

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

PAR
Xavier GROSSMANN

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN SYSTÈME D'HYDROFOILS POUR UN
CATAMARAN DE SPORT DE 20 PIEDS

MONTRÉAL, LE 8 FEVRIER 2016



Xavier GROSSMANN, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Simon Joncas, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Patrick Terriault, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 2 FEVRIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Tous les domaines technologiques sont guidés par la volonté d'aller toujours plus loin. Le domaine de la voile n'a pas échappé à cette tendance et de nombreuses recherches ont été effectuées sur les formes des coques, des dérives, des voiles, etc. L'utilisation des ordinateurs a permis de faire des calculs aérodynamiques et hydrodynamiques de plus en plus poussés, créant des navires extrêmement perfectionnés à une, deux ou trois coques.

Les monocoques à voile, catégorie la plus répandue à l'époque, ont rapidement atteint leurs vitesses limites, car leur surface mouillée est plus importante que celle d'un catamaran (deux coques) ou d'un trimaran (trois coques). Les catamarans et les trimarans ont été développés afin de réduire cette surface mouillée, tout en augmentant considérablement la puissance de la voile grâce à leurs largeurs fournissant une plus grande stabilité.

Présentement, la nouvelle tendance est le développement d'*hydrofoils*, une sorte de dérive portante qui soulève la coque grâce à une forme hydrodynamique générant une force verticale. Les *hydrofoils* existent depuis longtemps, mais sont revenus au-devant de la scène lors de la coupe de l'America et de la Coupe Louis-Vuitton de 2013. En effet, une faille dans le règlement de ces Coupes a permis aux AC72, immenses catamarans de 72 pieds, d'utiliser des *hydrofoils* validant ainsi le concept et faisant rêver des milliers de marins par le fait même. Depuis, les *hydrofoils* sont de plus en plus présents sur tous les marchés nautiques.

REMERCIEMENTS

Les remerciements sont pour moi une partie très importante d'un mémoire. Ils mettent le projet en relief et dévoilent des détails croustillants du contexte du mémoire. C'est pourquoi je porte un grand soin à remercier les personnes qui suivront.

Mes premiers remerciements s'adressent à mon directeur de recherche Simon Joncas. Je lui suis vraiment reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un tel projet multidisciplinaire. Son soutien et sa présence m'ont permis de m'accomplir autant dans le cadre de ma maîtrise que dans le cadre du projet catamaran CLASS-C qui englobe le présent mémoire. Sa disponibilité, sa confiance et surtout la liberté qu'il m'a accordée tout au long du projet ont été une réelle source de passion et de motivation ces deux dernières années.

Je tiens vraiment à remercier Julien Chaussée. Son expérience dans les anciennes campagnes de catamarans CLASS-C en tant que membre de l'équipe britannique d'INVICTUS et ses expertises ont été une ressource inestimable pour mon mémoire. Les moments passés durant nos fins de semaine à discuter des comportements des catamarans sur *hydrofoils* donnent tout son sens à ce projet.

La durée du projet, ses défis et la compétition ont donné un réel sens à l'expression « le temps presse ». Je remercie donc François Michaud, M. Sc. A, d'avoir passé de nombreuses soirées à travailler avec moi sur l'analyse et l'optimisation structurale composite des dérives portantes. Son expertise m'a permis de gagner un temps précieux.

Je désire aussi remercier le maître d'enseignement, Idriss Ammara, pour sa disponibilité, son dynamisme et sa curiosité. En effet, nous avons développé ensemble la fonction MATLAB permettant de calculer la poussée d'Archimède. De plus, sa confiance m'a permis de travailler des mois entiers dans les locaux des enseignements généraux.

VIII

Je tiens à remercier Yannick et Yves Sansoucy, qui sont les partenaires industriels de ce mémoire. Ils n'ont pas hésité à partager leur savoir-faire pour nous aider à fabriquer les *hydrofoils*.

Je remercie très chaleureusement ma compagne pour son support tout au long de ce projet. J'espère pouvoir lui être d'un aussi grand support dans ses propres projets.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au projet catamaran CLASS-C de l'École de technologie supérieure. Concevoir, fabriquer et tester un catamaran de type CLASS-C en 18 mois a demandé d'énormes sacrifices pour tout le monde, mais l'expérience acquise est inestimable. Ce projet a été pour un bon nombre d'entre nous extraordinaire. Je suis fier dans mon rôle de co-capitaine d'avoir vécu cette expérience avec toutes ces personnes formidables. J'espère réellement que le projet continuera dans les prochaines années.

Mes remerciements les plus chaleureux sont destinés à mes parents et aux membres de ma famille. Leur soutien tout au long de ma maîtrise a permis de donner un autre sens à mon éloignement.

Mes derniers remerciements sont pour tous les Québécois que j'ai pu rencontrer au cours de ma maîtrise. Leur accueil chaleureux, leur dynamisme et la belle province ont réellement été un coup de cœur.

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN SYSTÈME D'HYDROFOILS POUR UN CATAMARAN DE SPORT DE 20 PIEDS

Xavier GROSSMANN

RÉSUMÉ

Actuellement, les systèmes d'*hydrofoils* sont en train de révolutionner le monde de la voile grâce aux gains de vitesse et de stabilité, repoussant toujours plus loin les limites de la navigation. Ce projet présente donc le développement, la conception et la fabrication d'un système d'*hydrofoils* pour un catamaran de sport de 20 pieds.

D'abord, la géométrie de la dérive portante et des safrans porteurs ont été définis grâce à un modèle dynamique SimMechanics développé pour étudier l'influence de la géométrie des *hydrofoils* sur la vitesse de décollage et la stabilité du catamaran. En privilégiant le meilleur compromis entre la vitesse de décollage et la stabilité, le choix de la géométrie finale a permis de connaître les efforts sur le système.

Ensuite, une méthode d'optimisation structurale de pièces composites composée de trois étapes a été utilisée pour dimensionner la dérive portante selon un cas de chargement courant et limite dont l'objectif était de minimiser la masse tout en limitant la déformation. La première étape d'optimisation dimensionnelle libre consistait à définir les zones les plus sollicitées. La seconde étape affinait les différentes zones en intégrant les données de fabrication. Enfin, la troisième étape optimisait l'ordre des plis pour faciliter la fabrication. L'expertise acquise lors de la conception de la dérive portante a permis de valider le laminé défini pour le safran porteur.

Au final, après la fabrication d'un système prototype complet d'*hydrofoils*, des essais ont été faits sur l'ESPADON 20 fabriqué par Mystère Composites, puis sur le catamaran CLASS-C RAFALE fabriqué par un groupe d'étudiants de l'École de technologie supérieure. Globalement, le modèle dynamique avait prédit une vitesse de décollage proche de celle observée sur l'ESPADON 20, et le CLASS-C a également décollé dans les conditions de vent estimées et a pu atteindre 26.7 nœuds sur le Lac Léman à Genève lors de la Little Cup.

Mots-clés : *Hydrofoils*, catamaran, composite, optimisation structurale, modèle dynamique, voile.

DESIGN AND MANUFACTURING OF HYDROFOIL SYSTEM FOR A 20 FEET SPORT CATAMARAN

Xavier GROSSMANN

ABSTRACT

Currently, hydrofoil systems are revolutionizing the world of sailing through gains in speed and stability, always pushing further the limits of navigation. This project presents the development, design and manufacturing of a hydrofoil and rudder systems for a 20 feet sport catamaran.

First, the geometry of hydrofoil and rudder systems were defined using a SimMechanics dynamic model developed to study the influence of the geometry of the hydrofoils on the take-off speed and stability of the catamaran. By favoring the best compromise between the take-off speed and stability, the choice of the final geometry allowed us to evaluate loads on the system.

Then, a three-step optimization method was used with the minimization of the composite mass as an objective while limiting the deformation. The first step based on a free-size method to define the most stressed areas. The second step refined the different areas by integrating the manufacturing data. Finally, the third step optimized the order of plies in the composite laminate to facilitate the manufacturing. The expertise acquired during the design of the hydrofoils allowed us to validate the laminate of rudders.

Finally, a prototype hydrofoil and rudder systems was manufactured. Then, it was tested on the ESPADON 20 manufactured by Mystere Composites, and then on the C-CLASS RAFALE catamaran manufactured by a group of students from the *École de technologie supérieure*. Overall, the composite structure was validated and the dynamic model showed that it could accurately predict take-off speed on both catamarans. A top speed of 26,7 knots was also recorded during 27th Little Cup held on lake Geneva in September 2015 with the C-CLASS catamaran.

Keywords : Hydrofoils, catamaran, composite, structural optimization, dynamic model, sailing.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MISE EN SITUATION	5
1.1 Historique.....	5
1.1.1 Hydrofoils	5
1.1.2 Catamarans CLASS-C	8
1.2 Le projet catamaran CLASS C	11
1.2.1 Généralités	11
1.2.2 Caractéristique d'un catamaran de type CLASS-C	12
1.2.3 Cahier des charges du projet	13
CHAPITRE 2 PRINCIPES DE LA NAVIGATION À VOILE.....	15
2.1 Définitions de la composition d'un bateau à voile, des différents principes, et des termes de la navigation à la voile.....	15
2.1.1 Bateau à voile.....	15
2.1.2 Angles de gîte, tangage et lacet.....	16
2.1.3 Dérive d'un bateau à voile	17
2.1.4 Allures et trajectoires d'un bateau à voile.....	18
2.1.5 Vent réel et vent apparent	20
2.2 Définition des efforts sur les différents éléments d'un bateau à voile	22
2.2.1 Aile rigide ou voiles souples.....	22
2.2.1.1 Écoulement du vent sur une aile rigide ou voile souple	22
2.2.1.2 Aile rigide VS voiles souples.....	23
2.2.2 Coque	24
2.2.2.1 Poussée d'Archimède.....	24
2.2.2.2 Trainée	26
2.2.3 Dérive ou quille.....	28
2.2.4 Résumé des efforts sur un catamaran.....	28
CHAPITRE 3 REVUE DES CONCEPTS ET DES PARAMÈTRES DE BASE DE LA CONCEPTION D'HYDROFOILS	31
3.1 Comportement d'un bateau sur <i>hydrofoils</i>	31
3.1.1 Différentes géométries	31
3.1.2 Efforts hydrodynamiques.....	33
3.1.3 Effet de la dérive du catamaran, de la profondeur de la dérive portante et de l'angle de cant sur la stabilité de vol.....	36
3.1.3.1 Effet de la dérive du bateau sur la stabilité.....	36
3.1.3.2 Effet de la profondeur de la dérive portante	40
3.1.3.3 Résumé du comportement.....	41
3.1.4 Effet de l'angle de <i>cant</i> θ de la dérive portante sur la dérive.....	42
3.1.5 Choix du profil hydrodynamique.....	44

	3.1.5.1	Plage du nombre de Reynolds.....	44
	3.1.5.2	Profil H105 de T. Speer	45
3.1.6		Choix de la géométrie	46
	3.1.6.1	Formes actuelles des <i>hydrofoils</i>	46
3.2		Modélisation des <i>hydrofoils</i>	48
3.2.1		Modélisation de la dérive portante.....	49
	3.2.1.1	Géométrie globale.....	49
	3.2.1.2	Géométrie de l'aile de la dérive portante.....	50
3.2.2		Modélisation des safrans porteurs.....	51
	3.2.2.1	Géométrie globale.....	51
	3.2.2.2	Géométrie de la partie 2.....	52
	3.2.2.3	Géométrie de l'aile.....	53
	3.2.2.4	Géométrie de la liaison entre l'aile et la partie verticale du safran porteur	54
CHAPITRE 4		MODÈLE DYNAMIQUE DU CATAMARAN SUR HYDROFOILS SOUS MATLAB SIMMECHANICS.....	55
4.1		Objectifs, limitations et configurations testées	55
	4.1.1	Objectifs.....	55
	4.1.2	Limitations	57
	4.1.3	Description des variables	59
	4.1.4	Variables étudiées	60
4.2		Développement du modèle SimMechanics du catamaran	61
	4.2.1	Structure et variables du modèle.....	61
	4.2.1.1	Description des éléments	61
	4.2.1.2	Interface du modèle.....	63
	4.2.1.3	Gestion des degrés de liberté du catamaran.....	64
	4.2.1.4	Gestion de l'assemblage des différents éléments du catamaran du modèle	65
	4.2.1.5	Gestion des variables de conceptions et des variables de configuration	67
	4.2.2	Caractéristiques dimensionnelles des différents éléments du catamaran ESPADON 20 de MC et du catamaran CLASS-C.....	68
	4.2.3	Implémentation et gestion des efforts sur les différents éléments	69
	4.2.3.1	Efforts sur les coques.....	69
	4.2.3.2	Efforts sur la dérive portante.....	74
	4.2.3.3	Efforts sur le safran porteur	77
	4.2.3.4	Efforts sur l'aile rigide.....	81
	4.2.3.5	Efforts de l'équipage.....	82
4.3		Résultats et Analyses	84
	4.3.1	Visualisation du modèle 3D du catamaran	84
	4.3.2	Influences des variables de conception et de configuration.....	86
	4.3.2.1	Influence sur vitesse de décollage et vitesse maximale de stabilité	86

4.3.2.2	Influence de configuration sur les efforts générés par la dérive portante à 10 nœuds	90
4.3.2.3	Influence de la masse du catamaran sur la vitesse de décollage	93
4.3.2.4	Analyse de la vitesse et de l'accélération du catamaran pour une configuration donnée	94
4.3.2.5	Analyse des efforts sur la dérive portante.....	95
4.3.2.6	Analyse des efforts sur un safran porteur	96
4.3.3	Choix de la forme finale des <i>hydrofoils</i> et configurations optimales	99
4.3.4	Cas de chargement sur les <i>hydrofoils</i>	101
CHAPITRE 5	ANALYSE ET OPTIMISATION STRUCTURALES COMPOSITES..	103
5.1	Revue de littérature	103
5.1.1	Formulation et résolution générale d'un problème d'optimisation.....	103
5.1.2	Optimisation structurale.....	105
5.1.3	Optimisation des structures en composite.....	107
5.1.4	Critère de rupture en composite Tsai-Wu.....	108
5.2	Optimisation composite de la dérive portante	109
5.2.1	Processus d'optimisation structurale.....	109
5.2.2	Géométrie et maillage	110
5.2.3	Conditions aux limites et cas de chargements	112
5.2.4	Matériaux utilisés.....	115
5.2.5	Optimisation dimensionnelle libre.....	116
5.2.5.1	Fonction objective.....	116
5.2.5.2	Résultats.....	117
5.2.6	Optimisation dimensionnelle	118
5.2.6.1	Fonction objective.....	118
5.2.6.2	Résultats.....	119
5.2.6.3	Simplification du modèle.....	120
5.2.7	Optimisation de l'empilement des plis	121
5.2.8	Résultats.....	123
5.3	Analyse des safrans porteurs.....	125
5.3.1	Géométrie et maillage	126
5.3.2	Conditions limites et cas de chargements	127
5.3.3	Définition du laminé	129
5.3.4	Analyses et validation	130
CHAPITRE 6	FABRICATION ET ESSAIS DES HYDROFOILS.....	133
6.1	Fabrication de pièces composites.....	133
6.1.1	Types de moules	133
6.1.2	Procédés de fabrication	134
6.2	Modèles et moules de la dérive portante et des safrans porteurs.....	138
6.2.1	Procédé de fabrication utilisé pour les <i>hydrofoils</i>	138
6.2.2	Modèles et moules des dérives portantes.....	139
6.2.3	Modèles et moules des safrans porteurs.....	141

6.3	Essais des <i>hydrofoils</i>	144
6.3.1	Premiers essais sur l'ESPADON 20	144
6.3.2	Essais sur le CLASS-C	145
CONCLUSION		151
RECOMMANDATIONS		153
ANNEXE I	DÉFINITION DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE SUR UN PROFIL ET UNE AILE FINIE	155
ANNEXE II	COORDONNÉES DES POINTS DU PROFIL H105 DE T. SPEER	161
ANNEXE III	TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER POUR $Re = 5,0 \times 10^5$ ET $Re = 1,0 \times 10^6$	163
ANNEXE IV	TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER POUR $Re = 3,0 \times 10^6$ ET $Re = 6,0 \times 10^6$	167
ANNEXE V	TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER	169
ANNEXE VI	CONFIGURATIONS TESTÉES	171
ANNEXE VII	PROGRAMME MATLAB POUR CALCULER LA POUSSÉE D'ARCHIMEDE	173
ANNEXE VIII	LECTURE D'UN FICHIER AU FORMAT .STL	179
ANNEXE IX	CARACTERISTIQUE HYDRODYNAMIQUE DE LA FORCE DE GOUVERNE DES SAFRANS PORTEURS	181
ANNEXE X	CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR L'OPTIMISATION	185
BIBLIOGRAPHIE		187

