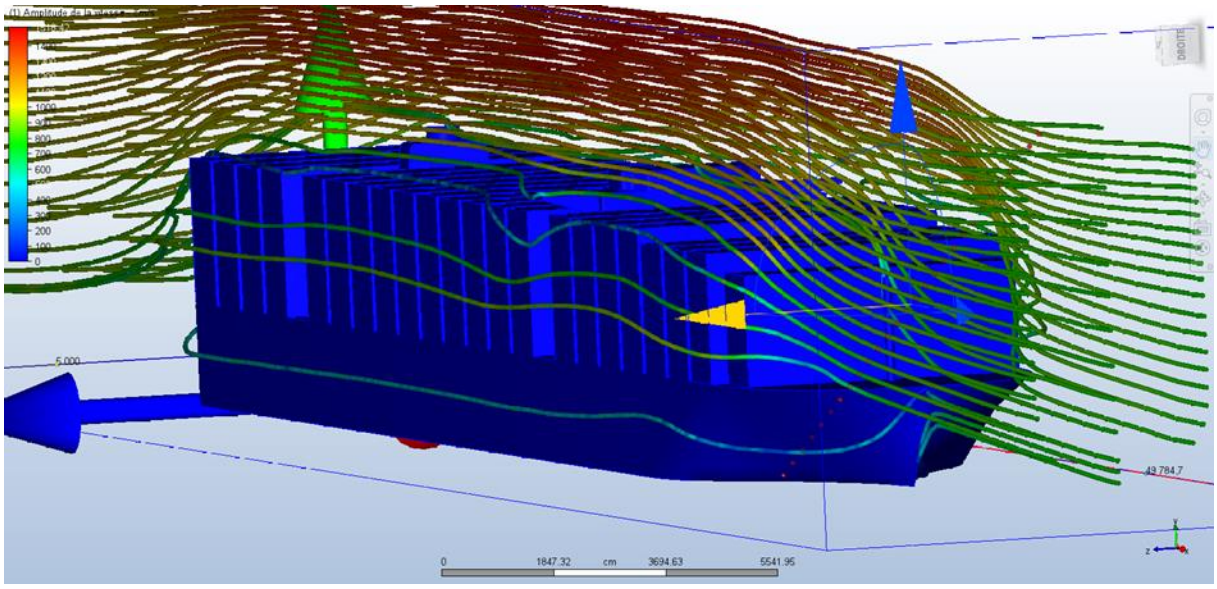

Figure 28: Porte-Conteneurs de Base

Source : Propre Travail

Nous pouvons observer sur ce rendu dit « vecteurs » que sur un porte-conteneurs chargé « full stack » les écoulements d'air sont relativement corrects.

Cependant, comme nous pouvons le constater sur la Figure 29, dès que le chargement est modifié, l'écoulement d'air sur les côtés et au-dessus du porte-conteneurs est nettement plus turbulent.

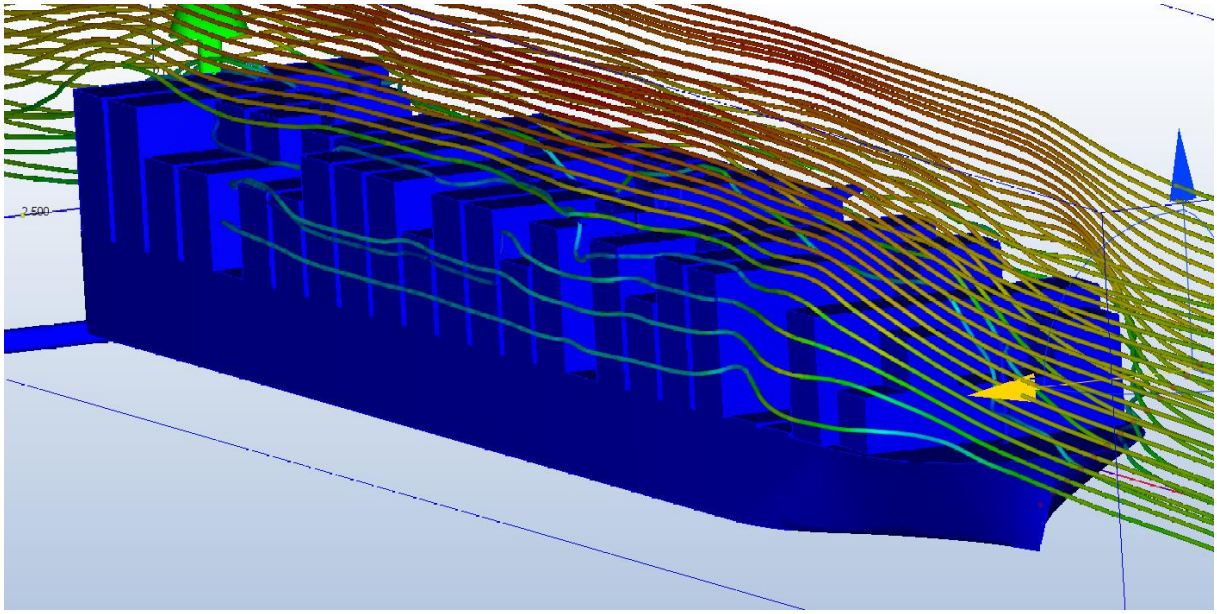

Figure 29: Porte-Conteneurs de Base Chargement Réel

Source : Propre Travail

Ci-dessous, nous trouvons un autre type de rendu, dit « plan ». C'est une coupe d'une section de notre modèle à hauteur et à emplacement réglable. Elle permet de visualiser dans ce cas la vitesse de l'air. Le bleu représente la vitesse la plus basse tandis que le rouge représente la vitesse la plus haute. On peut constater sur les Figures 30 et 31 qu'il n'y a presque pas de circulation d'air entre les rangées de conteneurs et qu'il n'y a aucune perturbation particulière. Lorsque l'on observe les Figures 32 et 33, on constate que des flux d'air se créent dans les zones où la cargaison est absente.

A noter que la coupe de la Figure 33 n'a pas été prise à la même hauteur que la Figure 31 pour des raisons de résultats. Certains vides dans la cargaison se trouvent en hauteur comme visible sur la Figure 29.

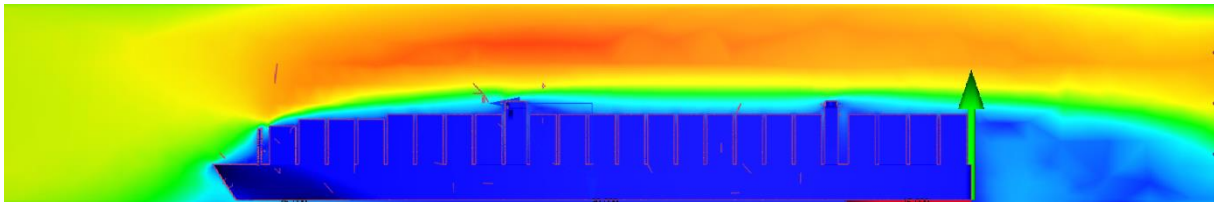

Figure 30: Porte-Conteneurs de Base, Vue Latérale

Source : Propre Travail

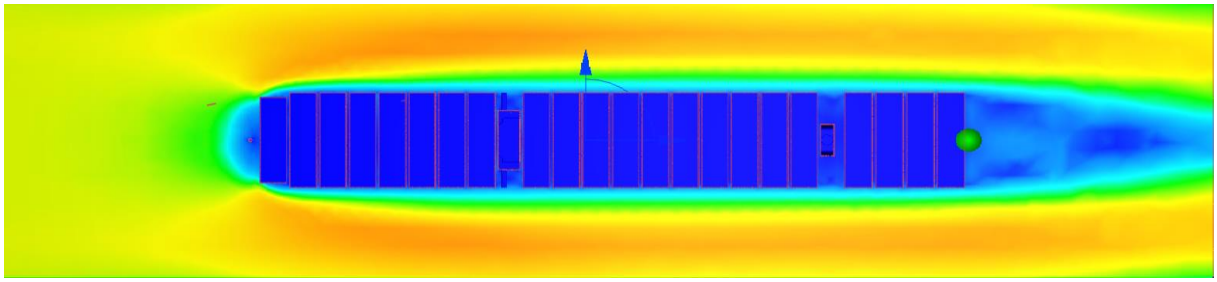

Figure 31: Porte-conteneur de base, chargement idéal, top view

Source : Propre Travail

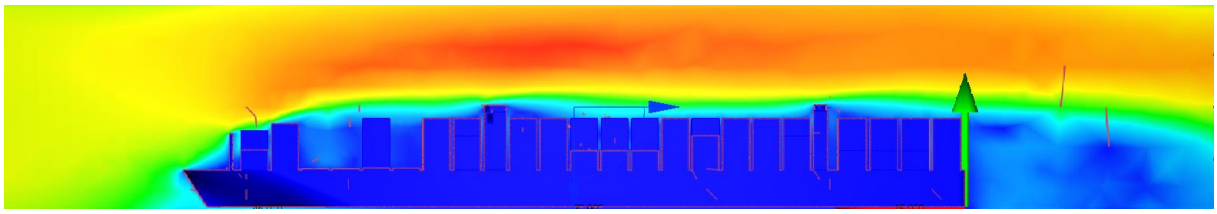

Figure 32: Vue latéral porte-conteneur chargement non idéal, side view

Source : Propre Travail

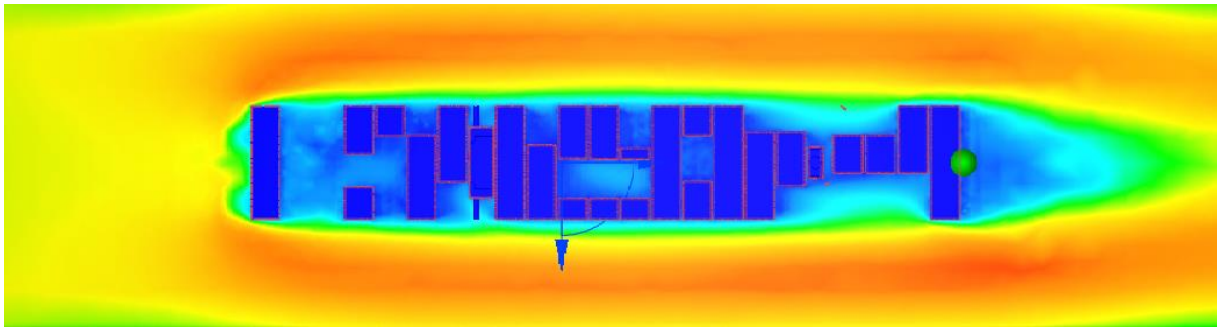

Figure 33: Vue du dessus porte-conteneur chargement non idéal, top view

Source : Propre Travail

5.2. Trainée de Pression

Pour les résultats de la trainée de pression nous utilisons le rendu de type plan, mais les paramètres sont changés pour nous donner un aperçu de la pression statique. Soyons attentifs ici à ne pas prêter attention aux couleurs des rendus mais à la valeur la plus élevée de l'échelle de mesure que le logiciel adapte en fonction des résultats. Cette valeur se trouve en haut à gauche des Figures 34 à 36 .

Les résultats sont concluants : notons une diminution de la valeur maximale de la pression à l'avant de chacun des 3 modèles avec une valeur minimale pour le modèle équipé du château modifié à l'avant.

Cependant, ces résultats restent à comparer avec les résultats obtenus dans la soufflerie réelle.

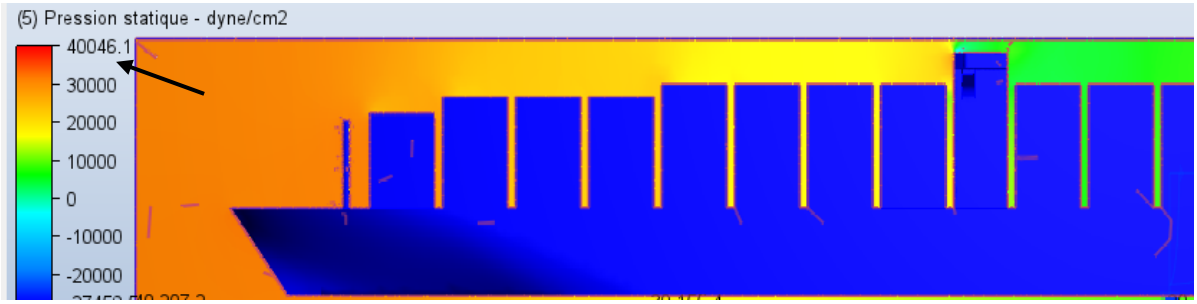

Figure 34 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs de Base

Source : Propre travail

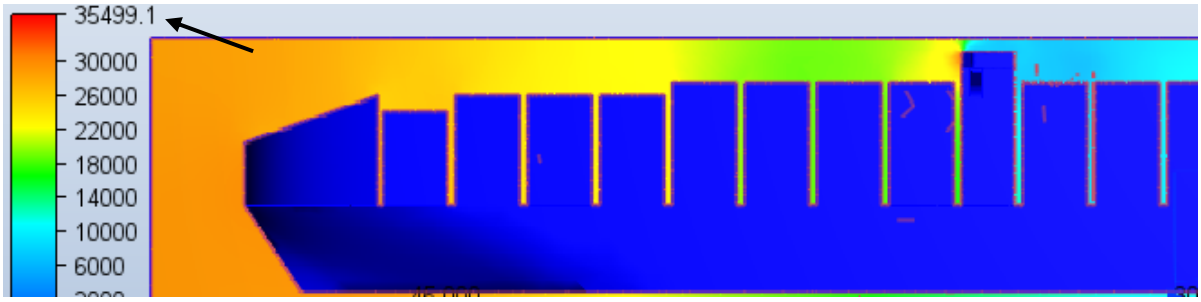

Figure 35 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Déflecteur

Source : Propre travail

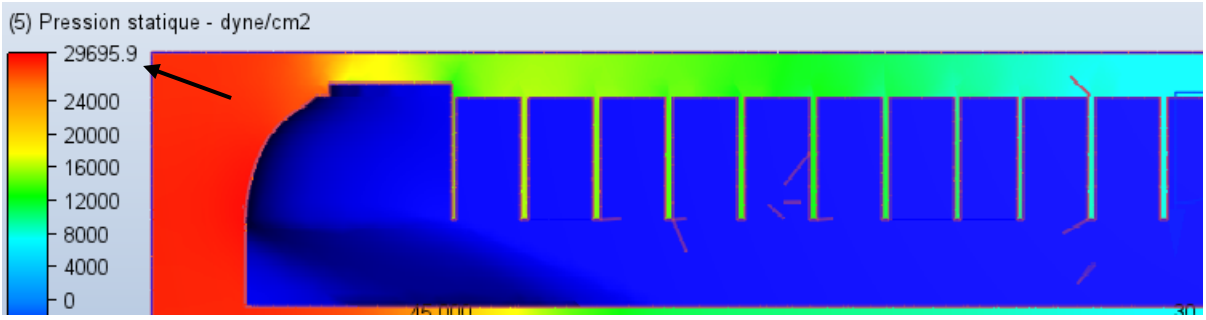

Figure 36 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Château Avant

Source : Propre travail

Un autre rendu intéressant est celui des Figures 37 à 39. Il permet de mieux réaliser à quel endroit la pression s'applique sur la structure. Une fois de plus, prêtons attention à la valeur maximale de l'échelle de pression. Les résultats des deux rendus sont similaires au niveau numérique.

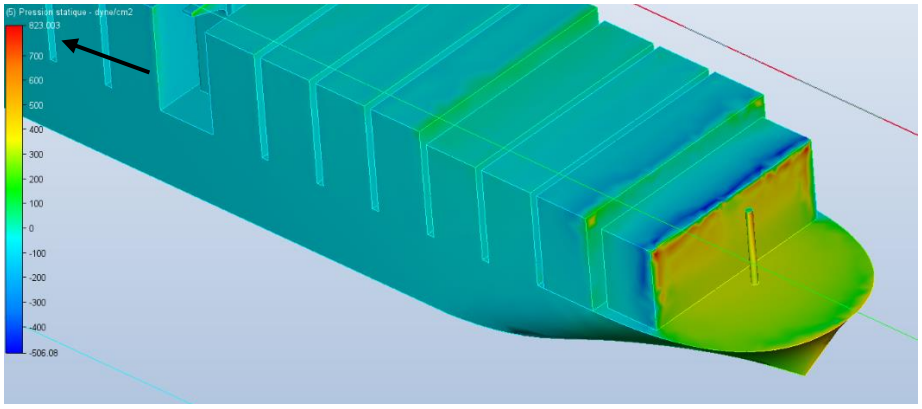

Figure 37 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs de Base

Source : Propre travail

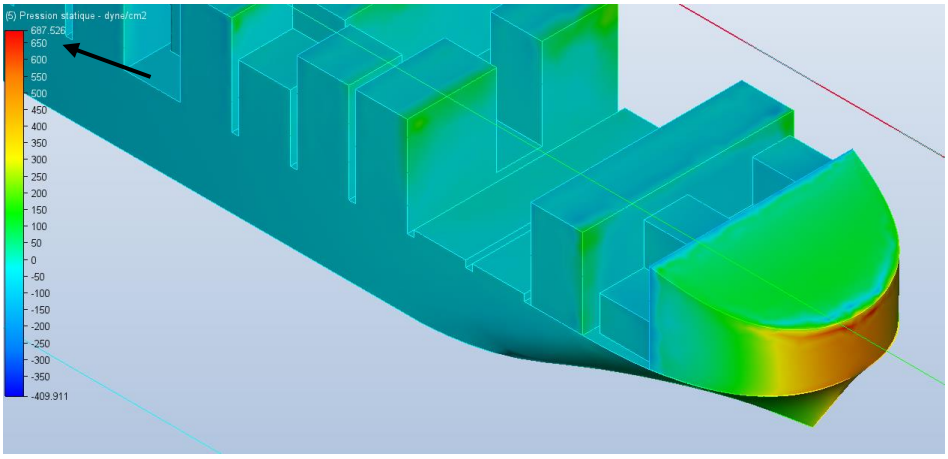

Figure 38 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Déflecteur

Source : Propre travail

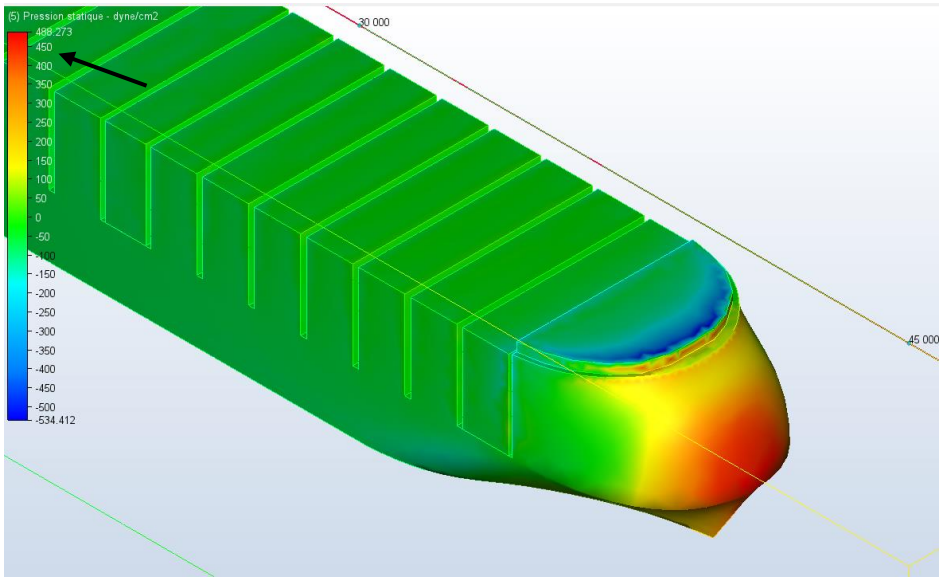

Figure 39 : Test Trainée de Pression Porte-Conteneurs Château Avant

Source : Propre travail

5.3. Trainée de Frottement

Ici, nous trouvons les résultats de la trainée de frottement en rendu de type plan vitesse.
Si l'on regarde les Figures 40 à 43, nous observons une diminution progressive des flux d'air à l'intérieur des rangées de conteneurs et dans les espaces laissés vides.
Cette diminution est dans un premier temps crée par l'ajout des systèmes de diminution de la trainée de pression à l'avant du navire. Ces dispositifs créent moins d'instabilité au niveau des flux latéraux qui ont donc tendance à moins s'infiltrer dans les espaces vides.
Dans un second temps, on peut observer l'efficacité des systèmes de side-guards évoqués dans l'étude de Van He, Mizutani, et Ikeda (2019) sur La Figure 43. Evidement, la meilleure solution reste un système clos car pas de flux d'air au niveau de la cargaison.