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Records de vitesse sur 500 mètres (m) des bateaux à voile7
Tableau 3.1	Comparaison des formes d' <i>hydrofoils</i> les plus répandues33
Tableau 4.1	Variables de conception des <i>hydrofoils</i>59
Tableau 4.2	Variables de configuration des <i>hydrofoils</i>60
Tableau 4.3	Configurations testées61
Tableau 4.4	Caractéristiques des éléments du catamaran ESPADON 20 et du CLASS-C69
Tableau 4.5	Dimensions finales des <i>hydrofoils</i>100
Tableau 4.6	Configurations optimales100
Tableau 5.1	Résumé des contraintes d'optimisation115
Tableau 5.2	Séquence d'empilement des plis et épaisseur pour les différentes zones de la dérive portante122
Tableau 5.3	Séquence d'empilement des plis pour les différentes zones du safran porteur130

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Navire militaire Américain PCH-16
Figure 1.2	Catamaran AC72 sur <i>hydrofoils</i> de l'équipe Nouvelle-Zélande8
Figure 1.3	Catamarans CLASS-C finalistes lors de la LC en 201310
Figure 1.4	Catamaran Class-C conçu et fabriqué par les étudiants du projet en juin 2015.....12
Figure 2.1	Composition d'un bateau à voile monocoque16
Figure 2.2	Angles d'inclinaison d'un bateau à voile17
Figure 2.3	Dérive d'un bateau à voile sous l'effet du vent.....18
Figure 2.4	Allures d'un bateau à voile.....19
Figure 2.5	Influence de la performance de l'angle minimum au près sur les performances lors d'une course20
Figure 2.6	Caractérisation du vent apparent par rapport au vent réel.21
Figure 2.7	Forces générées par l'écoulement du vent sur une aile rigide ou des voiles souples.....22
Figure 2.8	Équilibre d'une coque dans différentes situations25
Figure 2.9	Équilibre d'un catamaran26
Figure 2.10	Schéma des forces sur un catamaran courant - vue arrière29
Figure 2.11	Schéma des forces sur un catamaran courant - vue de dessus30
Figure 3.1	Comparaison de l'effet de la stabilité sur la vitesse d'un bateau à <i>hydrofoils</i>32
Figure 3.2	Formes d' <i>hydrofoils</i> étudiées par T. Speer34
Figure 3.3	Effet de la dérive sur un <i>hydrofoil</i> en T37
Figure 3.4	Effet de la dérive sur une dérive portante en L.....38

Figure 3.5	Influence de la profondeur de l' <i>hydrofoil</i> sur la stabilité de vol	41
Figure 3.6	Influence de l'angle de <i>cant</i> θ sur la dérive.....	43
Figure 3.7	Évolution du nombre de Reynolds Re en fonction de la vitesse d'écoulement pour les longueurs caractéristiques $L_c = 0,1m$, $L_c = 0,2m$ et $L_c = 0,3m$	45
Figure 3.8	Profil H105 de T. Speer	46
Figure 3.9	Schéma présentant les différentes parties des <i>hydrofoils</i>	48
Figure 3.10	Variables de conception de la dérive portante	50
Figure 3.11	Modélisation de l'aile de la dérive portante	51
Figure 3.12	Variables de conception du safran porteur.....	52
Figure 3.13	Aile du safran porteur	53
Figure 3.14	Liaison entre l'aile et la partie 2 verticale du safran porteur	54
Figure 4.1	Axes de références	57
Figure 4.2	Blocs de SimMechanics	62
Figure 4.3	Interface de la base du modèle SM du catamaran.....	64
Figure 4.4	Gestion des degrés de liberté du catamaran.....	65
Figure 4.5	Assemblage des différents éléments du catamaran dans le modèle SimMechanics	67
Figure 4.6	Interface utilisateur pour modifier les variables de configuration	68
Figure 4.7	Résultats du programme de calcul de la poussée d'Archimède pour une hauteur d'eau passant par le CG de la coque ($z = 0$) et pour des angles nuls	72
Figure 4.8	Résultats du programme de calcul de la poussée d'Archimède pour une hauteur d'eau passant par le CG de la coque ($z = 0$), angle de roulis nul et 3° en angle de tangage	72
Figure 4.9	Évolution de la poussée d'Archimède sur les coques en fonction de la vitesse.....	73
Figure 4.10	Évolution de la trainée sur les coques et de la profondeur des coques en fonction de la vitesse du catamaran selon l'axe x	74

Figure 4.11	Modélisation de la dérive portante dans le modèle dynamique.....	75
Figure 4.12	Modélisation SimMechanics des efforts sur les différentes parties de la dérive portante.....	76
Figure 4.13	Modélisation du safran porteur dans le modèle SimMechanics	78
Figure 4.14	Modélisation et caractérisation de l'aile du safran porteur sous Xflr5 pour une envergure de 500mm et une vitesse de 10.28 m/s.....	79
Figure 4.15	Résultats de l'analyse de l'aile du safran sous Xflr5 pour une envergure de 500mm et une vitesse de 10.28 et 18 m/s.....	79
Figure 4.16	Modélisation SimMechanics des efforts sur le safran porteur.....	80
Figure 4.17	Vue du dessus du Catamaran du modèle SM.....	83
Figure 4.18	Fonction asservissant le déplacement de l'équipage selon y.....	83
Figure 4.19	Fonction simulant le déplacement de l'équipage selon l'axe x par la création d'un couple.....	84
Figure 4.20	Simulation du catamaran par SimMechanics.....	85
Figure 4.21	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de la corde de la dérive	87
Figure 4.22	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction du rayon de la partie 1 de la dérive portante.....	87
Figure 4.23	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction du rayon du coude (partie 2) de la dérive portante	88
Figure 4.24	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de l'envergure de la dérive portante.....	88
Figure 4.25	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de la profondeur de la dérive portante	89
Figure 4.26	Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de l'angle d'attaque de la dérive pour différent angle de <i>cant</i> de la dérive	90
Figure 4.27	Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de l'angle d'attaque de la dérive portante pour différent angle de <i>cant</i> θ de la dérive portante	91

Figure 4.28	Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de la corde de la dérive portante.....	92
Figure 4.29	Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction du rayon de la partie 1 de la dérive portante.....	92
Figure 4.30	Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction du rayon du coude (partie 2) de la dérive portante	92
Figure 4.31	Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de l'envergure de la dérive portante	93
Figure 4.32	Évolution de la vitesse de décollage en fonction de la masse du catamaran	94
Figure 4.33	Évolution de la vitesse et de l'accélération du catamaran (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7m/s) en fonction du temps	95
Figure 4.34	Évolution des efforts suivant x, y et z sur la dérive portante (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7m/s) en fonction de la vitesse du catamaran suivant x.....	96
Figure 4.35	Évolution des efforts suivant x, y et z sur le safran porteur (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7,0 m/s) en fonction de la vitesse du catamaran suivant x.....	97
Figure 4.36	Évolution de la force de portance F_z calculée grâce à Xflr5 en fonction de l'angle d'attaque α de l'aile du safran porteur	98
Figure 4.37	Évolution de la force de portance F_y calculée grâce à Xflr5 en fonction de l'angle d'attaque α de la partie verticale du safran porteur	99
Figure 5.1	Différentes optimisations structurales.....	106
Figure 5.2	Méthodologie d'optimisation composite suivie.....	110
Figure 5.3	Modèle éléments finis de la dérive portante pour l'optimisation	111
Figure 5.4	Position de la dérive portante pour l'optimisation.....	112
Figure 5.5	Cas de chargement sur la dérive portante	115
Figure 5.6	Distribution de l'épaisseur du laminé après l'optimisation dimensionnelle libre [mm].....	117
Figure 5.7	Modèle défini pour l'optimisation dimensionnelle.....	118

Figure 5.8	Évolution de l'épaisseur du laminé de l'extrados lors de l'optimisation dimensionnelle [mm].....	120
Figure 5.9	Évolution de l'épaisseur du laminé de l'intrados lors de l'optimisation dimensionnelle [mm].....	120
Figure 5.10	Identification des zones pour l'empilement.....	121
Figure 5.11	Identification des plis.....	123
Figure 5.12	Déformation et critère de rupture composite pour le cas 1 courant.....	124
Figure 5.13	Déformation et critère de rupture composite pour le cas 2 limite.....	124
Figure 5.14	Flambage de la dérive au mode 1 – $F = 3,63$ avec une déformation multipliée par 750	125
Figure 5.15	Modèle éléments finis du safran porteur.....	126
Figure 5.16	Éléments corps rigide pour la liaison entre l'aile du safran et la partie verticale.....	127
Figure 5.17	Cas de chargement et conditions aux limites du safran porteur.....	128
Figure 5.18	Zones du safran porteur	129
Figure 5.19	Résultats de la déformation et du critère de rupture composite safran porteur pour $F_z = 960\text{N}$ et $F_y = 1530\text{N}$	131
Figure 6.1	Types de moules ouverts.....	134
Figure 6.2	Procédé de fabrication manuel.....	135
Figure 6.3	Procédé d'une compaction sous vide.....	136
Figure 6.4	Procédé d'infusion d'une pièce en composite	137
Figure 6.5	Procédé <i>LRTM</i>	138
Figure 6.6	Section de l'assemblage de moules <i>LRTM</i>	138
Figure 6.7	Modèles mâles en structure d'acier des dérives portantes	139
Figure 6.8	Structure en acier des modèles mâles de la dérive portante.....	140
Figure 6.9	Modèles de la dérive portante tribord	140
Figure 6.10	Moules femelles.....	141

Figure 6.11	CAO des modèles mâles de la partie verticale du safran porteur	142
Figure 6.12	Modèles mâles en aluminium de la partie verticale du safran porteur	142
Figure 6.13	CAO des moules femelles de l'aile du safran porteur	143
Figure 6.14	Moules femelles en aluminium de l'aile du safran porteur.....	143
Figure 6.15	Premiers essais au Lac des Deux Montagnes (Québec) sur l'ESPADON 20	144
Figure 6.16	Vol du catamaran CLASS-C au Lac Saint-Louis (Québec)	146
Figure 6.17	Vol du catamaran CLASS-C au lac Léman (Suisse)	147
Figure 6.18	Choix de la vitesse de décollage pour une coque avec <i>hydrofoils</i>	149

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AML	<i>Angle Minus Longitudinal</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CG	Centre de gravité
CP ou CB	Centre de poussée
EF	Éléments finis
ÉTS	École de technologie supérieure
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
LC	<i>Little Cup</i>
LRTM	<i>Light Resin Transfer Moulding</i>
LWL	Longueur de la ligne d'eau
MC	Mystere Composites
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
RBE	<i>Rigide Body Elements</i>
SM	SimMechanics
STEP	<i>Standard for The Exchange of Product model data</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Variables grecques

μ	Viscosité dynamique [kg/(m·s)]
α	Angle d'attaque [°]
β_{\min}	Angle minimum au près [°]
$\beta_{\text{vent_apparent}}$	Angle entre la direction du vent apparent et l'axe du bateau [°]
$\beta_{\text{vent_réel}}$	Angle entre la direction du vent réel et l'axe du bateau [°]
δ	Déplacement [mm]
θ	Angle de roulis autour de x [°]
θ	Angle de cant [°]
σ	Contrainte [MPa]
λ	Angle de dérive ou lacet autour de z (<i>leeway</i>) [°]
λ_{\min}	Critère de flambage
ρ	Masse volumique [kg/m ³]

Variables latines

AR	<i>Aspect ratio</i>
b	Envergure [m]
c	Corde d'un profil [m]
C _D	Coefficient de trainée
C _{Dfo}	Coefficient de trainée de forme
C _{Dj}	Coefficient de trainée de jonction
C _{Ds}	Coefficient de trainée de projections
C _f	Coefficient de friction
C _{Lα}	Coefficient de portance selon l'angle d'attaque
C _L	Coefficient de portance
C _{L-AR}	Coefficient de portance pour une aile finie
C _M	Coefficient de moment
d	Profondeur [m]
D	Force de trainée [N]
D _f	Trainée de friction [N]
D _{fo}	Trainée de forme [N]
D _i	Trainée de induite [N]
D _j	Trainée de jonction [N]
D _s	Trainée de projection [N]
D _{totale}	Trainée totale [N]
D _v	Trainée de viscosité [N]

D_w	Trainée de vague [N]
E	Facteur d'efficacité
E	Module d'élasticité [MPa]
$E1$	Module d'élasticité longitudinal [MPa]
$E2$	Module d'élasticité transversal [MPa]
G_{12}	Module de cisaillement [MPa]
$F_{\text{Archimede}}$	Force ou poussée d'Archimède [N]
F_{ij}	Composante du tenseur d'efforts [N]
Fr	Nombre de Froude
FS_{min}	Critère de rupture composite
FS_k	Indice de rupture dans la zone k
g	Accélération gravitationnelle [m/s^2]
H	Hauteur [m]
h_c	Cambrure d'un profil
L	Force de portance [N]
L	Longueur [m]
l	Largeur [m]
L_c	Longueur caractéristique [m]
M	Moment [N/m]
$m_{\text{dérive}}$	Masse de la dérive portante [kg]
NE	Nombre d'éléments
N_j	Nombre de jonctions
n_j	Nombre de noeuds
NM	Nombre de modes
NP	Nombre de plis
N_s	Nombre d'éléments sortants de l'eau
NU	Coefficient de poisson
P	Poids [N]
PA	Poussée d'Archimède [N]
Q	Foyer d'un profil
q	Pression dynamique [Pa]
Re	Nombre de Reynolds
S	Surface de référence [m^2]
$S_{\text{mouillée}} \text{ ou } S_w$	Surface mouillée [m^2]
S_{12}	Contrainte en cisaillement [MPa]
t	Épaisseur maximale d'un profil [m]

T_k^U	Épaisseur maximale du laminé [mm]
T_k^L	Épaisseur minimal du laminé [mm]
U_∞	Vitesse d'écoulement
$V_{\text{catamaran}}$	Vecteur vitesse du catamaran
$V_{\text{immergé}}$	Volume immergé [m ³]
$V_{\text{vent_apparent}}$	Vecteur vitesse du vent apparent
$V_{\text{vent_réel}}$	Vecteur vitesse du vent réel
X_t	Critère de rupture suivant x en tension [MPa]
X_c	Critère de rupture suivant x en compression [MPa]
Y_t	Critère de rupture suivant y en tension [MPa]
Y_c	Critère de rupture suivant y en compression [MPa]

Unités de mesure

Degré (angle)	°
Degré celcius	°C
Heure	h
Kilogramme	kg
Kilomètre	km
Mètre	m
Pascal	Pa
Pied	pi
Seconde	s

INTRODUCTION

Les catamarans de type CLASS-C sont les bateaux à voile les plus performants sur des plans d'eau intérieurs avec des vents inférieurs à 20 nœuds. Ils participent au Championnat du monde des CLASS-C, très connu également sous le nom de la *Little Cup* (LC).

Ces catamarans ont beaucoup évolué depuis la création de la compétition. L'utilisation de matériaux composites, la performance de l'aile rigide et depuis 2013, l'implémentation d'*hydrofoils* permettent d'atteindre une vitesse de 35 nœuds dans des vents inférieurs à 20 nœuds. La puissance fournie par l'aile rigide permet au catamaran de lever une coque dès 7-8 nœuds de vent au près tel que constaté à la Little Cup 2015 (MacLane, 2000), et les *hydrofoils* permettent maintenant au catamaran de « voler ». L'utilisation d'*hydrofoils* est en train de révolutionner le monde maritime puisqu'ils permettent de réduire considérablement l'énergie nécessaire pour propulser des navires à vitesse élevée.

Ce domaine n'est pas couvert par la littérature scientifique, cependant de nombreuses recherches sont en cours sur les *hydrofoils* pour améliorer la performance, la stabilité de la phase de vol, et la structure mécanique interne. La trainée générée par les coques dans l'eau limite la vitesse maximale des bateaux archimédiens. L'usage d'*hydrofoils*, d'un point de vue hydrodynamique, permet aux bateaux d'atteindre des vitesses qui étaient jusqu'à présent impossibles. De plus, des *hydrofoils* sont maintenant conçus pour des bateaux de plus en plus imposants : la portance à générer devient rapidement une contrainte pour la structure de l'*hydrofoil* et celle de la coque.