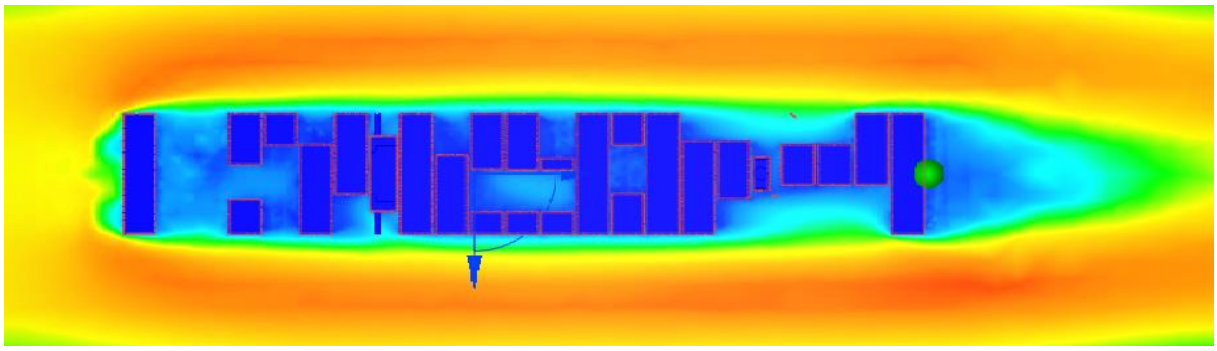

Figure 40 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs de Base

Source : Propre travail

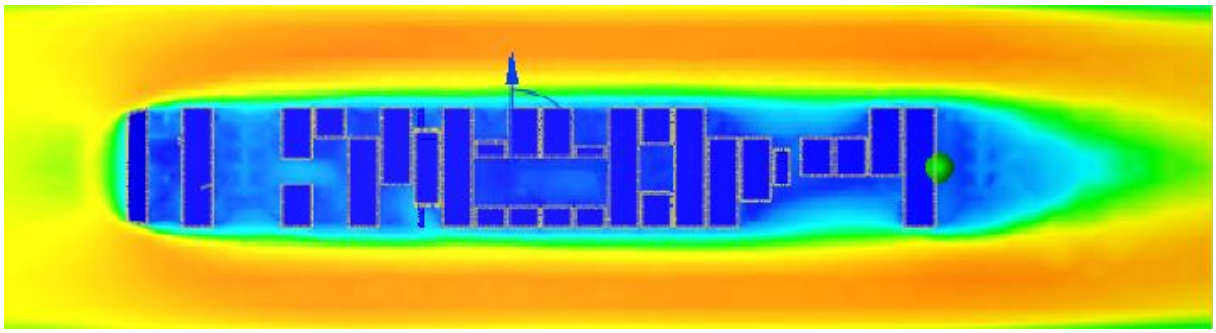

Figure 41 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Déflecteur

Source : Propre travail

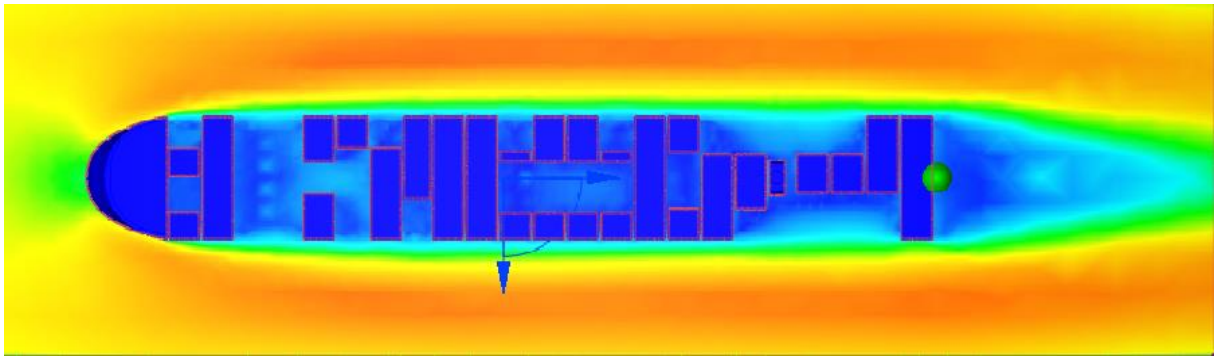

Figure 42 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Château Avant

Source : Propre travail

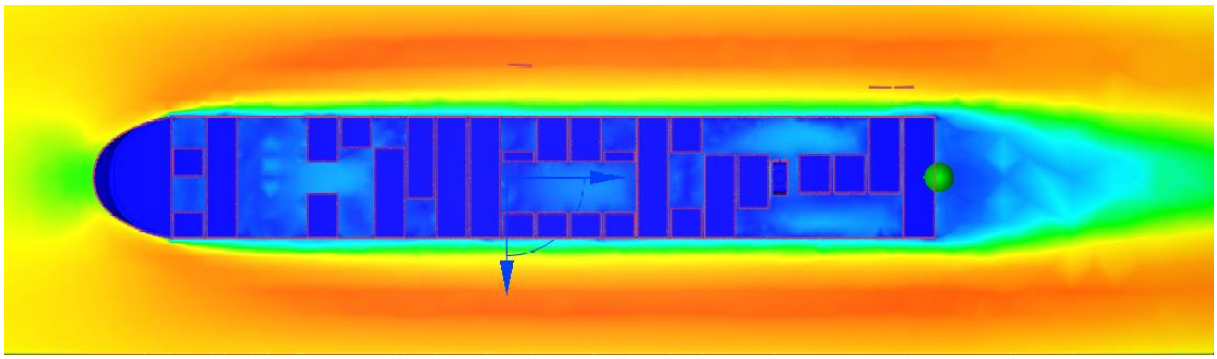

Figure 43 : Test Trainée de Frottement Porte-Conteneurs Château Avant et Side Gards

Source : Propre travail

5.4. Trainée de Forme

Ici, nous observons les résultats des tests en soufflerie virtuelle pour la trainée de forme. Les rendus observés sont de type plan vitesse. Notre modèle est chargé en « full stack » car nous cherchons ici à démontrer les changement au niveau de la trainée de forme.

Dans un premier temps, nous retrouvons sur les Figures 44 et 45 notre modèle avec château avant et poupe carrée. On peut observer une très large et très longue trainée de forme à l'arrière du navire.

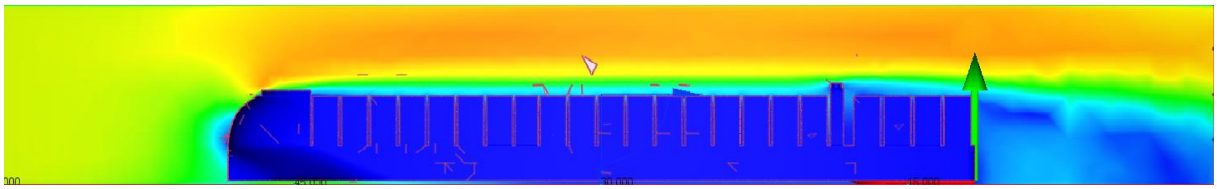

Figure 44: Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs, Vue de Coté

Source : Propre travail

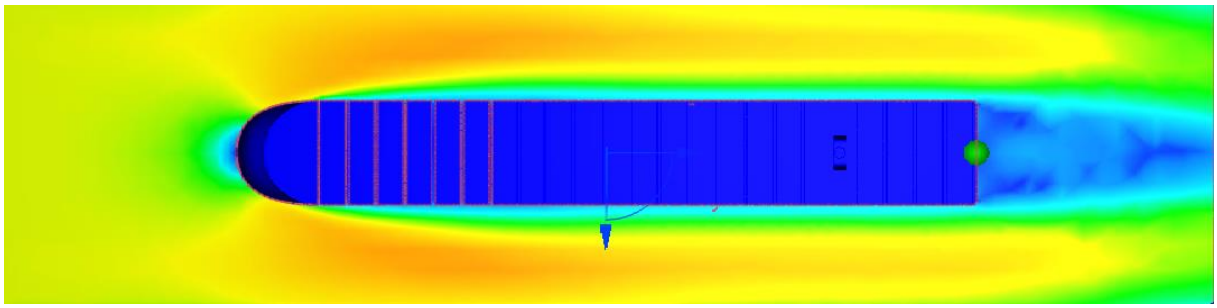

Figure 45 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs, Vue de dessus

Source : Propre travail

Sur les Figures 46 et 47, notre navire est équipé de formes qui permettent aux flux latéraux de remonter à l'arrière. Si on observe la Figure 47, on constate une diminution de la largeur de la trainée, en comparaison à la Figure 45.