Dans ce contexte, un groupe d'étudiant de l'École de technologie supérieure (ÉTS) a débuté la conception et la fabrication d'un catamaran CLASS-C à l'automne 2013. Ce mémoire s'inscrivait comme la première étape de ce fabuleux projet. Le but des travaux de maîtrise était de développer un ensemble de dérives portantes et safrans porteurs (ensemble nommé *hydrofoils* dans la suite du mémoire) pouvant être utilisés sur un catamaran de 20 pieds (pi), ayant une masse totale (masse du catamaran et de l'équipage) entre 400 et 430 kilogrammes

(kg), ces derniers ont été fabriqués par un partenaire industriel Mystere Composites (MC). La dérive portante droite et une paire de safrans porteurs ont donc été testées sur l'ESPADON 20 de MC une année avant la fin de fabrication du catamaran CLASS-C de l'ÉTS. Ainsi, ces tests ont validé le développement, le comportement et la structure des *hydrofoils* avant de fabriquer la dérive portante gauche.

Moins de deux années plus tard, ce groupe d'étudiants de l'ÉTS a participé à la 27^{ème} édition de la LC, à Genève. Ils obtiennent la 6^{ème} place avec un catamaran volant fonctionnel. La vitesse maximale atteinte grâce aux *hydrofoils* est de 26,7 nœuds dans 10 à 15 nœuds de vent.

Le mémoire est articulé autour de six chapitres. Le côté multidisciplinaire de ce mémoire favorise une revue de la littérature au début des chapitres lorsqu'elle est nécessaire.

Dans le premier chapitre, une description du contexte de l'étude et une présentation des caractéristiques d'un catamaran de type CLASS-C et de l'historique des *hydrofoils* sont faites.

Le deuxième chapitre présente les principes généraux du comportement d'un bateau à voile, et plus particulièrement d'un catamaran. Les forces sur la voile et sur les coques y sont décrites afin d'établir la base du développement du modèle dynamique du catamaran présenté plus loin dans le mémoire.

Le troisième chapitre définit les concepts, les variables et caractéristiques prises en compte pour concevoir des *hydrofoils*. Un modèle CAO paramétrable décrivant les variables de conception est présenté afin de compléter le modèle dynamique du catamaran.

Le quatrième chapitre présente le développement du modèle dynamique du catamaran effectué sur SimMechanics (SM). Le modèle conçu permet d'étudier la vitesse de décollage, la stabilité du catamaran et les efforts hydrodynamiques selon la forme des *hydrofoils* et leurs configurations. Au finale, la géométrie des *hydrofoils* et les cas de chargement y sont définis.

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse et l'optimisation de la structure composite des *hydrofoils*. Le laminé de la dérive portante est optimisé pour minimiser sa masse tout en respectant les critères de dimensionnement pour les cas de chargement définis. Quant aux safrans porteurs, son laminé déterminé par l'expérience acquise est analysé pour observer son comportement par rapport aux cas de chargement déterminés.

Suite à la finalisation de la conception des *hydrofoils*, le sixième chapitre présente sommairement les étapes de la fabrication des *hydrofoils*. Enfin, ce dernier chapitre présente également les résultats observés lors des essais sur l'ESPADON 20 et sur le catamaran CLASS-C construit par le groupe d'étudiant de l'ÉTS. Un retour sur l'expérience acquise pendant la LC de septembre 2015 à Genève est également fait.

Ce chapitre est suivi par la conclusion qui mettra en avant les points importants de ce mémoire et ses réussites. Finalement, une partie recommandation donnera des éléments de recherche supplémentaires.

CHAPITRE 1

MISE EN SITUATION

Ce chapitre présente le contexte dans lequel les *hydrofoils* ont été développés, conçus et fabriqués afin de comprendre les attentes et contraintes de ce projet. Tout d'abord, une première partie présente l'historique des *hydrofoils* et des catamarans CLASS-C. Une seconde partie décrit le projet englobant les travaux de ce mémoire et son cahier des charges.

1.1 Historique

1.1.1 Hydrofoils

Les *hydrofoils* sont apparus au début du 19^{ème} siècle suite à de nombreuses expérimentations. Ces expérimentations avaient comme objectif de réduire l'énergie nécessaire pour avancer. En effet, la coque est à l'origine de 80% de la trainée d'un bateau (Chevalier, 2015). Le concept des *hydrofoils* est alors apparu en 1861 après que T. William Moy ait fixé deux ailes sous la quille d'un bateau tracté par des chevaux sur un canal de Londres. D'autres inventeurs tels que E. Denis Farcot, O. de Sanderval et C. de Lambert ont réussi à vaincre la pesanteur grâce à des systèmes d'*hydrofoils* à échelle ou d'hélices tournantes. Cependant, le premier bateau à *hydrofoils* à moteur a été développé par Forlanini en 1906. Ce bateau nommé Idroplano 7, constitué de deux coques et d'*hydrofoils* à échelle a atteint la vitesse record pour l'époque de 40 nœuds. En 1919, le record tombe à nouveau suite à la vitesse de 70,86 nœuds atteinte par le prototype HD-4, bateau à *hydrofoils* en échelle (Aussedat, Castel et Tissot, 2015; Guglielmetti et Monsonnec, 2015; Hydroptère, 2014).

Il a fallu attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale avant que des navires commerciaux ou militaires soient équipés d'*hydrofoils*. Le premier navire commercial et fonctionnel avec *hydrofoils* est donc apparu en 1954. Il a été conçu par le baron allemand von Schertel (Timoleon, 2003).

Suite à cette tendance, entre 1960 et 1980, les forces marines des États-Unis ont développé des navires de guerre sur *hydrofoils* afin de pouvoir lancer des missiles en navigation rapide (voir Figure 1.1). Cependant, l'immense coût de ces projets et les différentes contraintes rencontrées ont mené à la fin de ces projets à la fin des années 1970 (Rose et Abrams, 2012).



Figure 1.1 Navire militaire Américain PCH-1
Adapté de U.S Navy (1963)

Entre les années 1980 et 2000, peu de navires ont été développés avec des *hydrofoils*. En effet, les avancées scientifiques et techniques sur la forme hydrodynamique des coques et des moteurs permettaient aux navires d'être rapides, stables, et beaucoup moins coûteux qu'un navire sur *hydrofoils*.

Étonnamment, l'utilisation des *hydrofoils* est revenue au premier plan de l'actualité marine par les navires à voiles. En effet, la vitesse des navires à voiles étant limitée, l'implémentation d'*hydrofoils* permet d'atteindre des vitesses jusqu'alors inaccessibles. Le premier voilier sur *hydrofoils* a été observé en 1954, il était nommé Towboat II et a atteint 30,4 nœuds. Un manque de recherche a été la source d'inspiration de A. Thébault qui a

développé l'Hydroptère depuis 1994 (Hydroptère, 2014). Les records de vitesse des bateaux à voiles sont présentés dans le Tableau 1.1 (Wikipedia, 2015).

Tableau 1.1 Records de vitesse sur 500 mètres (m) des bateaux à voile

Date	Bateau	Vitesse [nœuds]	Vitesse [km/h]
24 nov 2012	Vestas Sailrocket 2	65,45	121,06
4 sept 2009	L'Hydroptère	51,36	95,11
26 oct 1993	Yellow Pages Endeavour	46,52	86,15
1980	Crossbow II catamaran	36	66,67

Après 2006, la popularité des petits dériveurs sur *hydrofoils* nommés *International Moth*, puis des planches de kitesurf sur *hydrofoils* a permis de relancer la tendance des bateaux sur *hydrofoils*. C'est donc dans ce contexte que les *hydrofoils* ont été développés pour les AC72 participant aux compétitions nautiques les plus médiatisées au monde : la coupe de l'America et la Coupe Louis-Vuitton de 2012 (voir Figure 1.2). Sensiblement à la même période, trois catamarans CLASS-C sur *hydrofoils* se sont présentés à la LC en 2013 à Falmouth, au Royaume-Uni. Les performances atteintes par le catamaran conçu par Groupama Sailing et les deux autres catamarans conçus par Hydros sont remarquables au niveau des performances atteintes et des technologies développées (Chevalier, 2015).



Figure 1.2 Catamaran AC72 sur
hydrofoils de l'équipe Nouvelle-Zélande
Tiré de DutchTreat (2013)

1.1.2 Catamarans CLASS-C

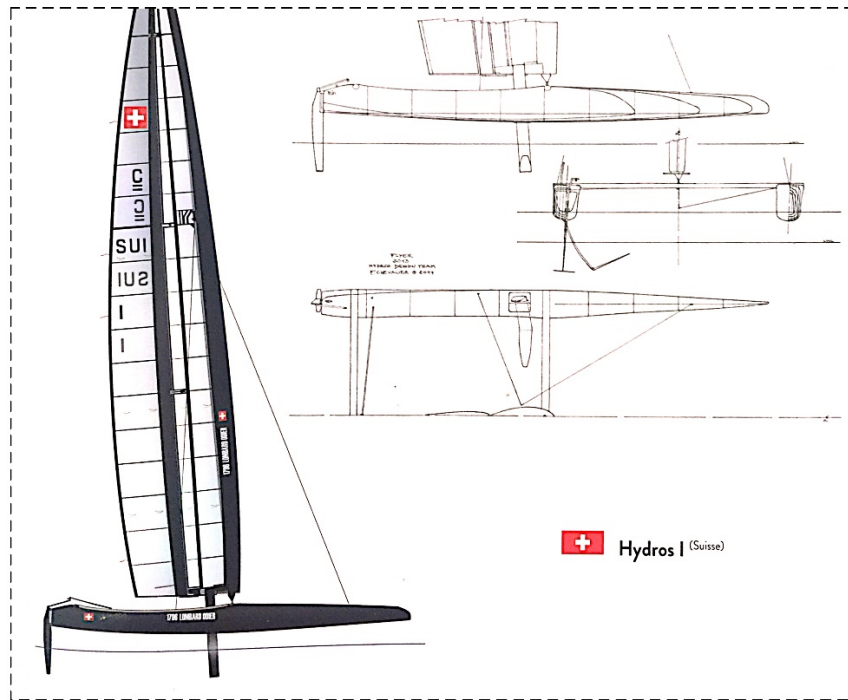
La classe C existe depuis 1961 (Chevalier, 2015). Elle est l'une des catégories de développement de navires à voiles les plus avancés au monde. Les bateaux de cette classe ont la réputation d'être parmi les navires les plus rapides sur des circuits fermés. Grâce à un règlement très succinct et ouvert, ils sont aussi à l'origine de nombreuses innovations dans le domaine de la voile, notamment les voiles rigides, qui sont depuis très longtemps les symboles de la classe. Depuis 2011, ils sont aussi à l'origine du développement d'*hydrofoils* puisque lors de la LC de 2013 à Falmouth, au Royaume-Uni, les catamarans de certaines équipes ont démontré l'efficacité et la performance des *hydrofoils*.

La classe C a été une source d'inspiration notoire pour les bateaux à haute performance, notamment le « Stars & Stripes » de Dennis Conner qui a gagné la Coupe de l'America en 1988. Dans l'équipe de conception de Conner, on retrouvait notamment Dave Hubbard et

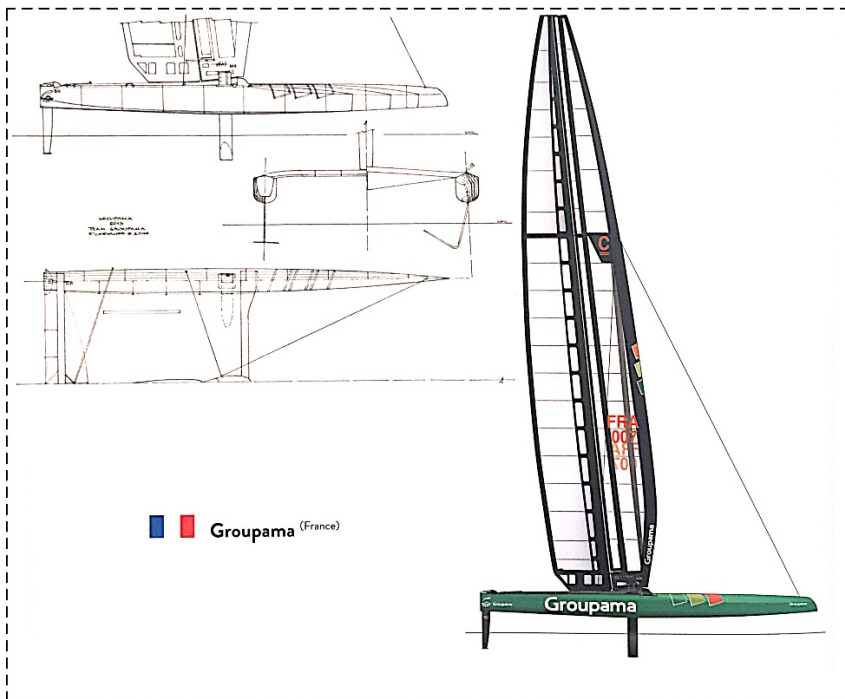
Duncan MacLane, deux des designers les plus expérimentés dans le domaine des Class-C (Chevalier, 2015). C'est aussi dans cette classe que Larry Ellison et son équipe « Oracle Team USA » sont venus trouver leur inspiration et puiser de l'expertise lors de la préparation de la coupe de l'America de 2013 et du développement des nouveaux bateaux AC72.

La dernière compétition de la LC s'est déroulée à Genève (Suisse) en septembre 2015. Elle a regroupé 7 catamarans CLASS-C de 5 pays différents, dont une équipe constituée d'étudiants de l'École de technologie supérieure. Franck Cammas et son équipe française Groupama Sailing ont remporté cette 27^{ème} édition de la LC, et l'équipe de l'ÉTS a terminé sixième. La participation d'une équipe étudiante est historique dans la CLASS-C et l'accueil de l'organisation et des autres équipes a été une expérience remarquable.

Les catamarans CLASS-C à la pointe de la technologie sont actuellement celui de Groupama (voir Figure 1.3 b) et ceux d'Hydros (voir Figure 1.3 a) (Chevalier, 2015).



(a)



(b)

Figure 1.3 Catamarans CLASS-C finalistes lors de la LC en 2013;
 (a) Hydros; (b) Groupama
 Adapté de Chevalier (2015, p. 188)

1.2 Le projet catamaran CLASS C

1.2.1 Généralités

À l'automne 2013, une équipe d'étudiants de l'ÉTS participant à des régates universitaires dans l'Est du Canada a été approchée par le professeur Simon Joncas de l'ÉTS (directeur du présent mémoire) et l'ingénieur Julien Chaussée (ancien membre de l'équipe INVICTUS de la LC) pour concevoir et fabriquer un catamaran de type CLASS-C afin de participer à la 27^{ème} édition de la LC, en septembre 2015 à Genève. La passion de la voile, les défis de conception et d'optimisation mécanique ainsi que l'expérience de la fabrication ont donc motivé ces étudiants à relever ce défi extraordinaire.

Dans ce cadre, le cœur de l'équipe s'est créé et a pris de l'ampleur pour atteindre une douzaine d'étudiants actifs. Le catamaran terminé et assemblé (voir Figure 1.4) au cœur de l'ÉTS a démontré la capacité de ces étudiants à relever des défis innovants. Leur implication est allée au-delà de la conception et de la fabrication du catamaran puisqu'ils ont dû trouver le budget, participer à des conférences et promouvoir la voile au Québec afin de terminer ce projet et atteindre leur objectif de participer au Championnat du monde de CLASS-C.

La conception et la fabrication des *hydrofoils* ont été la première étape de ce projet. En effet, dans le cadre d'un projet ENGAGE/CRSNG, l'auteur de ce mémoire a développé, conçu et fabriqué les *hydrofoils* avec le partenaire industriel Mystère Composites afin de les tester dans un premier temps sur le catamaran ESPADON 20 de MC, et de valider le concept pour le futur catamaran CLASS-C du projet étudiant. La dérive portante tribord et les safrans devaient être testés 18 mois après le début de la recherche.

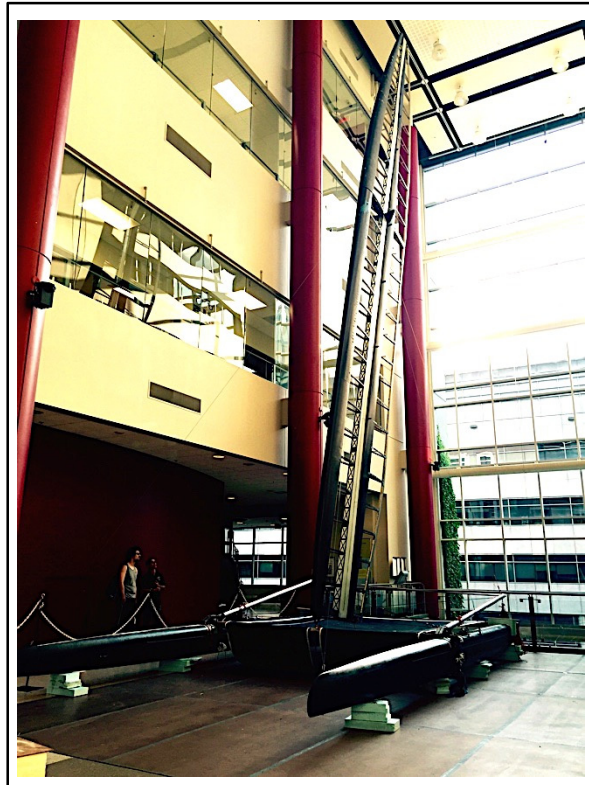


Figure 1.4 Catamaran Class-C conçu et fabriqué par les étudiants du projet en juin 2015

1.2.2 Caractéristique d'un catamaran de type CLASS-C

Il existe plusieurs compétitions de catamarans prototypes dont les plus populaires sont la CLASS-A et la CLASS-C. Chaque classe possède ses propres restrictions afin de comparer la performance des différents catamarans. La CLASS-C est cependant la moins contraignante puisqu'elle possède seulement les cinq règles suivantes :

- 25 pieds de long;
- 14 pieds de large;
- 300 pieds carrés de surface d'aile;
- Deux personnes navigantes;
- Aucune assistance électronique.

1.2.3 Cahier des charges du projet

Général

Les *hydrofoils* devront être conçus et fabriqués pour s'adapter sur l'ESPADON 20 et sur le catamaran CLASS-C de l'ÉTS selon les volontés suivantes :

1. Le poids du catamaran prototype ESPADON 20 de MC est fixé à 230kg et celui de l'équipage à 200kg. Les dérives portantes et les safrans porteurs devront donc pouvoir soulever la masse totale;
2. Les dérives portantes et les safrans porteurs devront être compatibles avec le catamaran CLASS-C du projet étudiant de l'ÉTS;
3. La configuration optimale (l'angle d'attaque et l'angle de *cant*) pour le décollage et la vitesse maximale devra être fournie à MC;
4. La vitesse de décollage doit être inférieure à 15 nœuds en favorisant un décollage rapide.

Spécifique à la conception

Afin de faciliter la fabrication et de limiter le nombre de moules, les contraintes suivantes sont à respecter :

5. La géométrie des *hydrofoils* doit être simple à fabriquer, et donc par le fait même posséder seulement deux peaux de fibre de carbone/époxy et aucun raidisseur;
6. Les modèles mâles de la dérive portante seront conçus et fabriqués à l'ÉTS;
7. Les modèles mâles de la partie verticale du safran porteur seront conçus et fabriqués à l'ÉTS;
8. Les moules femelles de l'aile du safran porteur seront conçus et fabriqués à l'ÉTS;
9. Les matériaux utilisés seront :
 - Fibre de carbone unidirectionnelle TC-09-U de Texonic;
 - Fibre de carbone biaxiale TC-06-T (2x2 twill) de Texonic;
 - Mousse structurale Gurit Corecell M60.
10. Limitation de l'orientation des plis à 0° et $\pm 45^\circ$ pour l'optimisation pour faciliter la fabrication.

CHAPITRE 2

PRINCIPES DE LA NAVIGATION À VOILE

Ce chapitre introduit les principes de la navigation à la voile. Une première partie décrit donc les principes et les termes à maîtriser pour comprendre le comportement d'un bateau à voile. Une seconde partie met l'accent sur les différents composants d'un bateau à voile et les efforts à prendre en considérations.

2.1 Définitions de la composition d'un bateau à voile, des différents principes, et des termes de la navigation à la voile

2.1.1 Bateau à voile

Un bateau à voile est constitué d'une ou plusieurs coques. Selon le nombre de coques, il s'agit d'un monocoque (une seule coque), d'un catamaran (deux coques) ou d'un trimaran (trois coques). Si le bateau est un quillard, alors la coque possède une quille lestée; si c'est un dériveur, elle possède une dérive (non lestée). Les safrans ou gouvernails permettent de manœuvrer le bateau. Afin d'utiliser la puissance du vent, une grande voile est montée sur un mât. Un foc est hissé sur le devant du bateau pour canaliser l'écoulement du vent vers la grande voile (voir Figure 2.1).

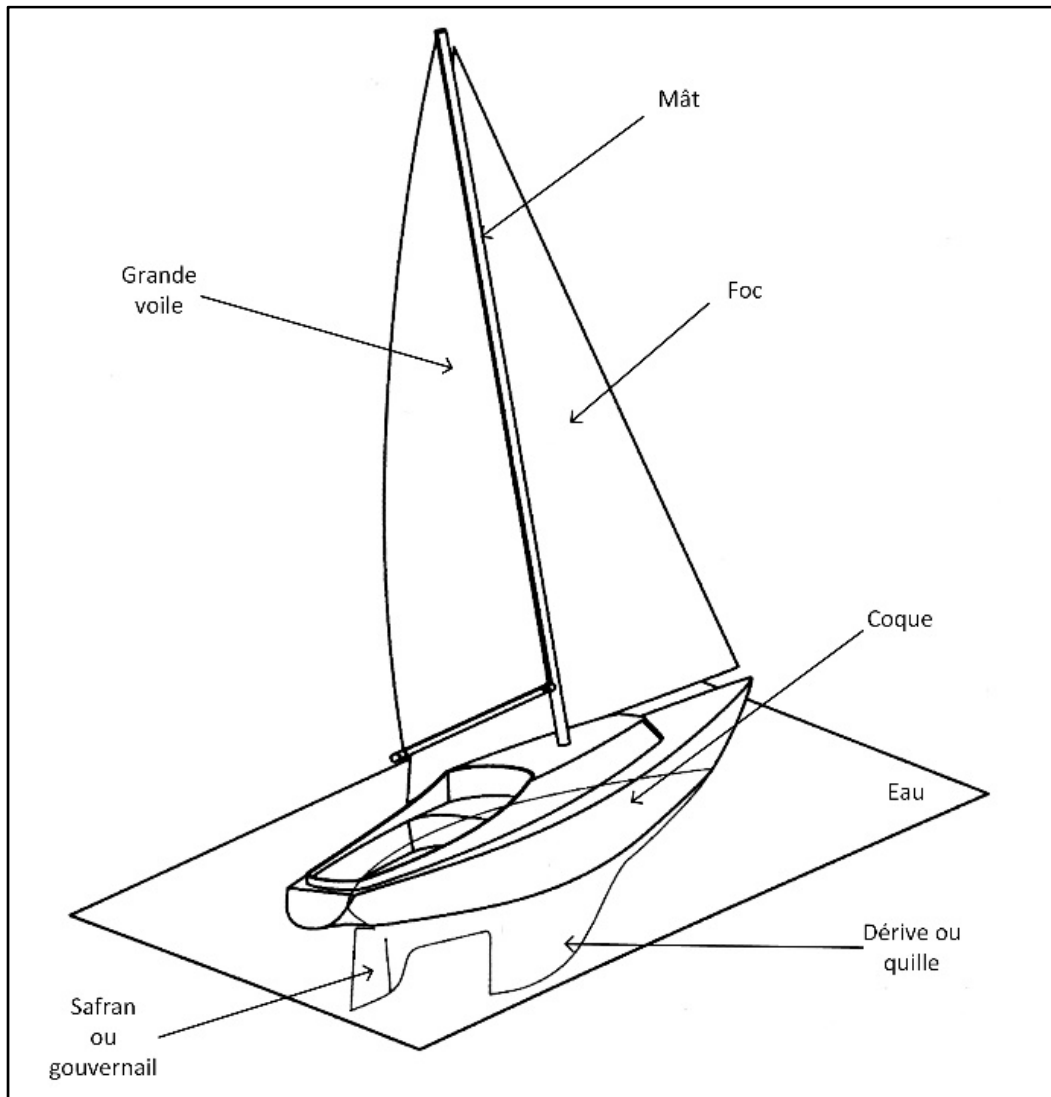


Figure 2.1 Composition d'un bateau à voile monocoque
Adapté de Fossati (2009, p. 3)

2.1.2 Angles de gîte, tangage et lacet

Le comportement d'un bateau est décrit à l'aide de termes marins. En mer, un bateau à voile est incliné par rapport au référentiel global (terrestre). Afin de décrire ces angles, le roulis est l'inclinaison autour de l'axe x , le tangage est l'inclinaison autour de l'axe y et le lacet est l'inclinaison autour de l'axe z (voir Figure 2.2). L'assiette du bateau décrit les angles de roulis et de tangage. Ainsi, une assiette nulle signifie donc que le bateau n'a aucun angle d'inclinaison.

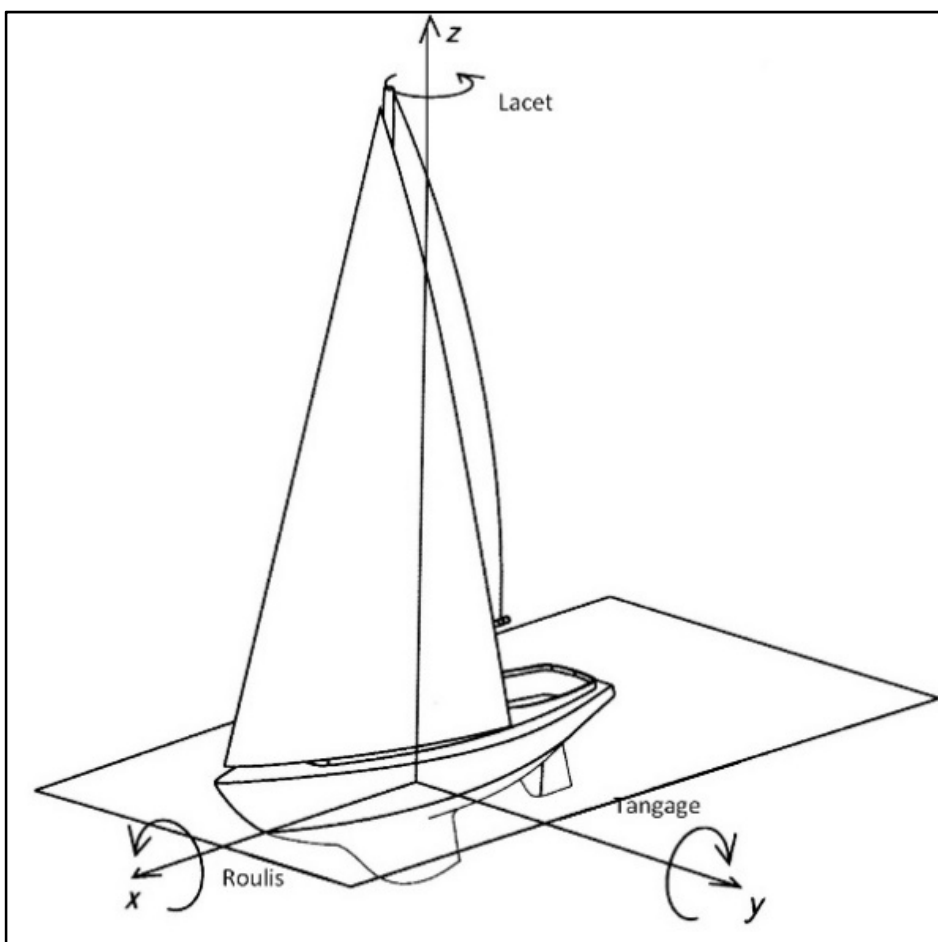


Figure 2.2 Angles d'inclinaison d'un bateau à voile
Adapté et traduit de Fossati (2009, p. 3)

2.1.3 Dérive d'un bateau à voile

Sous l'effet du vent, une composante de force perpendiculaire à l'axe x du catamaran se crée au niveau des voiles (voir Figure 2.3). Elle dépend des composantes y de la portance et de la trainée de l'aile : le bateau glisse alors selon $(-y)$. Cette force pousse le bateau latéralement sur la surface de l'eau. Les composantes x de la portance et de la trainée permettent au catamaran d'avancer. Le phénomène de dérive du catamaran est nécessaire afin d'équilibrer statiquement le bateau (voir section 2.2.4). C'est pourquoi l'axe du bateau pointe dans une direction, alors que la direction du déplacement du bateau est décalée d'un certain angle. Cet angle est appelé l'angle de dérive λ (*leeway*). La dérive étant un phénomène qui doit être contrôlé et limité, les parties hydrodynamiques immergées sont conçues pour créer des forces

qui limitent la dérive du bateau.

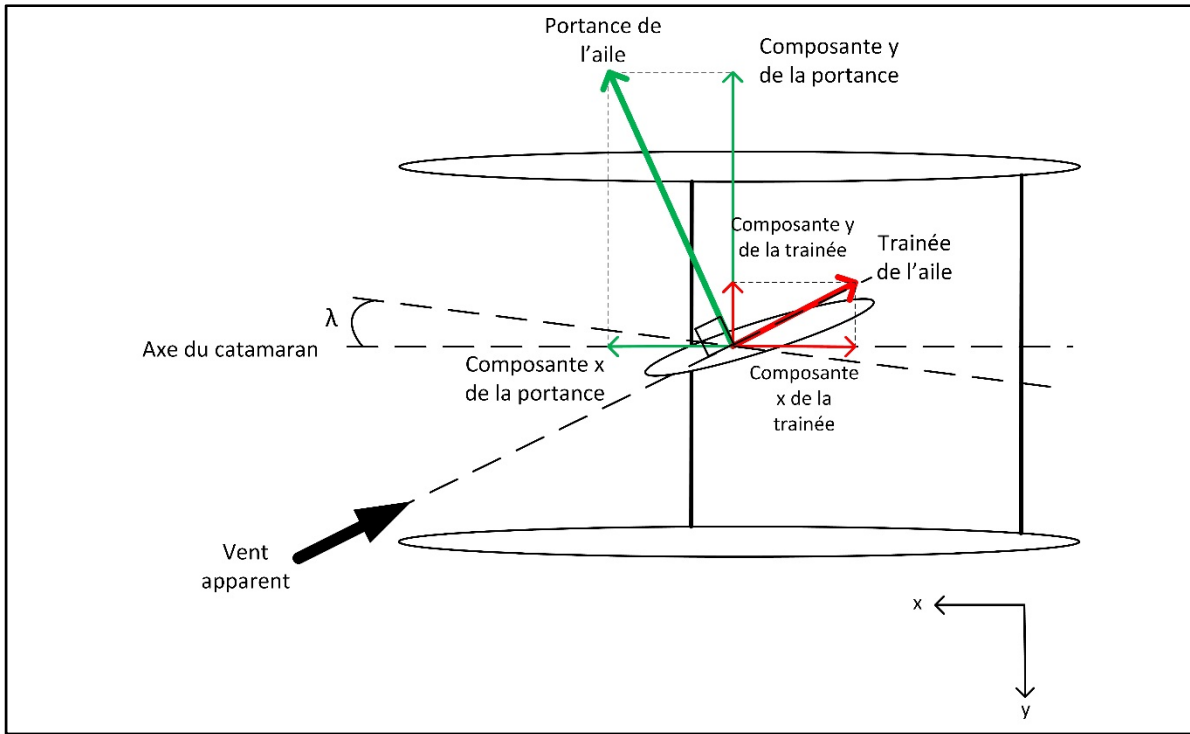


Figure 2.3 Dérive d'un bateau à voile sous l'effet du vent

2.1.4 Allures et trajectoires d'un bateau à voile

Un bateau à voile se déplace selon la direction du vent réel. Son déplacement est donc caractérisé directement par rapport à la direction du vent réel grâce à différents termes (voir Figure 2.4). Ainsi, quand le bateau est face au vent, il ne peut pas avancer, car l'inclinaison des voiles ne permet pas de créer une force assez importante vers l'avant du bateau pour avancer : le bateau aurait plutôt tendance à gîter et reculer. Il doit donc avoir un angle minimum β_{\min} afin de pouvoir utiliser la puissance du vent : c'est le près (le vent est presque de face). β_{\min} est différent selon le bateau, et il est une des caractéristiques importantes pour la performance. En effet, afin de parcourir le minimum de distance, pouvoir remonter le plus rapidement au près est essentiel (voir Figure 2.5). Cette dernière figure démontre que remonter au vent au près avec un angle $\theta_2 < \theta_1$ diminue la distance à parcourir pour aller d'un

point A à un point B (ou d'une bouée à une autre). Au travers, le bateau avance à 90° par rapport au vent. Lorsque le bateau a le vent dans le dos, il peut être au large, grand large ou vent arrière.