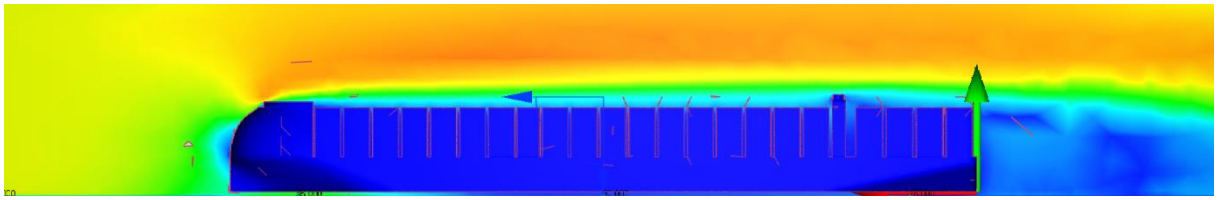

Figure 46 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes, Vue de Coté

Source : Propre travail

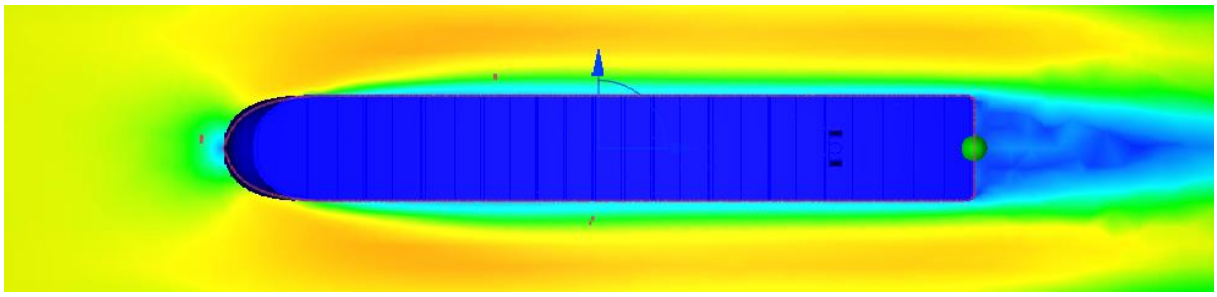

Figure 47 : Test Trainée de de Forme Porte-Conteneurs avec Formes, Vue de dessus

Source : Propre travail

Sur les Figures 48 et 49, notre navire est équipé de formes mais le chargement à l'arrière est également optimisé de manière à faire une pente descendante ramenant le flux d'air supérieur vers les flux d'air venant des formes. Ainsi on peut constater une très grande diminution de la hauteur de la trainée mais également de sa superficie totale. Comparons la Figure 49 et la Figure 45.

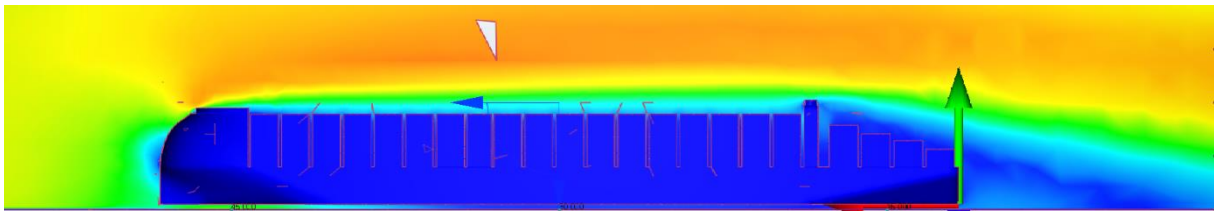

Figure 48 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes et Chargement Optimisé , Vue de Coté

Source : Propre travail

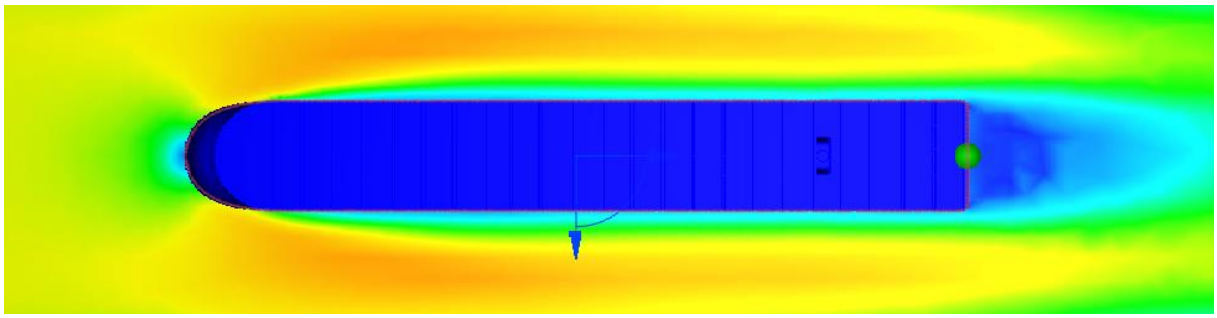

Figure 49 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs avec Formes et Chargement Optimisé, Vue de dessus

Source : Propre travail

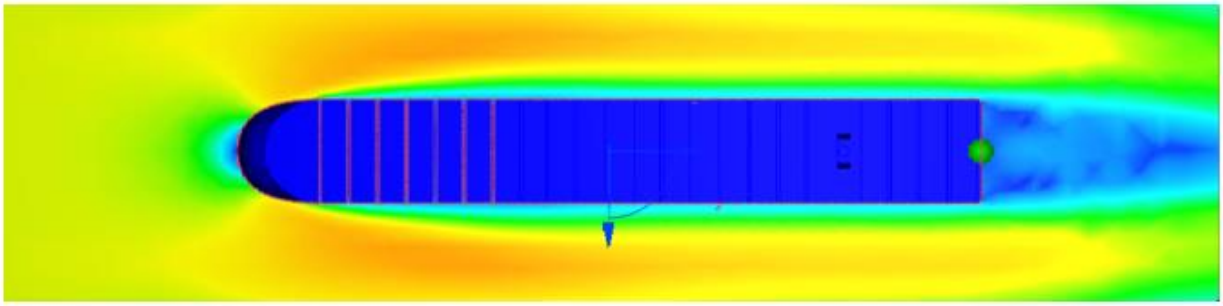

Figure 45 : Test Trainée de Forme Porte-Conteneurs, Vue de dessus

Source : Propre travail

CHAPITRE 6

6. Soufflerie

Nous avons repris la soufflerie d'un précédent mémoire effectué en 2019 par Pierre Landoeur. C'est une soufflerie de type Eiffel à circuit ouvert.
Nous avons décidé d'effectuer quelques modifications à la fois structurelles et cosmétiques afin d'en faire un outil disponible et accessible en toute sécurité pour les futures générations d'étudiants.
Sur la Figure 50, voici un aperçu de la soufflerie telle que nous l'avons trouvée au début de notre projet.

Figure 50 : Soufflerie Début de Projet

Source : Propre Travail

Cette soufflerie est de type Eiffel. Après observation de différents modèles de soufflerie, notamment de la soufflerie Eiffel de Paris, nous avons pu constater que la plupart sont équipées de grilles avant et après la zone de test. Celles-ci permettent au flux d'air d'arriver bien droit sur le modèle à tester. Si un tel dispositif n'est pas mis en place, le flux d'air à tendance à se décrocher de la paroi à la fin de la tuyère.

Figure 51 : Soufflerie Eiffel Paris

Source : Soufflerieeiffet.com

Mais avant d'entamer nos modifications, nous décidons de modéliser notre soufflerie en 3D. Une fois de plus, le logiciel Autodesk CFD est utilisé afin de visualiser les flux d'air à l'intérieur de la soufflerie.

Un premier modèle est réalisé tel que la soufflerie est trouvée au début du projet. Elles est équipée d'une grille (à l'avant de la tuyère comme vous l'avez peut-être constaté sur la Figure 50) ; vous pouvez également retrouver cette spécificité sur la Figure 52.

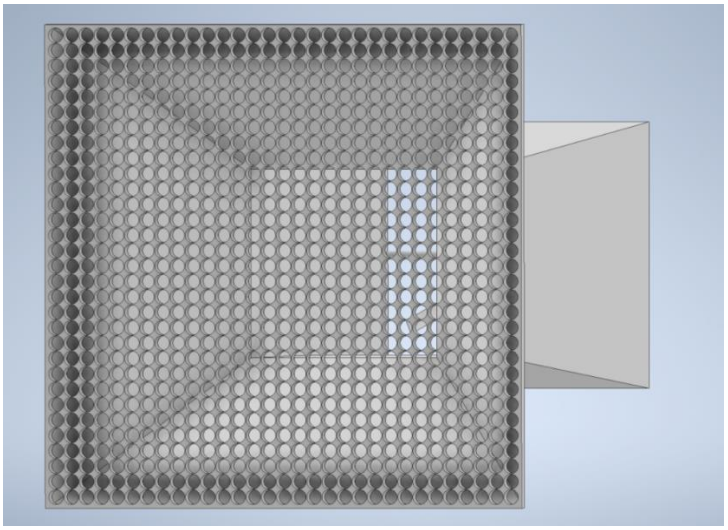

Figure 52 : Modélisation Soufflerie de Base 3D

Source : Propre Travail

Afin d'imiter le dispositif retrouvé dans la soufflerie Eiffel de Paris avec les moyens à notre disposition, nous avons choisi les tubes PVC. Notre grille avant et après la zone de test est constituée de tubes comme visible sur la Figure 53.

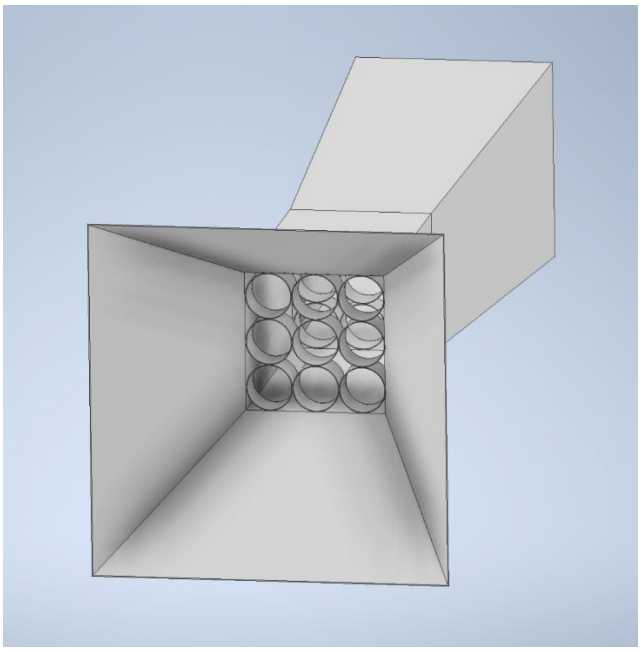

Figure 53 : Modélisation Soufflerie avec Grille 3D

Source : Propre Travail

Sur les figures suivantes, nous retrouvons les résultats des tests CFD pour la soufflerie. Comme on peut le constater, on retrouve sur la Figure 55 des vecteurs de vitesse mieux répartis et plus uniformes. On constate également qu'en sortie de tuyère, le flux est droit alors qu'on observe une légère courbe au niveau de la Figure 54.