D'autres termes marins sont également employés pour situer les différentes parties du bateau. En effet, un bateau étant symétrique, il y a toujours un côté bâbord (gauche) et tribord (droite). Si le vent arrive du côté gauche du bateau, alors la partie gauche est nommée bâbord amure (respectivement tribord amure). Ensuite, physiquement, le vent atteint les parties nommées amures avant le côté opposé.

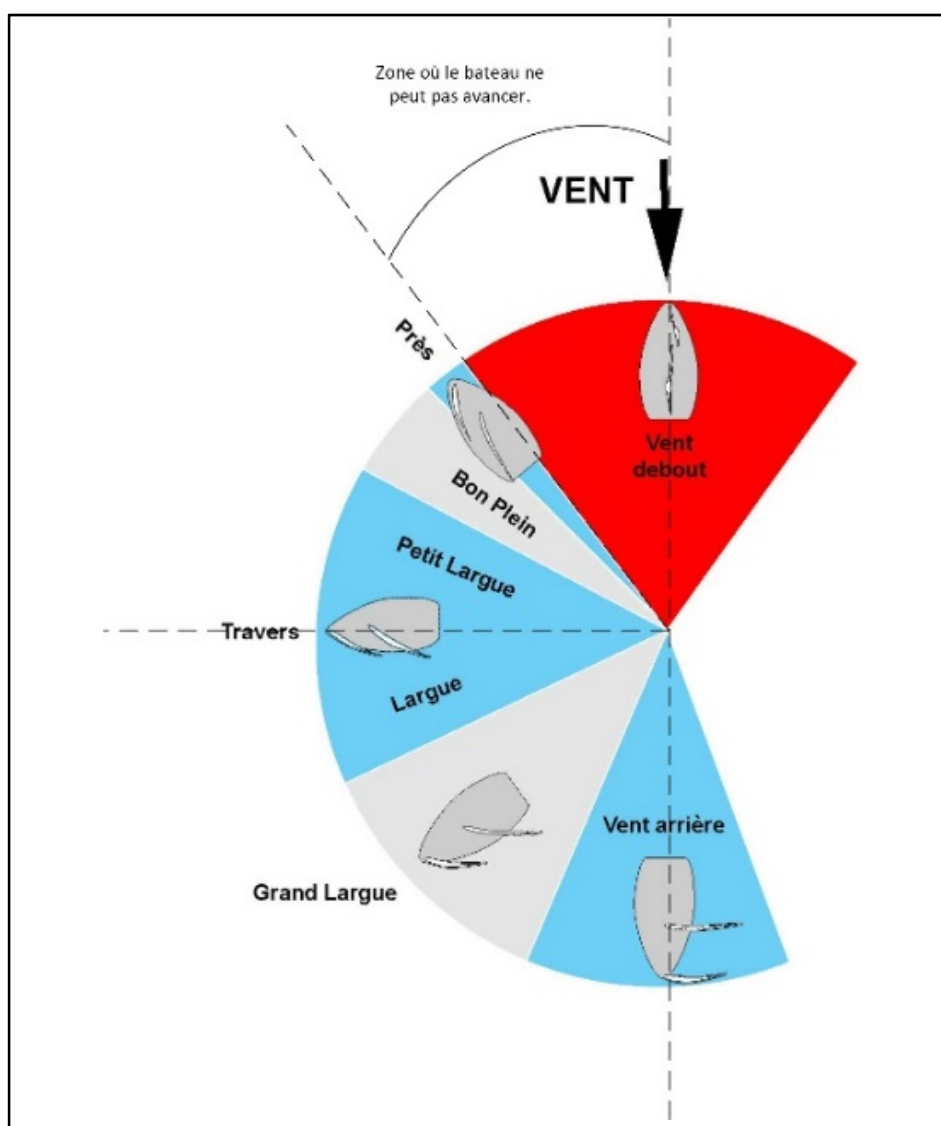


Figure 2.4 Allures d'un bateau à voile

Adapté de Pline (2006)

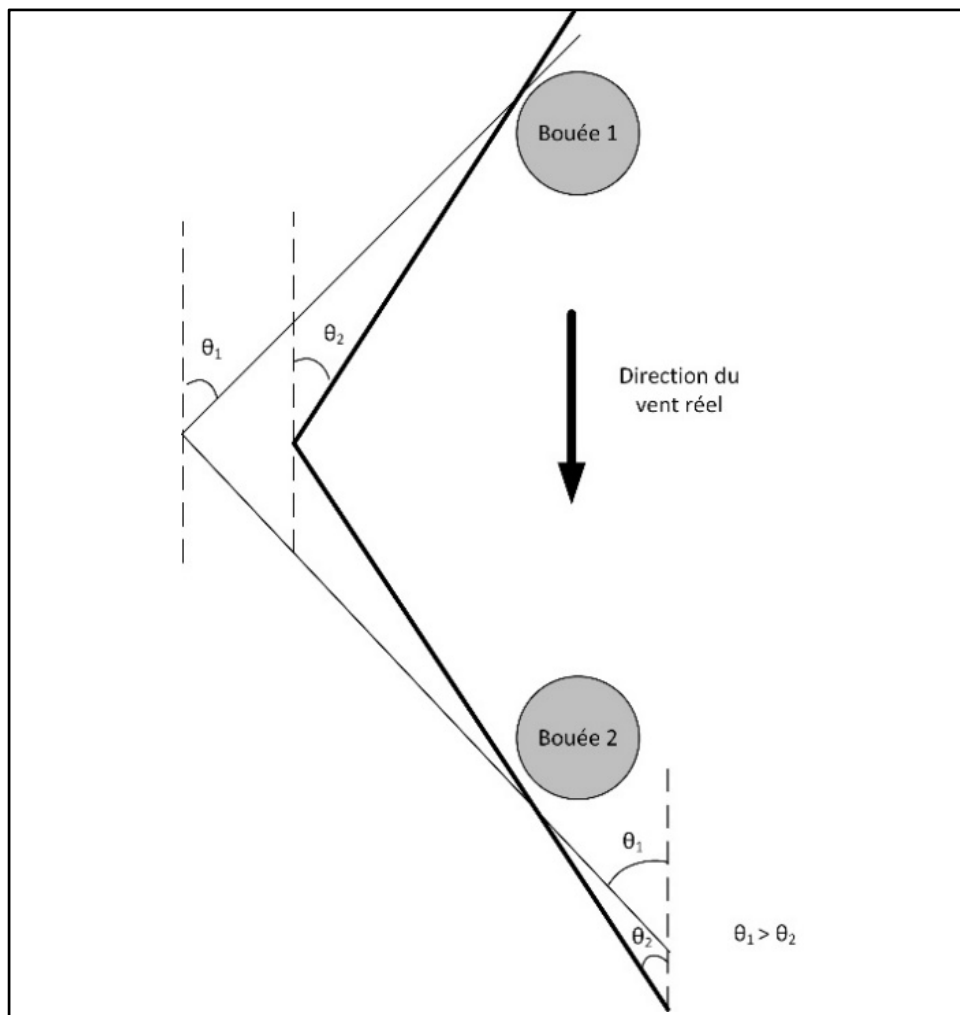


Figure 2.5 Influence de la performance de l'angle minimum au près sur les performances lors d'une course

2.1.5 Vent réel et vent apparent

En navigation, le vent apparent est le vent perçu par les voiles lorsque le bateau est en mouvement alors que le vent réel est le vent perçu à l'arrêt. Cette distinction est nécessaire, car, en navigation, la direction et la force du vent données par les stations météo ou radars sont les caractéristiques du vent réel, or selon l'allure du bateau, le vent apparent varie. C'est pourquoi il est fréquemment dit qu'un catamaran CLASS-C peut atteindre trois fois la vitesse du vent réel (Chevalier, 2015). En effet, puisque ces catamarans peuvent atteindre de grandes vitesses, la vitesse du vent apparent devient plus importante (voir Figure 2.6), permettant au

catamaran d'aller encore plus vite. Au final, alors que l'angle du vent réel peut varier énormément, l'angle du vent apparent varie beaucoup moins. Pour un catamaran CLASS-C sans *hydrofoils*, l'angle du vent apparent au près est proche de 20° alors qu'au grand largue, il est proche de 45° (Haack, 2011).

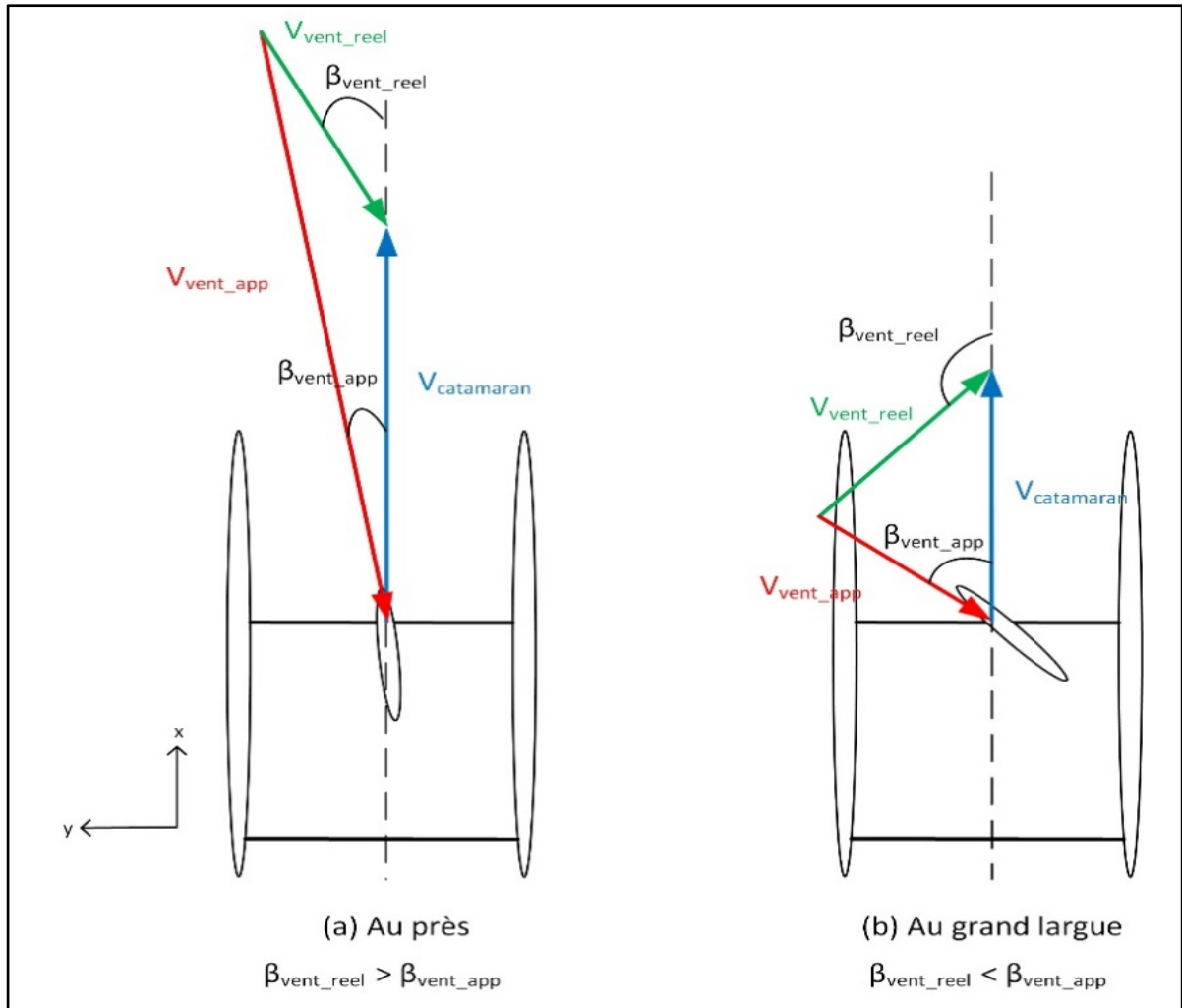


Figure 2.6 Caractérisation du vent apparent par rapport au vent réel ; (a) Au près ; (b) Au grand largue.

2.2 Définition des efforts sur les différents éléments d'un bateau à voile

2.2.1 Aile rigide ou voiles souples

2.2.1.1 Écoulement du vent sur une aile rigide ou voile souple

Selon la section 2.1.5, le vent perçu sur le bateau est le vent apparent. L'angle du vent apparent ($\beta_{\text{vent_apparent}}$) varie selon la vitesse du bateau, la direction du vent réel et la vitesse du vent réel. L'écoulement du vent apparent sur les voiles génère une portance (L_{aile}) perpendiculaire à l'écoulement du vent apparent, une trainée (D_{aile}) parallèle à l'écoulement du vent apparent (voir Figure 2.7). Le bateau avance grâce à la combinaison de L_{x_aile} et $-D_{y_aile}$ et gîte à cause des composantes D_{y_aile} et L_{y_aile} . Ainsi, selon la section 2.1.4, plus le bateau remonte au près, plus il se rapproche d'un angle β_{min} où le bateau ne peut plus avancer. En effet, plus $\beta_{\text{vent_apparent}}$ diminue, plus la composante L_{x_aile} diminue alors que L_{y_aile} augmente. Ainsi, la vitesse du bateau diminue, car la composante de force L_{x_aile} entraînant le bateau diminue.

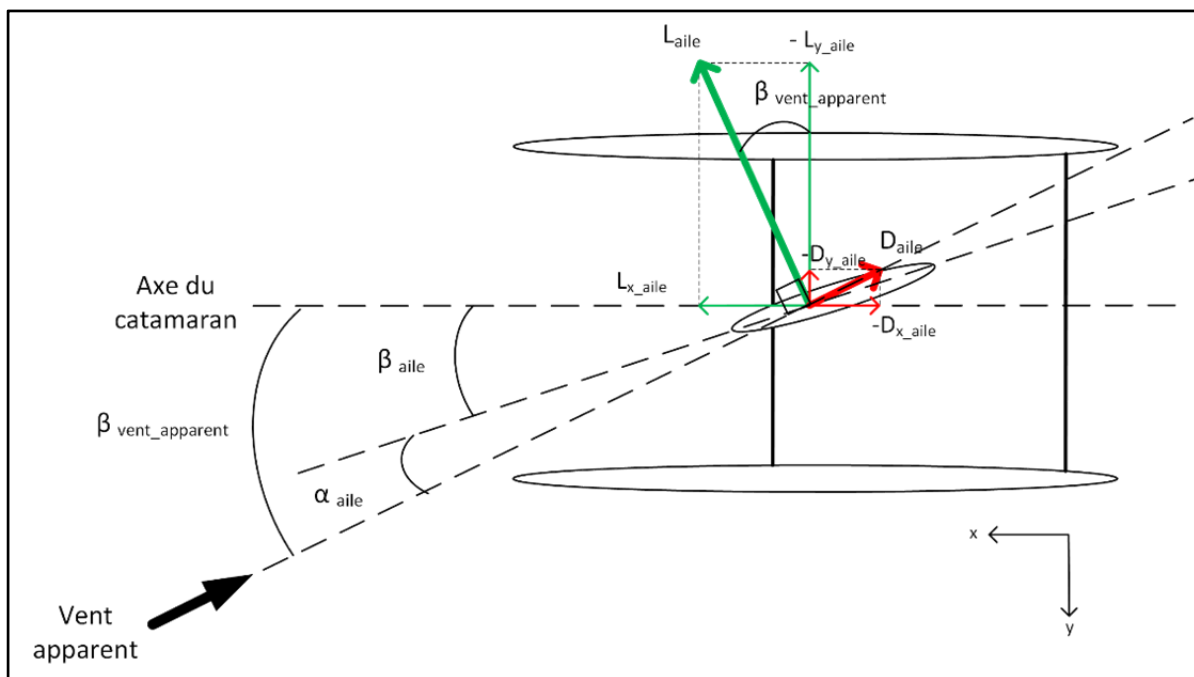


Figure 2.7 Forces générées par l'écoulement du vent sur une aile rigide ou des voiles souples

2.2.1.2 Aile rigide VS voiles souples

Le but du mémoire n'étant pas de présenter les concepts de base de l'aérodynamique des profils, le lecteur est invité à consulter l'ANNEXE I qui résume certains éléments utiles à la compréhension générale des concepts traités dans cette section.

La théorie d'écoulement aérodynamique d'un fluide autour de la section d'une voile souple est similaire à l'étude d'un profil ayant une très faible épaisseur. La forme de la voile souple pouvant être très cambrée, il est possible d'avoir une portance (L) élevée, cependant, la traînée (D) est également élevée. Par exemple, une voile souple ayant un angle d'attaque (α) de 12° par rapport à la direction du vent apparent a un coefficient de portance (C_L) proche de 1,2 et un coefficient de traînée (C_D) proche de 0,4. Le rapport L/D est donc de 3 (Fossati, 2009; Khayyat et Rad, 2009).

Pour une aile rigide inclinée à 12° par rapport à la direction de l'écoulement, le C_L est de 2,1 et le C_D 0,14, soit un L/D de 15. Ces résultats sont des ordres de grandeur. L/D d'une voile rigide peut être donc 5 fois plus grand qu'une voile souple. La traînée des voiles rigides est donc beaucoup plus faible que les voiles souples. Ces ailes sont composées de plusieurs sections afin de modifier la cambrure et ainsi optimiser le rapport de la portance sur la traînée (L/D) selon la situation de navigation à l'instar des voiles souples.

Afin d'améliorer la performance de ces ailes, certains chercheurs ont optimisé les profils utilisés développant des profils spécifiques pour ce type d'application. Cependant, ces études aérodynamiques sur des modèles à trois dimensions (3D) sont complexes et longues. C'est pourquoi certaines recherches ont analysé les variables influentes de l'aile à deux dimensions (2D) afin d'optimiser rapidement la forme globale de l'aile (Grassi et al., 2013). L'objectif de cette présente étude n'étant pas de modéliser parfaitement le comportement de l'aile rigide, mais de modéliser simplement et approximativement les forces créées par l'aile (voir section 2.2.1.1), le lecteur est libre de se renseigner sur les méthodes de calculs numériques d'un

écoulement avec couche limite sur un profil, notamment celle développée par M. Drela (Drela, 2007).

2.2.2 Coque

2.2.2.1 Poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède ($F_{\text{archimede}}$) est la force verticale qui s'exerce sur un corps plongé en partie ou entièrement dans un fluide de masse volumique ρ soumis à un champ de gravité (g). Cette force s'applique au centroïde du volume immergé du corps ($V_{\text{immergée}}$) et elle est égale au poids du fluide correspondant au volume immergé (Munson, Young et Okiishi, 1998).

$$F_{\text{archimede}} = g V_{\text{immergé}} \rho \quad (2.1)$$

Le poids de la coque, appliqué au CG, est par définition une force verticale orientée vers le bas alors que la poussée d'Archimède, appliquée au CB, est une force verticale orientée vers le haut. L'équilibre de la coque est donc atteint lorsque ces deux centres sont sur la même verticale et de même norme (voir Figure 2.8a). Lorsque la coque est inclinée, la distance projetée horizontalement entre les deux centres crée alors un moment sur la coque (Fossati, 2009). Ainsi, plus la coque s'incline (voir Figure 2.8b et c), plus la coque a tendance à revenir à son état d'équilibre (tel que Figure 2.8a). Un deuxième état d'équilibre, nommé état critique, est atteint quand le CB et le CG sont à nouveau sur la même verticale (voir Figure 2.8d). La coque est alors couchée sur l'eau. Si la coque continue à s'incliner et dépasse cet état critique, il y a alors chavirage (voir Figure 2.8e). La coque atteint à nouveau son état équilibre à l'envers (voir Figure 2.8f).

La stabilité d'un catamaran est donc plus élevée qu'un monocoque, car la largeur entre les deux coques éloigne le centre de gravité (CG) du centre de poussée (CB). En effet, en navigation rapide, seule une coque est en contact avec l'eau. Or, le CG du catamaran est situé près du pied de mât, le poids seul du catamaran permet de revenir à l'équilibre (voir Figure 2.9).

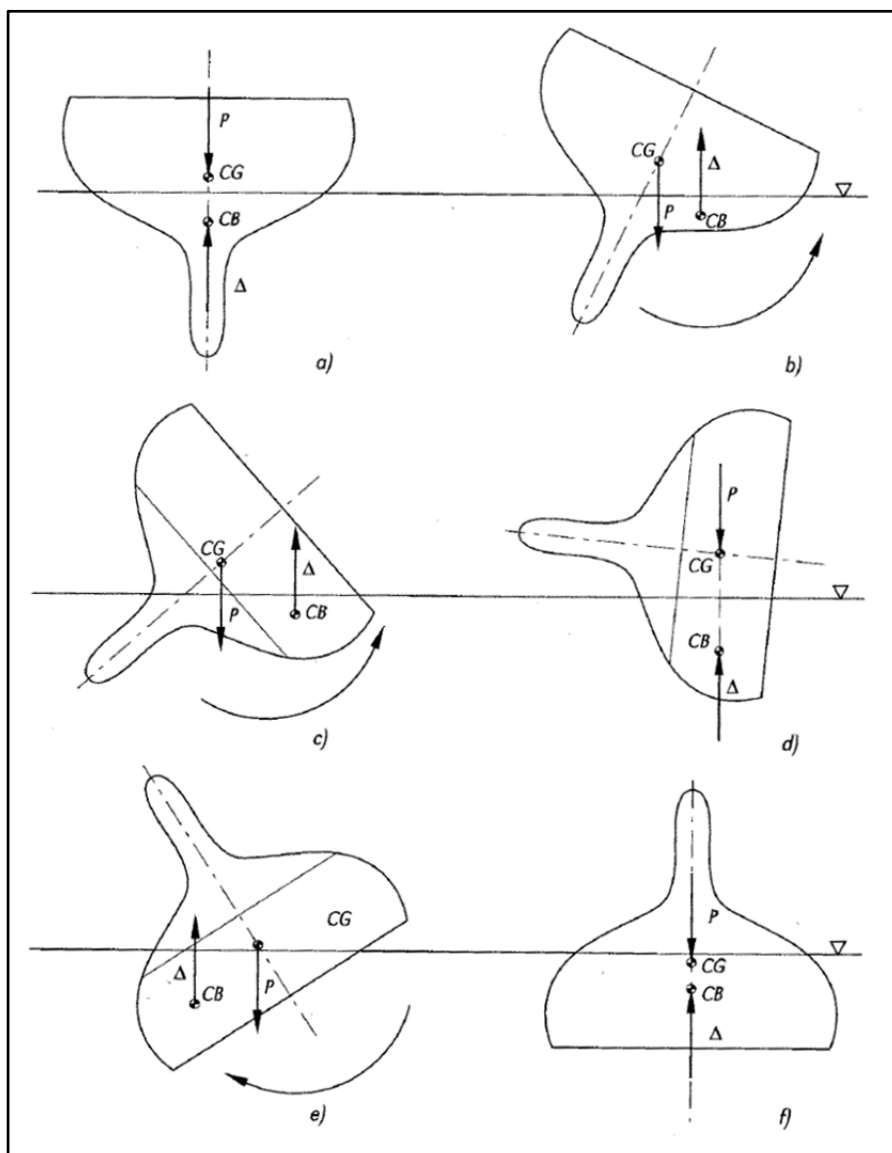


Figure 2.8 Équilibre d'une coque dans différentes situations
Tiré de Fossati (2009, p. 327)

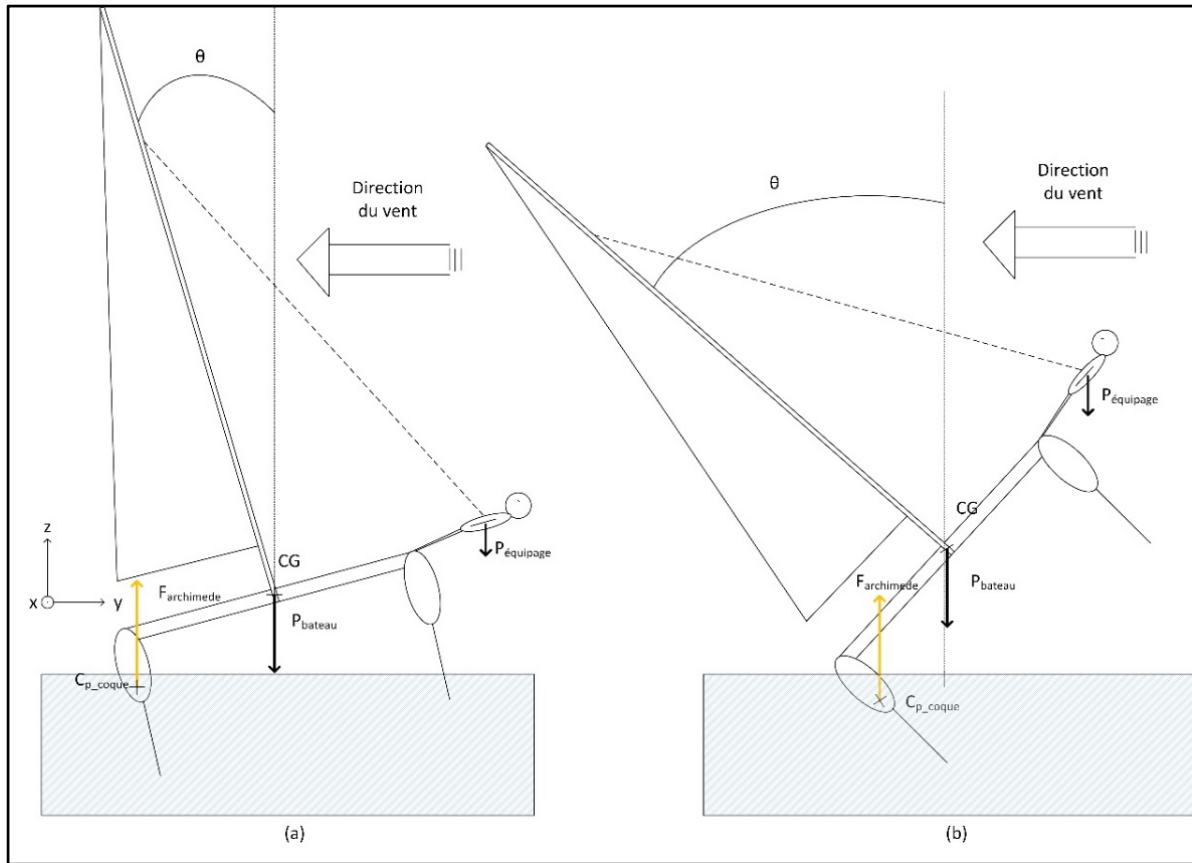


Figure 2.9 Équilibre d'un catamaran ; (a) cas fréquent; (b) cas proche de la limite

2.2.2.2 Trainée

Comme tout corps dans un écoulement, une coque génère de la trainée (D). La forme des coques est donc optimisée pour réduire sa trainée (D), car c'est la caractéristique limitante des coques. Cette résistance est constituée par la trainée de forme (ou pression), de vagues et la trainée de friction.

Trainée de forme (ou pression)

La trainée de forme est due à la différence de pression créée par l'écoulement du fluide autour d'un objet. En effet, selon la forme, une surpression est observable à l'endroit où l'écoulement du fluide entre en contact avec l'objet, et une dépression est créée à l'endroit où l'écoulement du fluide quitte l'objet. Moins la forme est profilée, plus l'écoulement décroche rapidement et crée des tourbillons. Ces tourbillons sont à l'origine de la dépression et donc de

la trainée de forme (D_{fo}) (Viollet, 2002). D_{fo} dépend du coefficient de trainée de forme (C_{Dfo}), de la masse volumique du fluide (ρ), du carré de la vitesse (U_∞) et de la surface frontale (S) (voir équation (2.2)).

$$D_{fo} = 0.5 \rho U_\infty^2 C_{Dfo} S \quad (2.2)$$

Trainée de vagues

Lorsque la coque se déplace dans l'eau, des vagues se forment sur les côtés de la coque. Ces vagues sont visibles à l'arrière de tout bateau en déplacement. De l'énergie est nécessaire pour créer ces vagues, et c'est justement ce transfert d'énergie qui représente la trainée de vagues. Cette trainée est caractérisée par rapport au nombre de Froude (F_r) (voir équation (A-I.2)). Le calcul de la trainée de vague demande de définir les caractéristiques dimensionnelles d'une coque. Les lecteurs curieux pourront se référer au livre de Fossati (2009, p. 16 à 21). Cette trainée est négligeable sur une coque de catamaran de 20 pieds.

Trainée de friction ou visqueuse

La trainée de friction est bien documentée afin de pouvoir facilement analyser la trainée des coques. Elle est exprimée par rapport à la masse volumique de l'eau (ρ_{eau}), la vitesse du bateau (U_∞), le coefficient de friction (C_f) et la surface mouillée ($S_{mouillée}$) (Fossati, 2009). L'équation (2.3) permet de calculer la trainée de friction (D_f) d'une coque. Le coefficient de friction (C_f) peut être décrit par deux équations ((2.4) et (2.5)). L'équation (2.4) est simple à utiliser et a été validée par de nombreux tests expérimentaux. Cependant, l'approximation du calcul du Re a conduit à la prise en compte de la longueur de la ligne d'eau (LWL) (équation (2.5) valide pour une eau à 15°C avec une viscosité cinématique de $1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Ces formules sont valables pour une surface parfaite de la coque. En réalité, selon la rugosité, le coefficient de friction tend rapidement vers une valeur fixe. De manière générale, C_f est entre 2×10^{-3} (coque parfaite à haute vitesse ou très longue) et 7×10^{-3} (coque rugueuse).

$$D_f = 0,5 * \rho * U_\infty^2 * C_f * S_{mouillée} \quad (2.3)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (2.4)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(588000 * LWL * U_\infty) - 2)^2} \quad (2.5)$$

2.2.3 Dérive ou quille

Le comportement des dérives *hydrofoils* est décrit dans la section 3.1. Une dérive ou une quille utilisée sur un bateau non volant peut-être décrite comme des ailes finies (voir ANNEXE I). Elle génère une force de portance L perpendiculaire à l'écoulement du fluide et une force de trainée D colinéaire à l'écoulement du fluide (voir Figure 2.10).

2.2.4 Résumé des efforts sur un catamaran

Cette partie présente les différentes forces présentes sur un catamaran sans *hydrofoils*. Elle sera la base pour la conception du modèle dynamique. D'après les précédents chapitres, les forces suivantes sont à prendre en compte (voir Figure 2.10 et Figure 2.11) :

- Poids du bateau (P_{bateau}) appliqué à son centre de gravité (CG);
- Poids de l'équipage ($P_{\text{équipage}}$);
- Portance ($F_{y_dérive}$) et trainée ($F_{x_dérive}$) de la dérive;
- Trainée (D_{safran}) des safrans;
- Poussée d'Archimède ($F_{\text{archimede}}$) sur la coque, sa trainée (D_{coque}) et le moment (M);
- Portance (L_{aile}) et trainée (D_{aile}) de l'aile.