Bien que ce système de grille soit très répandu et donc supposément efficace, nous pouvons ainsi constater son efficacité : cela nous conforte dans le choix des modifications à effectuer.

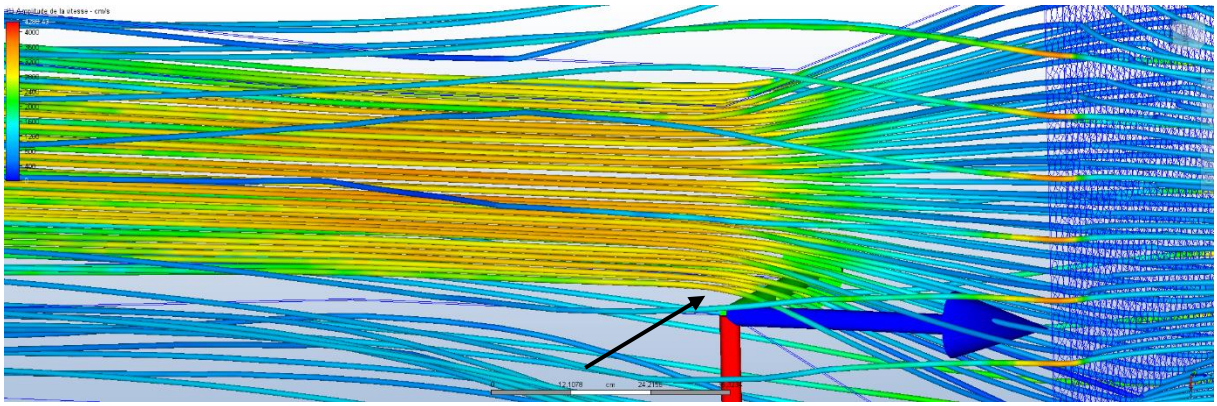

Figure 54 : Tests CFD Soufflerie de Base

Source : Propre Travail

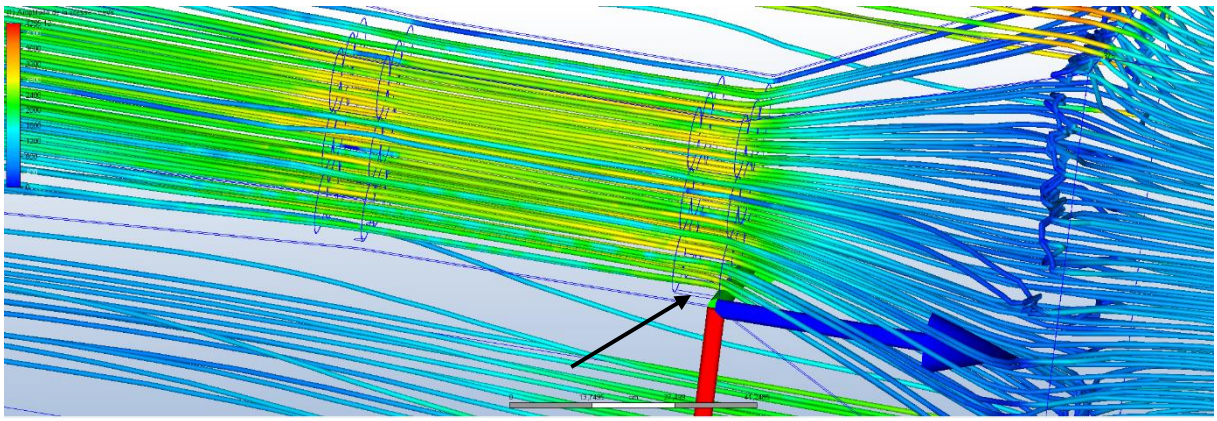

Figure 55 : Testes CFD Soufflerie avec Grille

Source : Propre Travail

Ici encore, nous pouvons une fois de plus observer que la répartition des vecteurs est plus harmonieuse et linéaire à l'intérieur du modèle équipé des tubes.

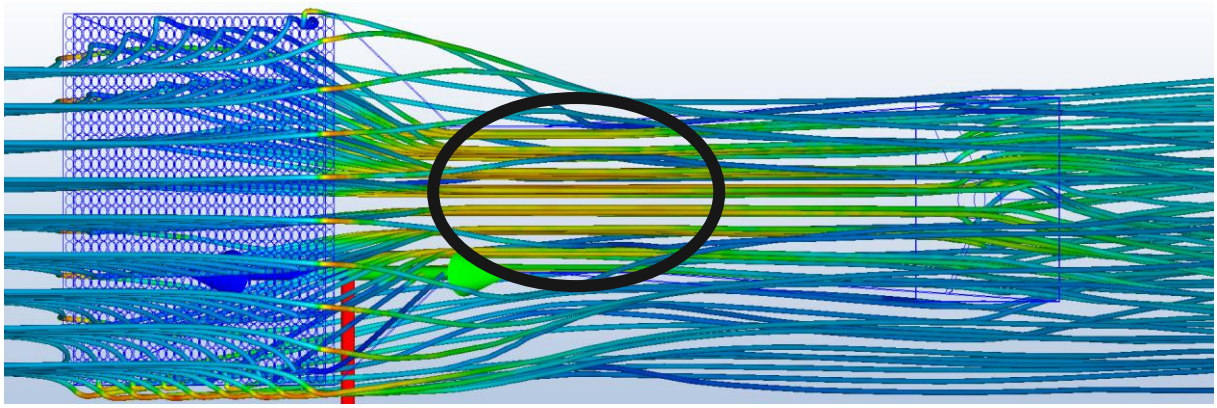

Figure 56 : Tests CFD Soufflerie de Base

Source : Propre Travail

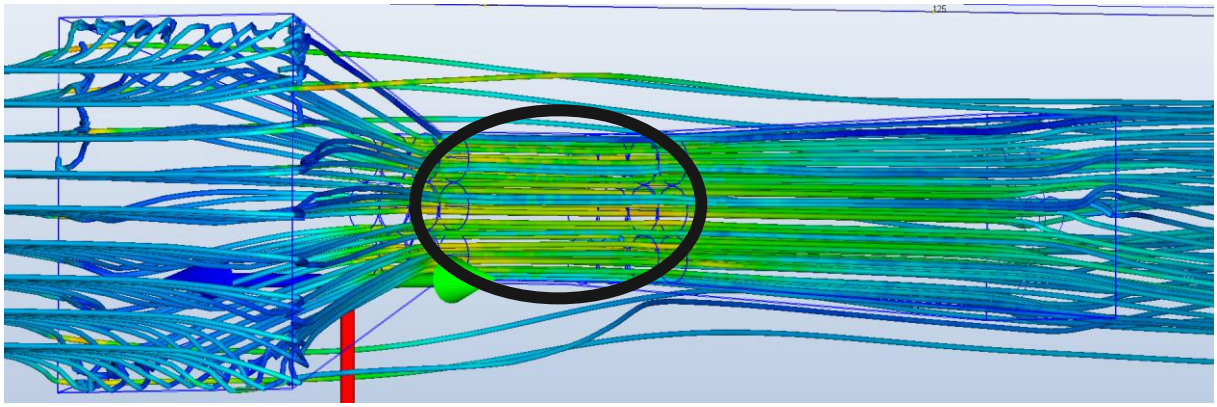

Figure 57 : Tests CFD Soufflerie avec Grille

Source : Propre Travail

Un tout nouveau module central est créé afin d'ajouter une section de 12cm de tube à l'avant de la zone de test et une autre après celle-ci. L'ancien système d'accès à la zone de test nécessitait de faire pivoter la tuyère car la vitre était fixe. Comme l'accès par les côtés est désormais entravé par les tubes, nous décidons de monter la vitre sur charnières et par la même occasion de fixer l'ensemble des éléments pour diminuer les éventuelles fuites.

Ici, observons le nouveau module central : les baguettes autour de la vitre permettent d'étanchéifier en obstruant l'espace entre la vitre et le module en bois.

De plus, nous y incorporons le système d'éclairage LED.

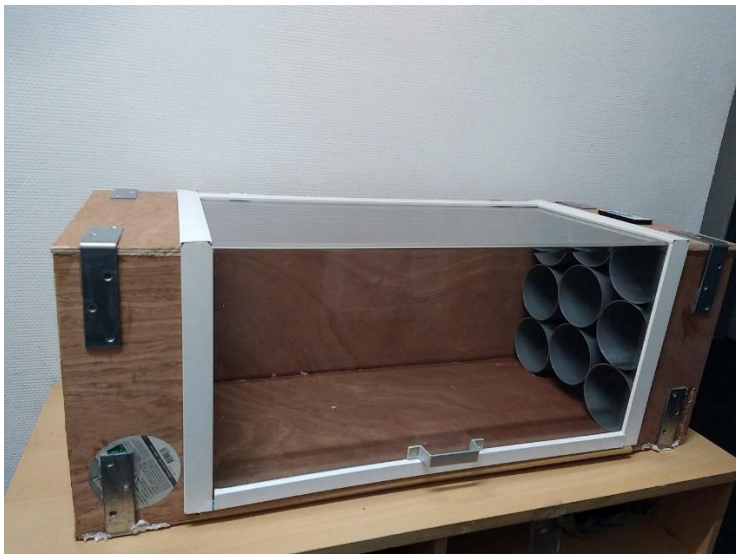

Figure 58 : Nouveau Module Centrale

Source : Propre Travail

Pour ce qui est de la sécurité de l'installation, nous remplaçons l'ancien circuit de contrôle qui ne correspondait pas aux normes de sécurité, voir Figure 59.

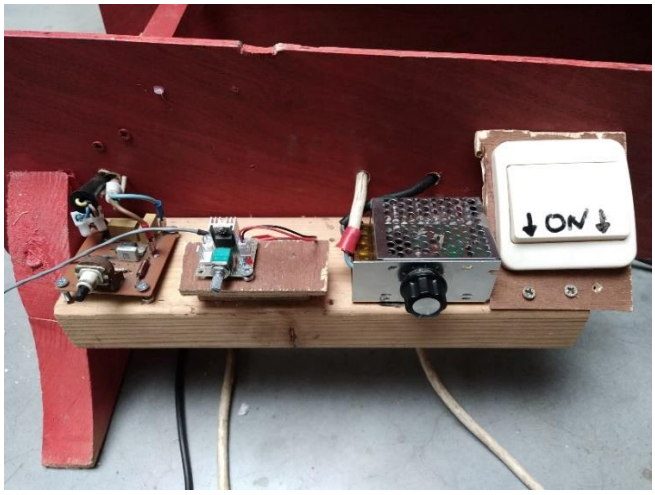

Figure 59 : Ancien Boitier de Commande

Source : Propre Travail

Nous le remplaçons donc par un circuit de commande fermé, ajoutons un bouton d'Emergency Stop, un bouton pour l'éclairage ainsi qu'une protection thermique et magnétique.

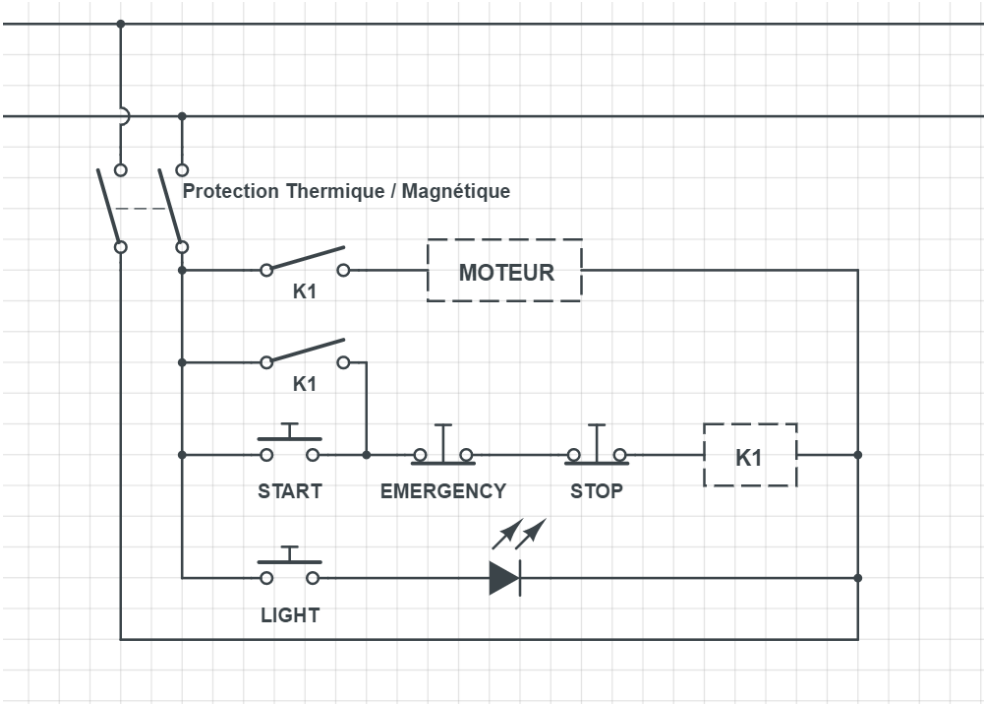

Figure 60 : Nouveau Circuit de Commande

Source : Propre Travail

Figure 61 : Nouveau Panneau de Commande

Source : Propre Travail

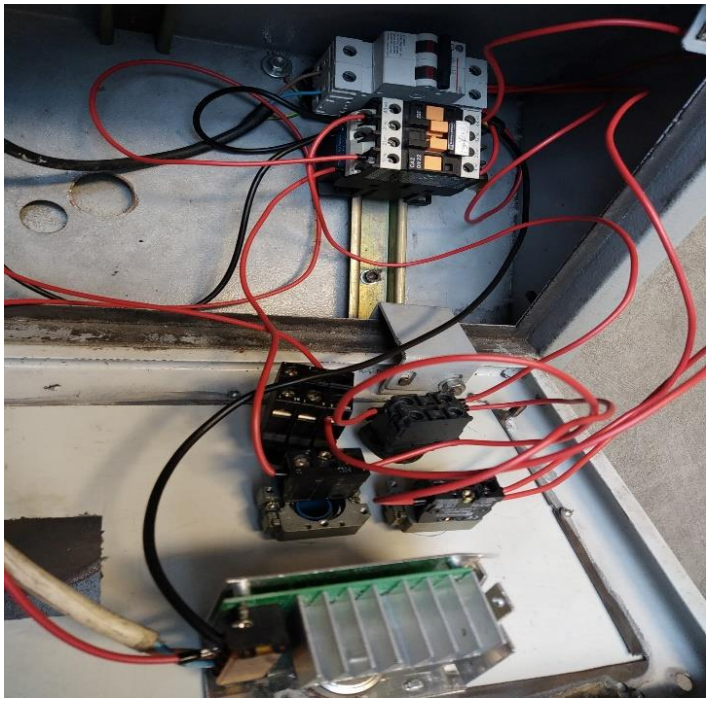

Figure 62 : Relais Panneau de Commande

Source : Propre Travail

A l'arrière, une grille de protection est également ajoutée, la vitesse de du moteur pouvant atteindre 10 000rpm.

Figure 63 : Soufflerie Terminée

Source : Propre Travail

Le tout est peint en noir et fixé sur une plaque OSB de 20cm d'épaisseur afin de pouvoir déplacer la soufflerie.

CHAPITRE 7

7. Mesures en Soufflerie

Une impression 3D du porte-conteneurs à été réalisée à l'échelle 1/800 par Monsieur Peter Bueken. Afin de simuler la cargaison, nous utilisons des LEGO°. La maquette est suspendue afin de ne pas avoir de frictions.

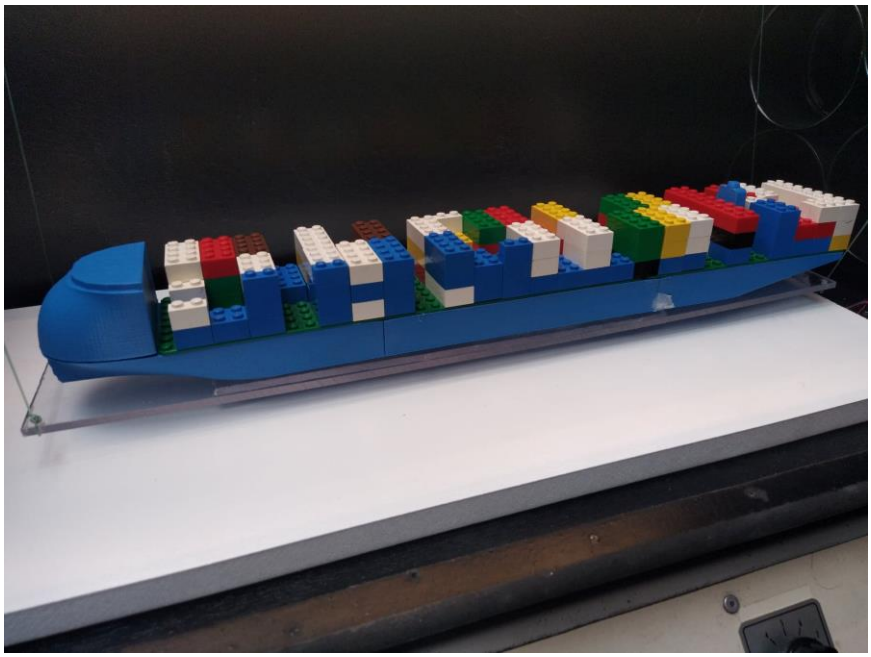

Figure 64 : Maquette Soufflerie

Source : Propre Travail

Pour mesurer la force longitudinale appliquée sur notre maquette, nous allons utiliser un Phidget Bridge ainsi qu'une Load Cell. Ces deux outils, une fois connectés, nous permettent d'avoir une lecture de la force. Celle-ci est exprimée sous forme de volts : plus la force augmente plus le voltage diminue.