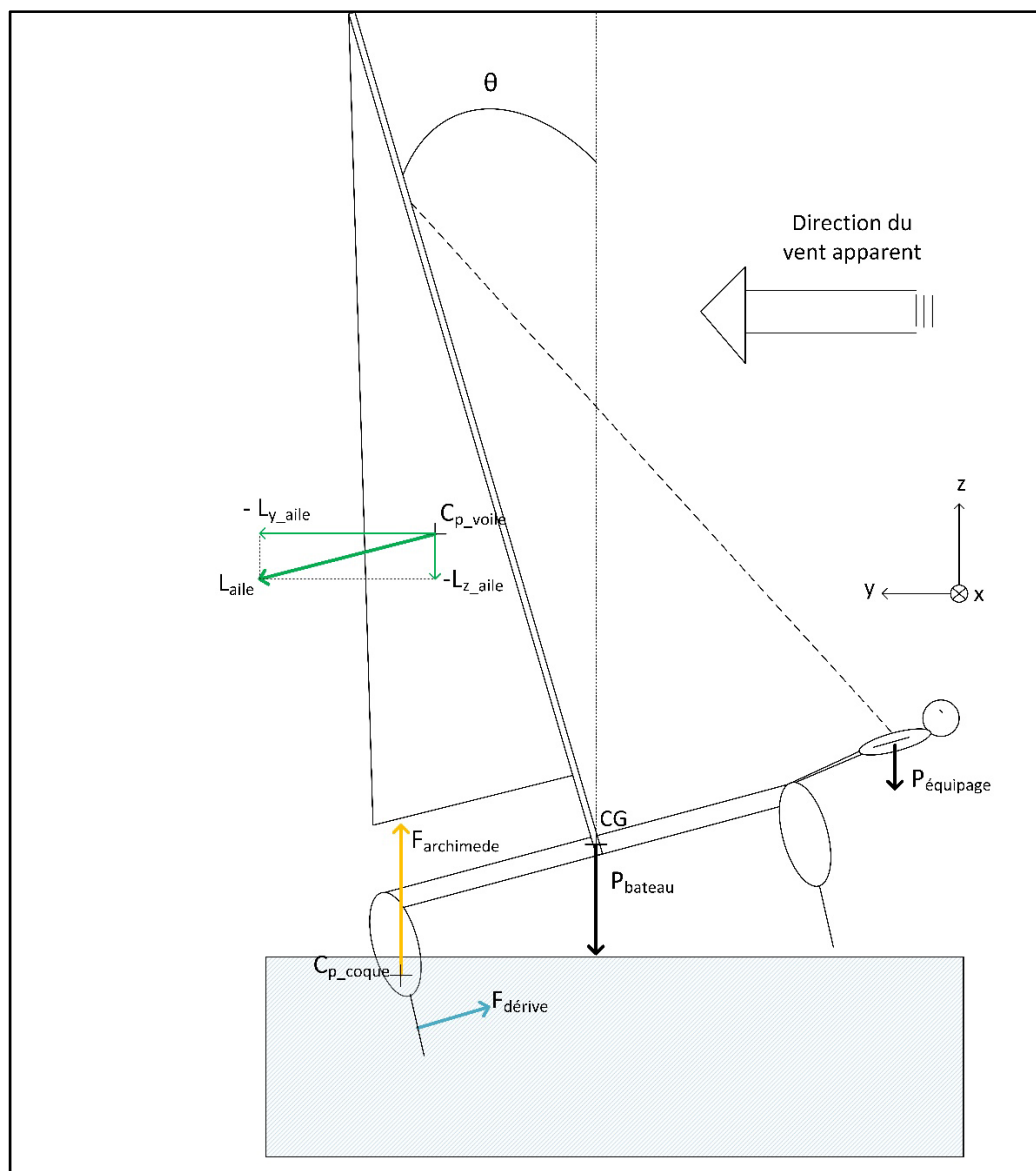


Figure 2.10 Schéma des forces sur un catamaran courant - vue arrière

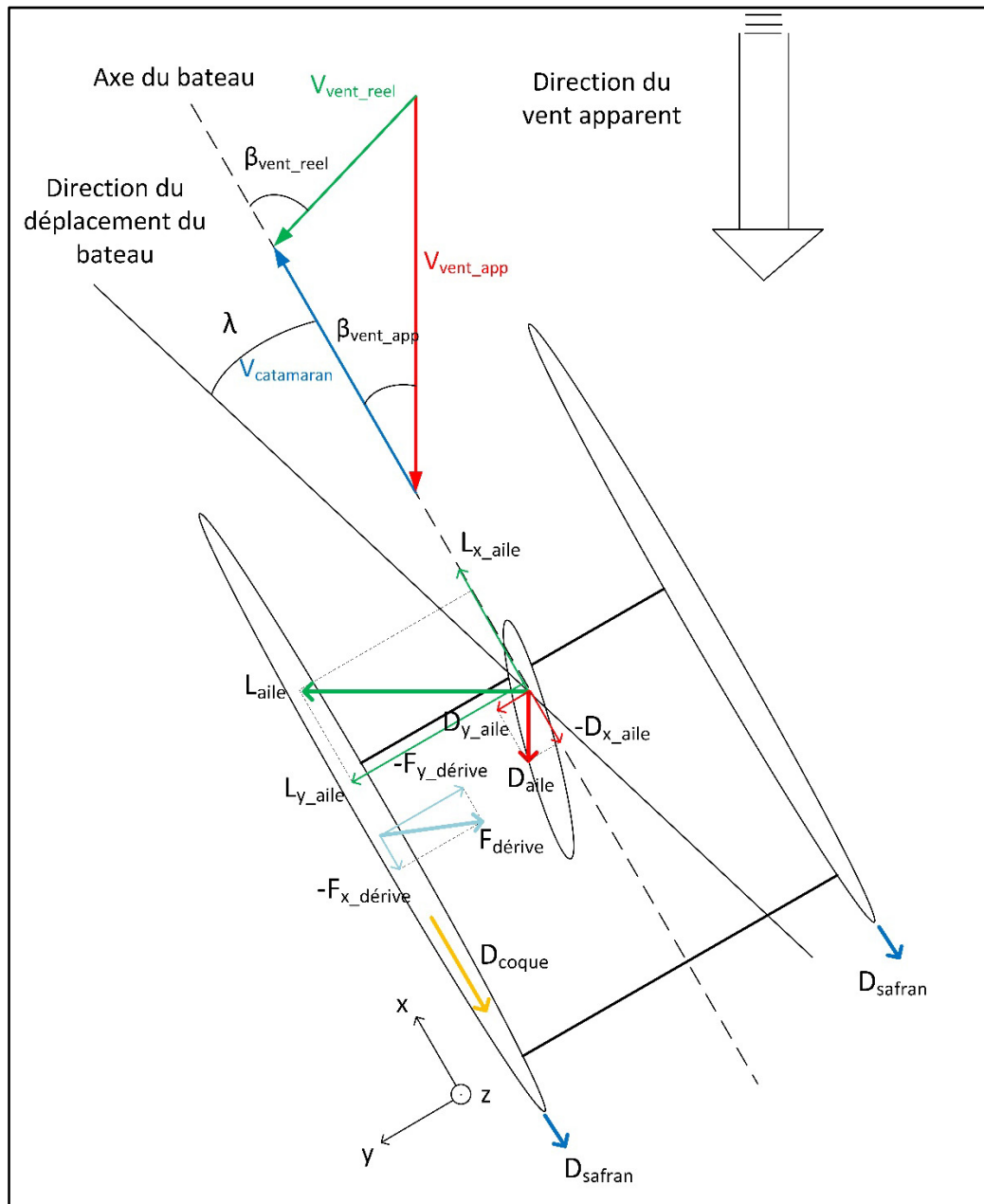


Figure 2.11 Schéma des forces sur un catamaran courant - vue de dessus

CHAPITRE 3

REVUE DES CONCEPTS ET DES PARAMÈTRES DE BASE DE LA CONCEPTION D'HYDROFOILS

Ce chapitre définit les concepts nécessaires à la compréhension du comportement et des enjeux d'un bateau sur *hydrofoils*. Tout d'abord, les choix préliminaires de conception utilisés dans le modèle SM du CHAPITRE 4 sont justifiés. Les modèles CAO de référence des *hydrofoils* utilisés pour l'analyse et l'optimisation structurales en composite du CHAPITRE 5 sont ensuite présentés. Ces modèles seront utilisés pour concevoir les modèles et les moules du CHAPITRE 6.

3.1 Comportement d'un bateau sur *hydrofoils*

Cette partie décrit les caractéristiques des dérives portantes qui influencent directement la navigation. En effet, la géométrie influence la stabilité de vol, la dérive du bateau et la gestion de la régulation de la portance. C'est pourquoi l'effet des formes sur la stabilité sera décrit, ainsi que les choix préliminaires de conception effectués pour cette présente étude.

3.1.1 Différentes géométries

La géométrie des dérives portantes a un effet important sur le comportement d'un bateau. En effet, selon la géométrie, le bateau sera plus ou moins rapide et plus ou moins stable. Or, durant une course, la meilleure vitesse moyenne permet la meilleure compétitivité. Ainsi, privilégier la stabilité sur un bateau à *hydrofoils* limite légèrement la performance, mais augmente la vitesse moyenne de navigation (voir Figure 3.1).

En termes de stabilité, trois catégories sont à distinguer. En effet, certains *hydrofoils* nécessitent un système de réglage actif (géométrie en T) pour limiter la portance par rapport à la hauteur et la vitesse du bateau. D'autres formes permettent aux *hydrofoils* de réguler

passivement leurs portances. En effet, les *hydrofoils* en V et en L ont une surface portante qui diminue lorsque la hauteur du bateau augmente. Leurs principes et caractéristiques sont décrits dans le Tableau 3.1. Actuellement, la majorité des catamarans sportifs volants ont des *hydrofoils* avec des géométries dérivées du L afin d'avoir la meilleure stabilité possible, tout en limitant l'effet du déplacement du centre de poussée sur l'*hydrofoil* en vol décrivant la stabilité d'un catamaran par rapport aux différentes forces).

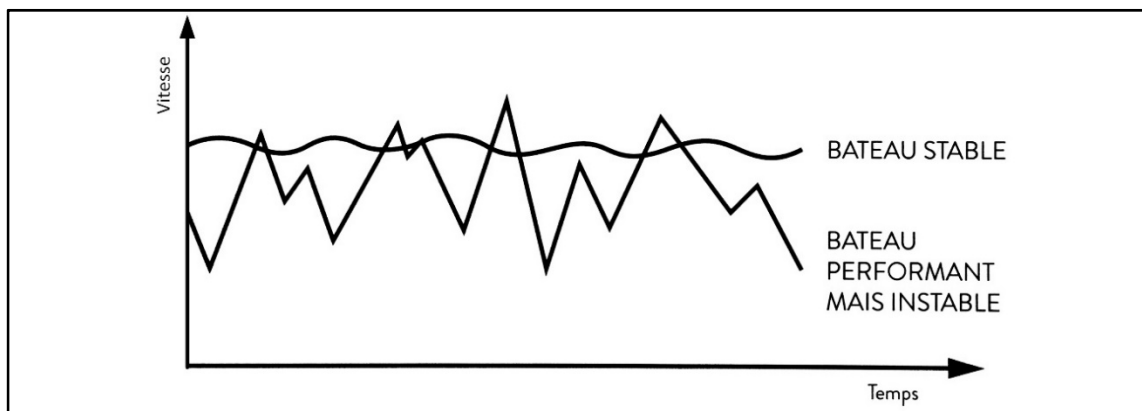
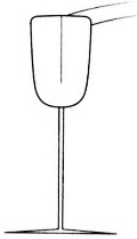
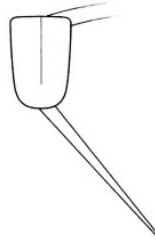
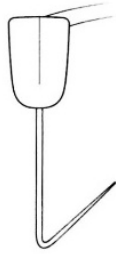


Figure 3.1 Comparaison de l'effet de la stabilité sur la vitesse d'un bateau à *hydrofoils*
Adapté de Chevalier (2015, p. 180)

Tableau 3.1 Comparaison des formes d'*hydrofoils* les plus répandues
Adapté de Chevalier (2015, p. 173)

Type de foil	Horizontal : foil en T	Incliné perçant : foil en V	Foil en L
Principe	Portance réglée en fonction de la hauteur de vol (mesurée par palpeur mécanique ou mesure électronique) en agissant sur l'angle d'incidence du foil ou sur l'angle d'un volet arrière	Portance en fonction de la surface immergée ; système autostable, le bateau monte jusqu'à ce que la surface immergée restante porte le poids du bateau à la vitesse à laquelle il avance	Partie immergée du L basculée pour se rapprocher d'un V ; autorégulation de la portance par l'incidence sur la partie basse qui évolue en fonction de l'immersion de la partie haute du foil
Avantages	Hauteur de vol stable	Autorégulation de la hauteur	Autorégulation de la hauteur
Inconvénients	Surface de foil immergée constante et donc non optimisée pour une large gamme de vitesses	Pour la stabilité, il faut un bateau très large pour compenser la perte de largeur en montant sur les foils	Autorégulation limitée à une certaine variation de vitesse : il est nécessaire de pouvoir réguler l'angle d'incidence pour augmenter cette gamme
Exemples	Moth à foil	Hydros.ch	Class C Hydros, Class C Groupama, catamarans de la 34 ^e Coupe de l'America
Formes			

3.1.2 Efforts hydrodynamiques

Portance

La portance d'un *hydrofoil* dépend de sa forme générale et des profils utilisés le long de son envergure. Les principes décrits dans l'ANNEXE I pour une aile finie s'appliquent également sur un *hydrofoil* considéré comme une aile finie sous-marine.

Trainée

Alors qu'il n'y a aucune littérature sur l'étude de la portance des *hydrofoils* à forme complexe, la trainée D d'un *hydrofoil* a été étudiée par Beaver et Zselezky (2009). Leurs recherches décomposent la trainée afin d'étudier tous les paramètres influant sur la trainée. Ils distinguent donc la trainée induite, de la trainée créée par une jonction franche dans l'eau, celle de la viscosité, celle des projections créées par les parties traversant la surface de l'eau et enfin celle à l'origine de la formation de vagues.

T. Speer (2004) a étudié la trainée pour différentes formes d'*hydrofoils* (voir Figure 3.2). Il distingue les *hydrofoils* en T (*T foil*), ceux en V (*V foil*) et les *hydrofoils* en échelle (*Ladder Foil*). Pour chaque catégorie, la corde c , l'envergure b et la profondeur d sont les variables.

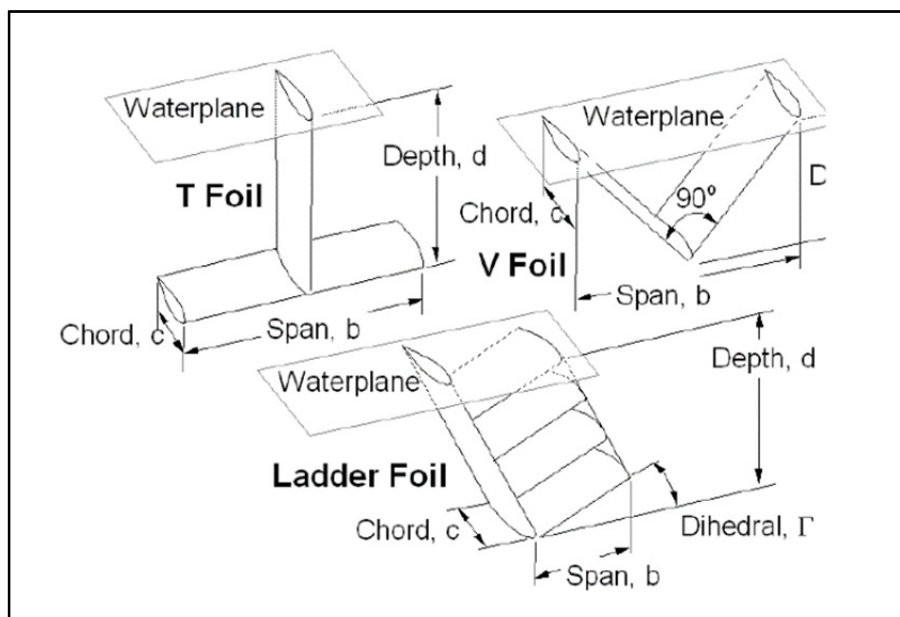


Figure 3.2 Formes d'*hydrofoils* étudiées par T. Speer
Tiré de Speer (2004)

La trainée totale (D_{totale}) est alors la somme de la trainée due à la viscosité (D_v), la trainée due aux jonctions (D_j), la trainée due aux projections (D_s), la trainée due à la formation de vague (D_w) et la trainée induite (D_i). La formule générale est donnée par l'équation (3.1) et les différents termes sont présentés dans l'équation (3.2).

$$D_{\text{totale}} = D_v + D_j + D_s + D_w + D_i \quad (3.1)$$

$$D_{\text{totale}} = q C_f S_w + q N_j C_{Dj} t^2 + q N_s C_{Ds} t^2 + S q C_{Dw} \dots \dots + \frac{1}{q} \frac{L^2}{[\pi (b^2 E)]} \quad (3.2)$$

- **La trainée due à la viscosité (D_v)** dépend de sa surface mouillée (S_w). Lorsque le profil a une faible épaisseur relative (t), la surface mouillée (S_w) est égale à deux fois la surface portante projetée. Le coefficient de friction (C_f) est alors fixé à 0,003. Il est possible d'obtenir (C_f) avec des tests expérimentaux;
- **La trainée due à la jonction (D_j)** dépend du nombre de jonctions (N_j) à 90° dans l'eau, de l'épaisseur (t) du profil, du coefficient de trainée (C_{Dj}) qui est évalué à 0,1 et de la pression dynamique (q) (voir équation A-I.8);
- **La trainée due aux projections (D_s)** dépend du coefficient de trainée (C_{Ds}) (C_{Ds} est fixé à 0,23), du nombre d'éléments sortant (N_s), de la pression dynamique (q) et de l'épaisseur du profil (t). (N_s) est de 1 quand l'*hydrofoil* est entièrement immergé, et (N_s) est de 2 quand le V de la dérive en hors de l'eau;
- **La trainée induite (D_i)** est due à la rencontre de la surpression et dépression en bout d'*hydrofoil*. L'écoulement devient alors un tourbillon, créant une forte trainée. La trainée induite dépend du facteur d'efficacité (E), de la pression dynamique (q), de la portance (L) et de l'envergure (b). Le facteur d'efficacité ϵ est de 0,64 pour un *hydrofoil* en V et de 0,98 pour un d'un *hydrofoil* en T. Lorsque l'*hydrofoil* s'approche de la surface, la trainée induite double;
- **La trainée due à la formation des vagues (D_w)** est négligeable pour un *hydrofoil*, car sa corde est très inférieure à la longueur caractéristique des vagues.