Figure 65 : Phidget Bridge

Source : Phidget

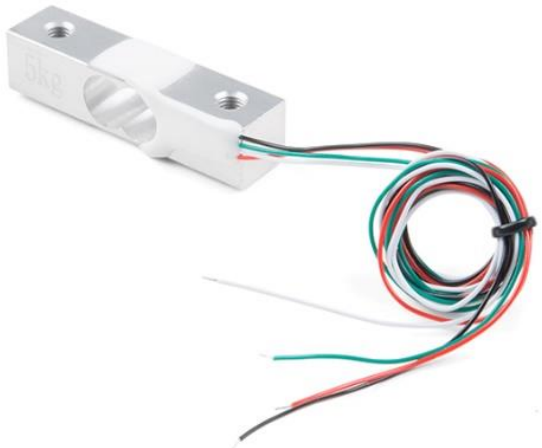

Figure 66 : Load Cell

Source: Phidget

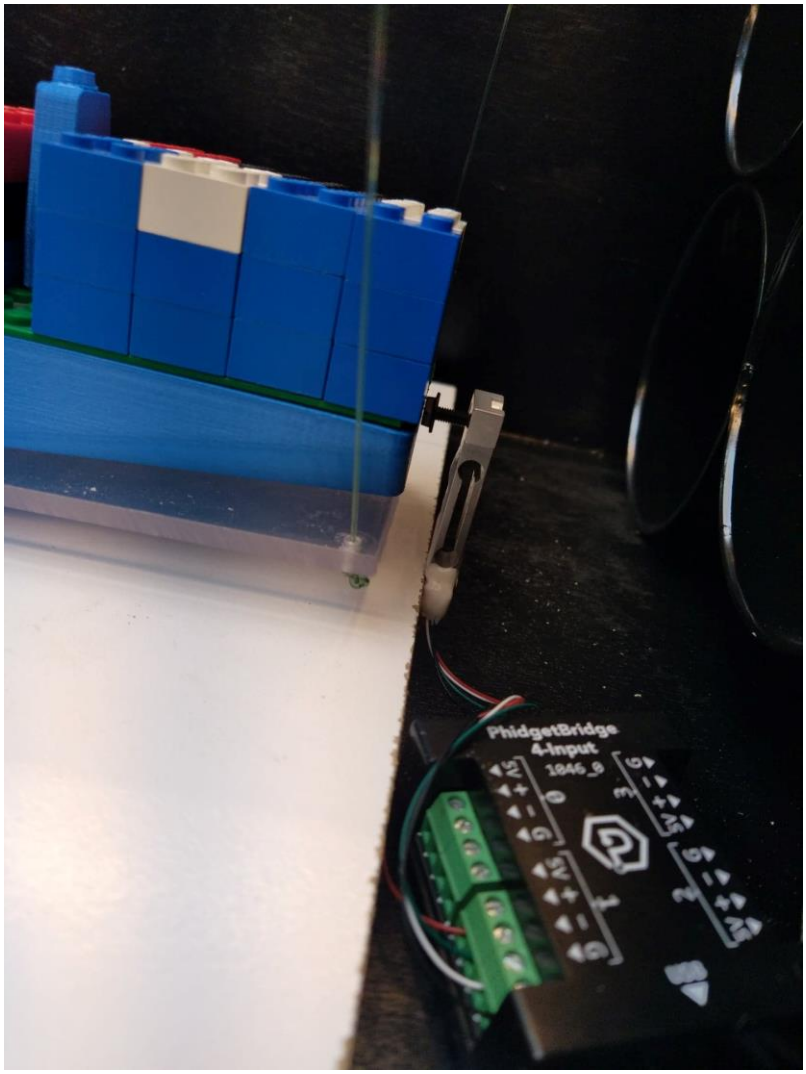

Figure 67 : Capteur en Soufflerie

Source : Propre Travail

Comme illustré sur la Figure 67, le capteur est situé à la poupe de la maquette avec un léger espace afin de ne pas fausser les résultats.

Grâce au logiciel d'exploitation Phidget, nous pouvons avoir une lecture en temps réel des données expérimentales : soit sous forme de graphique, soit sous forme numérique. Nous pouvons également enregistrer ces résultats sous forme de tableau Excel. Cela permet d'avoir une lecture précise des valeurs après l'expérience. Les intervalles de données sont également variable.

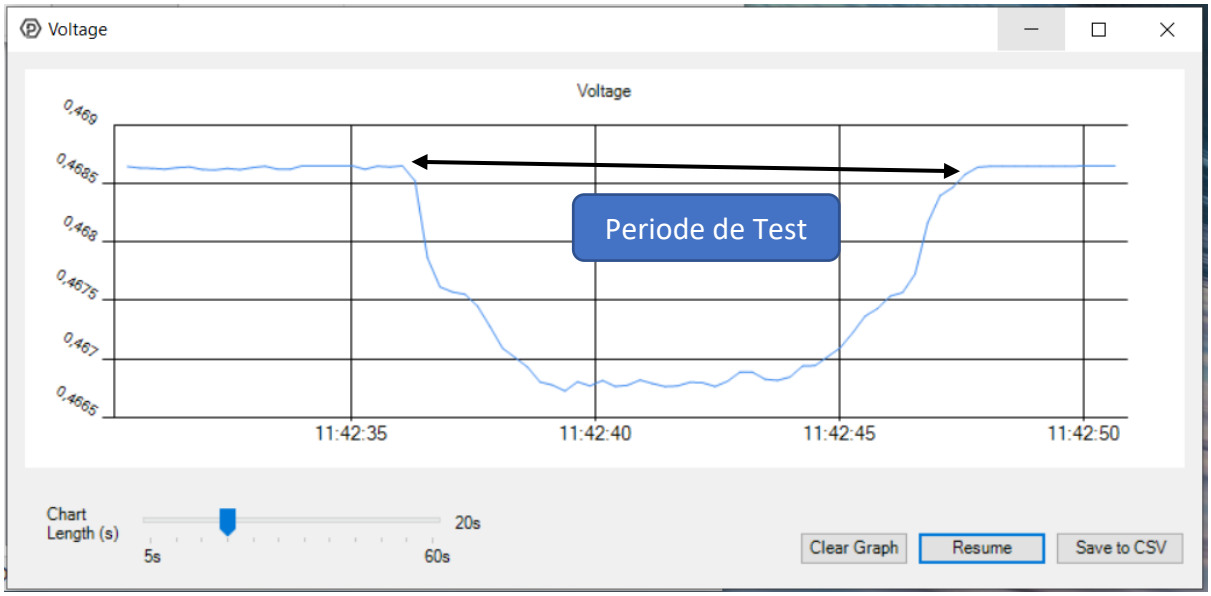

Figure 68 : Graph Test Load Cell

Source : Propre Travail

140	2021/03/02 16:58:15.559,7,4852258E-05
141	2021/03/02 16:58:16.169,7,3329546E-05
142	2021/03/02 16:58:16.778,7,3682517E-05
143	2021/03/02 16:58:17.387,7,5951219E-05
144	2021/03/02 16:58:17.996,7,6251104E-05
145	2021/03/02 16:58:18.606,7,4745156E-05
146	2021/03/02 16:58:19.215,7,4111857E-05
147	2021/03/02 16:58:19.825,7,2313473E-05
148	2021/03/02 16:58:20.434,7,431861E-05
149	2021/03/02 16:58:21.043,7,1682036E-05
150	2021/03/02 16:58:21.637,7,4526295E-05
151	2021/03/02 16:58:22.247,7,5354241E-05
152	2021/03/02 16:58:22.856,7,564202E-05
153	2021/03/02 16:58:23.466,7,6056458E-05
154	2021/03/02 16:58:24.075,7,5102784E-05
155	2021/03/02 16:58:24.684,7,7309087E-05
156	2021/03/02 16:58:25.293,7,8429468E-05

Figure 69 : Tableau de Mesure

Source : Propre Travail

Comme observé : plus la force augmente, plus la valeur lue diminue.

Un autre outil de mesure important est le micro manomètre. Celui-ci nous permet de mesurer de très fines variations de pression. Un tube est connecté à la tétine visible à droite de la Figure 68, il nous permet de prendre la pression à un endroit précis. L'Arduino relié au micro manomètre nous permet d'avoir une lecture similaire au Phidget Bridge.

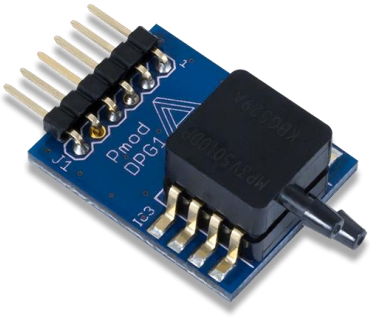

Figure 70 : Micro Manomètre

Source : Propre Travail

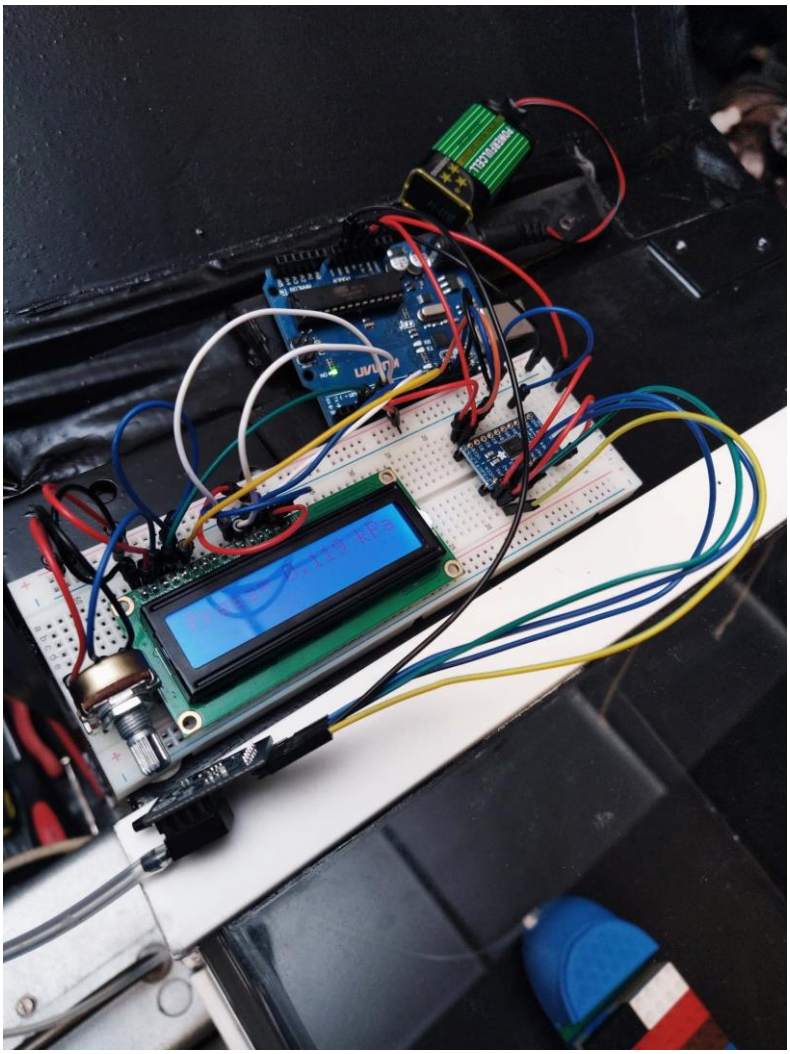

Figure 71 : Mesures Trainée de Pression

Source : Propre travail

CHAPITRE 8

8. Résultats en Soufflerie

Pour effectuer les mesures de résistance à l'air, nous avons utilisé un capteur de force de type Load Cell comme mentionné dans le chapitre précédent.

Nous avons effectué des mesures à plusieurs vitesses 20, 30 et 60 Km/h.

Les résultats sont observables dans les tableaux suivants.

La Valeur du capteur est de -1.81^{E}-04 pour une force nulle.

20kmh

Porte-Conteneurs BASE	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,20E-04	-2,05E-04	-2,10E-04

Porte-Conteneurs BASE + Formes	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,25E-04	-1,90E-04	-2,00E-04

Porte-Conteneurs Deflecteur	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,05E-04	-1,88E-04	-2,11E-04

Porte-Conteneurs Château Avant	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL	CHARGEMENT REEL + Side Guards
VALEUR	-1,88E-04	-1,82E-04	-2,12E-04	-1,94E-04

Tableau 1 : Mesures Résistance 20 Km/h

Source : Propre Travail

30kmh

Porte-Conteneurs BASE	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,52E-04	2,32E-04	-2,48E-04

Porte-Conteneurs BASE + Formes	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,55E-04	-2,23E-04	-2,42E-04

Porte-Conteneurs Deflecteur	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-2,45E-04	-2,16E-04	-2,43E-04

Porte-Conteneurs Château Avant	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL	CHARGEMENT REEL + Side Guards
VALEUR	-2,05E-04	-2,08E-04	-2,39E-04	-2,21E-04

Tableau 2 : Mesures Résistance 30 Km/h

Source : Propre Travail

60 kmh

Porte-Conteneurs BASE	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	4,16E-04	-4,04E-04	-4,10E-04

Porte-Conteneurs BASE + Formes	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-4,15E-04	-3,88E-04	-4,04E-04

Porte-Conteneurs Deflecteur	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL
VALEUR	-3,75E-04	-3,67E-04	-3,92E-04

Porte-Conteneurs Château Avant	FULL	CHARGEMENT OPTI	CHARGEMENT REEL	CHARGEMENT REEL + Side Guards
VALEUR	-3,20E-04	-3,41E-04	-3,85E-04	-3,72E-04

Tableau 3 : Mesures Résistance 60 Km/h

Source : Propre Travail

Tous les paramètres étudiés dans les chapitres précédents sont représentés dans les Tableaux 1 à 3. Nous pouvons constater que les résultats sont cohérents avec une augmentation de la force en fonction des conditions qui dégradent l'aérodynamisme de notre maquette.

Plusieurs conclusions sont déductibles de ces tableaux.

Nous remarquons notamment que :

- Les variations ne sont pas exponentielles : à quelques exceptions près elles sont Proportionnelles.

- Un chargement optimisé permet une réduction de la résistance à l'air d'environ 10% à 60 km/h et 40% à 30km/h comparé à un chargement réel.

- Un chargement réel oppose moins de résistance à l'air qu'un chargement Full Stack sur un porte-conteneurs « de base ».

- Une différence de 40% est visible entre le porte-conteneurs « de base » full est le porte-conteneurs « château avant » full .

Les mesures prises à l'aide du micro manomètre nous permettent de vérifier ce que nous avions vu précédemment concernant la trainée de pression. Nous pouvons également constater que la trainée de pression sur le chargement réel est assez faible. Ceci permet d'expliquer les différences constatées sur le porte-conteneurs « de base » dans les tableaux précédents.

Porte-Conteneurs BASE	FULL
VALEUR	0,100 Kpa

Porte-Conteneurs BASE	CHARGEMENT REEL
VALEUR	0,08 Kpa

Porte-Conteneurs Deflecteur	FULL
VALEUR	0,72 Kpa

Porte-Conteneurs Château Avant	FULL
VALEUR	0,03 Kpa

Tableau 4 : Mesures Trainée de Pression

Source : Propre Travail

CHAPITRE 9

9. Calculs

Le rendement moyen des moteurs de navire est de 55%. Le rendement moyen des hélices marines est de 60%. Le rendement énergétique de propulsion de notre navire est donc de 33%.

Selon des sources navigantes un navire de ce type consomme 200 tonnes par jour dont 67% est une consommation fixe puisque notre rendement est de 33%. Selon Aage (1968), la résistance aérodynamique représente 10% des forces totales appliquées sur un navire.

En ce sens, la résistance aérodynamique représente 6.6 tonnes sur la consommation totale du navire. Nos résultats nous montrent une réduction jusqu'à 40% de la résistance à l'air, ce qui représente une réduction de la consommation de 2.65 tonnes.

Soit une diminution de la consommation totale de 1.35%.

CHAPITRE 10

10. Conclusion

Grâce à la conception 3D, il est possible de réaliser des navires de différentes tailles et avec différentes caractéristiques techniques. Les plans de construction et de chargement sont modifiables à l'infini. Une étude en soufflerie virtuelle de type CFD permet par la suite de visualiser l'influence de la structure et du chargement du navire sur l'écoulement de l'air.

Ainsi, grâce aux différents rendus, nous pouvons nous faire une idée de l'aérodynamisme d'une configuration particulière. C'est ainsi que nous avons sélectionné les modèles qui avaient les résultats les plus prometteurs. Cependant le logiciel Autodesk CDF ne permet pas d'avoir une lecture de données pour ce qui concerne la résistance.

Les modèles réalisés sur Inventor sont compatibles avec l'impression 3D. Une maquette à l'échelle 1/800 a de fait été réalisée afin d'effectuer des mesures en soufflerie.

Nous avons eu la chance de travailler à deux sur la remise à niveau de la soufflerie : deux sujets de mémoire en avaient la nécessité pour effectuer des relevés cette année.

Les mesures effectuées en soufflerie sont assez concluantes et confirment dans l'ensemble les résultats observés sur ordinateur à l'aide de CFD.

Une baisse de 40% des forces exercées sur notre maquette est observée entre certaines configurations (dans les mêmes conditions). Ces résultats nous ont permis d'effectuer un calcul afin d'estimer quelles économies de carburant seraient possibles.

Nous avons démontré qu'une économie de 2.65 tonnes de carburant par jour était possible, dans des conditions optimales, soit 1.35% de la consommation totale d'un navire de cette taille.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que grâce à l'optimisation aérodynamique des porte-conteneurs il est théoriquement possible de diminuer la consommation de carburant.

Cependant, la part de l'aérodynamisme étant assez faible comparée à l'hydrodynamisme, les économies de carburant possibles restent assez faibles.

Si des améliorations sont faites au niveau de l'hydrodynamisme alors la part de l'aérodynamisme augmentera dans la balance totale des forces exercées sur le navire.

Ainsi, il deviendra probablement rentable de s'intéresser à l'aérodynamisme.

Bibliographie

Aage. 1968. « Wind Power in Ships ».

« Albatros L-24a D.Va ». 1918. 1918. https://1000aircraftphotos.com/Contributions/GauthierDavidJ/12553.htm.

Andersson, G.O. 1978. « Untersuchung der Fahrtverluste durch Wind und Seegang bei einem schnellen Einschrauben-Containerschiff (Investigation of the Speed Loss in Wind and Seaway of a Fast Single Screw Container Ship) ». *Bundesministerium für Forschung und Technologie, Meerestechnik, Berlin, Allemagne*.

Blenderman. 1995. « Estimation Of Wind Load on Ships In Wind With a Strong Gradient ».

« Blerio XI Collection Sandrine Senechal, 1913 ». 1913. 1913. http://albindenis.free.fr/Site_escadrille/debut_aviation_militaire5.htm.

« Bonhams ». 2017. 2017. https://www.bonhams.com/.

« Bugatti Type 57 SC Atlantic ». 2020. 2020. https://www.bugatti.com/fr/media/news/2019/icone-de-style-la-bugatti-type-57-sc-atlantic/.

« CMA CGM ». 2020. 2020. https://www.cma-cgm.fr/.

« France - divers dirigeables aviation des années 1900 1920 ». 2018. Catawiki. 2018. https://www.catawiki.eu/l/35783195-france-divers-dirigeables-aviation-des-annees-1900-1920-cartes-postales-ensemble-de-30-1910-1930.

« Home - ShipSpotting.com - Ship Photos and Ship Tracker ». 2021. 2021. http://shipspotting.com/.

« HUGO BOSS ». 2019. 2019. /fr/news/news/le-nouveau-hugo-boss-enfin-revele.

« Innauguration CMA CGM ». 2019. Les Echos. 6 septembre 2019. https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/cma-cgm-trace-sa-route-sans-encombre-1129686.

« Laboratoire Aerodynamique Eiffel ». 2020. 2020. https://www.aerodynamiqueeiffel.fr/story.php.

Larousse, Éditions. s. d. « Définitions : aérodynamique - Dictionnaire de français Larousse ». Consulté le 14 octobre 2020. https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/a%C3%A9rodynamique/1300.

Le Monde.fr. 2018. « CMA CGM », 6 septembre 2018. https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/09/06/cma-cgm-est-pret-a-une-nouvelle-grande-acquisition_5351073_3234.html.

« Le site français de la marine marchande ». 2021. 2021. http://www.marine-marchande.net/.

« LES FORCES AERODYNAMIQUES ». 2020. 2020. http://www.grandvol.com/FFP-manuel/mv_03.htm.

Majidian, Hamed, et Farhood Azarsina. 2018. « Aerodynamic Simulation of A Containership to Evaluate Cargo Configuration Effect on Frontal Wind Loads ». *China Ocean Engineering* 32 (2): 196-205. https://doi.org/10.1007/s13344-018-0021-1.

« MSC Gülsün, World’s Largest Container Ship, Arrives at the Port of Rotterdam ». 2019. Port of Rotterdam. 3 septembre 2019. https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/msc-gulsun-worlds-largest-container-ship-arrives-at-the-port-of-rotterdam.

« Physics Stack Exchange ». 2020. Physics Stack Exchange. 2020. https://physics.stackexchange.com/.

« Ses ouvrages: Association des descendants de Gustave Eiffel ». 2020. 2020. http://www.gustaveeiffel.com/ouvrage/laboratoire_aerodynamique.html.

« Soufflerie Volvo ». 2016. 2016. https://www.volvotrucks.fr/fr-fr/news/magazine-online/2016/jun/inside-volvo-ditching-the-drag.html.

Van Berlekom, W.B. 1981. « Wind Forces on Modern Ship Forms—Effects on Performance ». *Swedish Maritime Research Centre, Göteborg, Sweden*.

Van He, Ngo, Keisuke Mizutani, et Yoshiho Ikeda. 2019. « Effects of Side Guards on Aerodynamic Performances of the Wood Chip Carrier ». *Ocean Engineering* 187 (septembre): 106217. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106217.