3.1.3 Effet de la dérive du catamaran, de la profondeur de la dérive portante et de l'angle de cant sur la stabilité de vol

En voile, l'objectif est d'aller d'un point A à un point B le plus rapidement possible, en parcourant le moins de distance tout en faisant le minimum de manœuvres (voir Figure 2.5). Afin de remplir cet objectif, un bateau sur *hydrofoils* doit avoir la meilleure vitesse moyenne, donc un vol stable. La géométrie de la dérive portante et les différents ajustements disponibles influencent donc le comportement hydrodynamique, facilitant ou non la stabilité de vol.

3.1.3.1 Effet de la dérive du bateau sur la stabilité

Cette partie décrit l'influence de la forme d'une dérive portante sur la dérive du bateau. Afin de simplifier l'explication, les coques sont supposées hors de l'eau, la vitesse du bateau et l'angle d'attaque de la dérive portance sont constants dans les paragraphes suivants.

Forme en T

La stabilité d'une dérive portante en T est la plus simple à analyser (voir Figure 3.3). En effet, la partie horizontale produit la force de portance alors que la partie verticale génère la force antidérive. Ainsi, seule la force antidérive dépend de l'angle λ dérive. La portance n'est donc pas régulée par la forme, il faut donc un système actif de régulation. C'est pourquoi les dérives portantes en T possèdent, soit un aileron lié à un système actif de régulation (influence sur C_L) permettant de stabiliser la force de portance selon la hauteur hors de l'eau de la dérive portante lorsque la vitesse du bateau augmente, soit un système permettant d'incliner toute la dérive portante autour de l'axe y pour augmenter l'angle d'attaque α de la partie horizontale. En résumé, la dérive du bateau n'a pas d'influence sur la portance d'un *hydrofoil* en T et donc sur sa stabilité. Par contre, la gestion de la hauteur de vol permet de réguler facilement la force antidérive selon les allures du bateau.

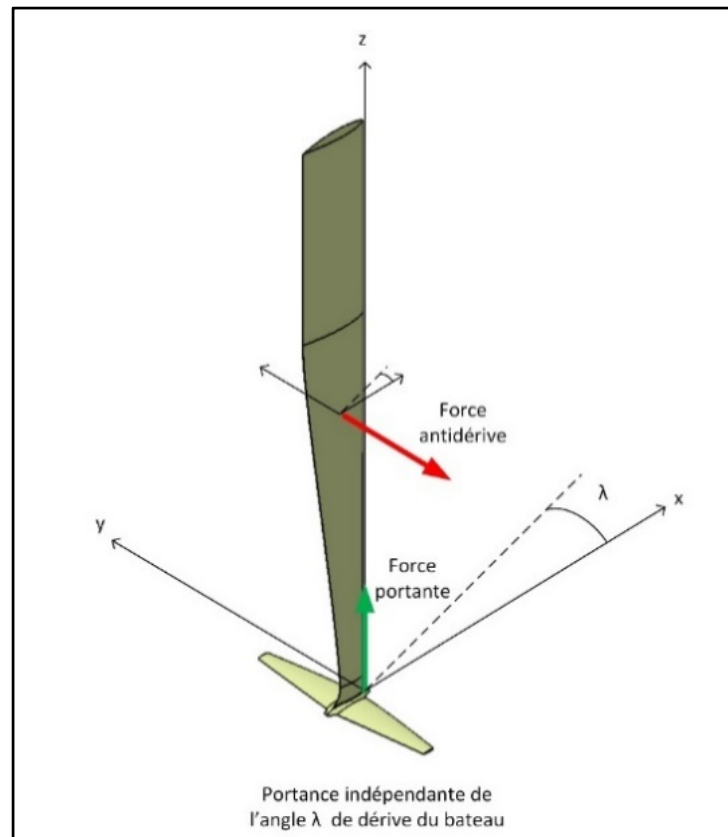


Figure 3.3 Effet de la dérive sur un *hydrofoil* en T

La forme en L

La forme en L est plus complexe puisque la dérive du bateau influence simultanément l'angle d'attaque des différentes parties de la dérive portante. La stabilité du vol est donc obtenue par la variation continue de la force antidérive et de la force de portance en fonction de l'angle λ (voir Figure 3.4). En effet, alors que la partie antidérive génère une force antidérive et une légère force de portance dépendante de l'angle de *cant* θ , la partie portante génère selon l'angle λ , une force de portance positive contrebalançant légèrement la force d'antidérive ou au contraire, une force de portance négative favorisant l'antidérive du bateau. En résumé, quand l'angle λ de dérive augmente, l'angle d'attaque λ_1 sur la partie antidérive augmente : la force antidérive devient plus importante afin de limiter la dérive. Au même moment, l'angle d'attaque λ_2 observé par la partie 2 diminue et inverse la force de portance, favorisant encore la force antidérive (vecteur rouge en pointillé de la Figure 3.4).

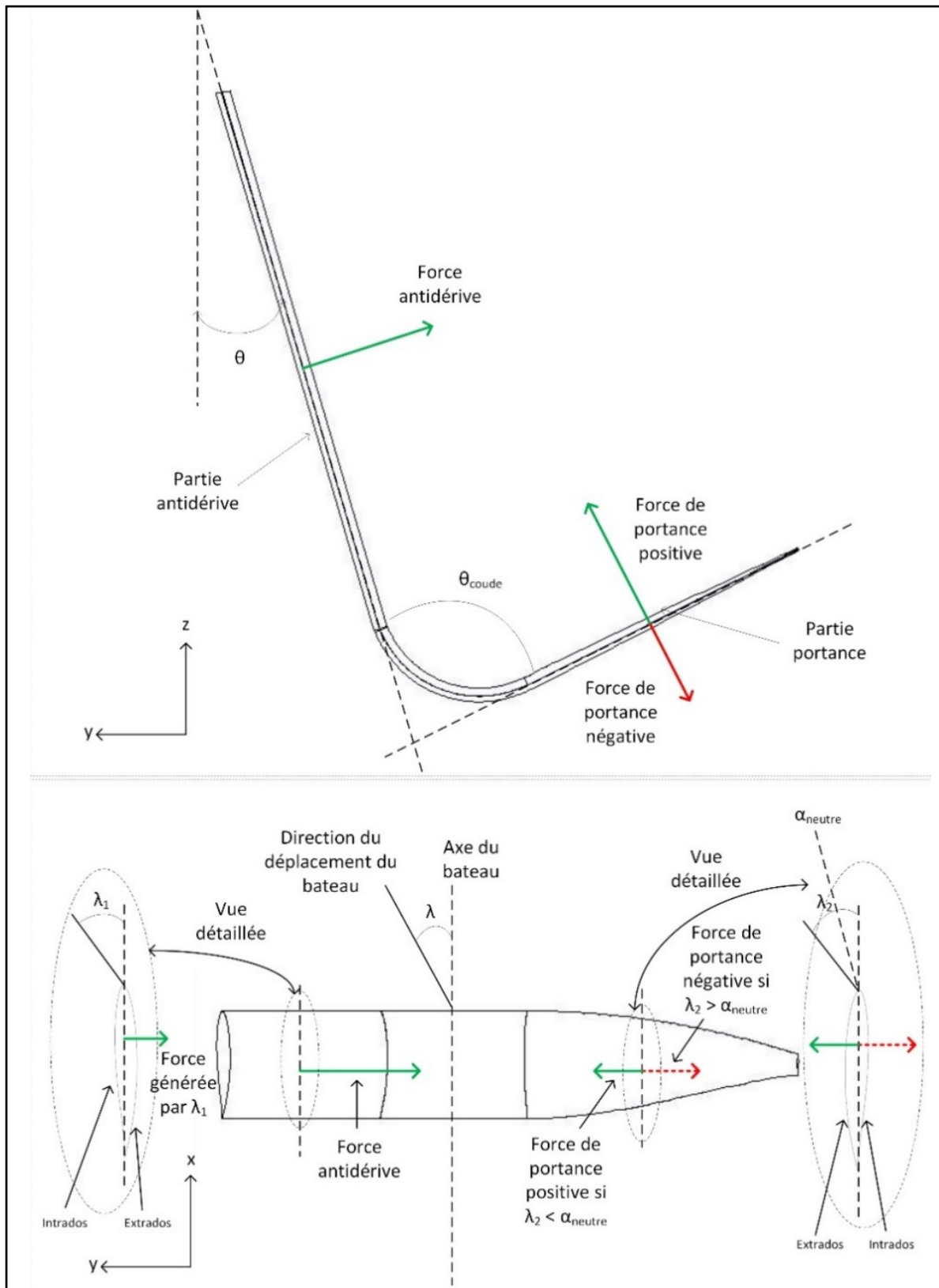


Figure 3.4 Effet de la dérive sur une dérive portante en L

Les profils utilisés généralement sur les dérives portantes sont des profils dits asymétriques. C'est-à-dire qu'ils génèrent une portance positive pour des angles d'attaques α appartenant à la plage $[\alpha_{\text{neutre}} ; \alpha_{\text{max}}]$. Or, le sens du profil de la partie portante est inversé par rapport à l'écoulement du fluide. La force de portance est donc positive quand $\lambda_2 < \alpha_{\text{neutre}}$ et négative quand $\lambda_2 > \alpha_{\text{neutre}}$.

L'étude de la dérive permet donc de distinguer deux cas :

- Angle λ élevé: la force antidérive est grande et la force de portance négative. Toutes les parties de l'*hydrofoil* génèrent des forces pour lutter contre la dérive du bateau. Cependant, dans cette situation, aucune force de portance n'est générée. Or, ces forces génèrent de la trainée induite, ralentissant le bateau : situation non souhaitable;
- Angle λ faible : la force antidérive diminue la dérive et la partie portante génère de la portance positive. Dans cette situation, la composante y des deux forces s'oppose, pouvant faire varier la dérive du bateau. Le réglage de l'angle de cant (θ) devient alors important pour contrôler la dérive en phase de vol.

La forme en J

Une dérive portante en J a une forme proche de celles en L, sauf que la partie antidérive est courbée. Cette forme a été développée pour respecter les contraintes de largeur de certaines compétitions. En effet, la partie courbée autorise des angles de *cant* θ plus importants sans sortir de la largeur autorisée. De plus, la partie courbée diminue l'influence de la gîte du catamaran sur les performances de la partie antidérive de l'*hydrofoil* puisque l'orientation de la composante de force résultante d'une partie courbée varie moins que pour une partie droite. L'étude de l'influence de la dérive sur cette forme est la même que pour la forme en L, cependant la forme courbée complexifie l'étude de l'écoulement du fluide sur la partie antidérive.

3.1.3.2 Effet de la profondeur de la dérive portante

La profondeur d'une dérive portante en L dans l'eau crée de la stabilité (voir Figure 3.5). En effet, si la dérive du bateau n'est pas prise en compte, les forces générées par les différentes parties dépendent de la surface immergée et de la vitesse. Lorsque la vitesse du bateau augmente, la force de portance augmente également afin de faire décoller le bateau (passage de la situation a) à b)). Cependant, la diminution de la profondeur réduit les surfaces générant les forces F_1 et F_2 . Ainsi, l'augmentation de la vitesse engendrant le décollage du bateau permet d'autoréguler la portance grâce à la diminution de la surface. Cette rétroaction de la forme en V crée la stabilité de vol à vitesse élevée.

Dans la situation de la Figure 3.5b, la force antidérive F_{1yb} a diminuée, car la surface est presque nulle. De plus, selon l'angle θ , la force F_{2yb} peut annuler F_{1yb} et faire dériver drastiquement le bateau. Dans ce cas, il faut se reporter au paragraphe précédent, car la dérive du bateau augmentera F_{1yb} et diminuera F_{2yb} .

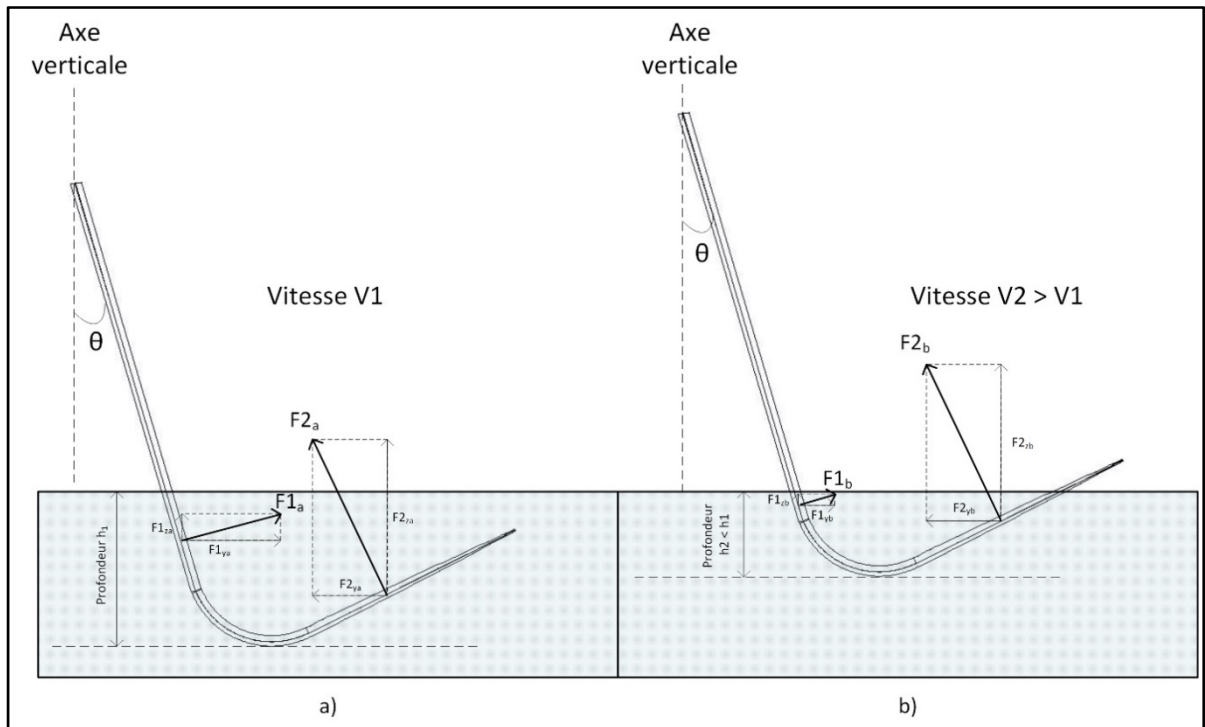


Figure 3.5 Influence de la profondeur de l'*hydrofoil* sur la stabilité de vol;
 (a) *Hydrofoil* immergé de h_1 à une vitesse V_1 ; (b) *Hydrofoil*
 immergé de $h_2 < h_1$ à une vitesse $V_2 > V_1$

3.1.3.3 Résumé du comportement

La stabilité est donc un compromis entre profondeur de la dérive portante et la dérive du bateau. En effet, en prenant en compte les deux phénomènes, lorsque la vitesse augmente, le bateau dérive et la profondeur de la dérive portante dans l'eau diminue. À angle de *cant* θ constant, la dérive du bateau augmente plus le bateau sort de l'eau. Cependant, plus le bateau est haut, plus la dérive du bateau fait augmenter la force antidérive et diminuant simultanément la portance, et donc augmente la profondeur de la dérive portante. Or si la profondeur de la dérive portante augmente, la force antidérive augmente également, et enfin la diminution de la dérive augmente la portance. Ce cycle est donc le cycle de stabilité sans action de la part de l'équipage sur l'angle d'attaque de la dérive portante ou sur l'équilibre du catamaran.

3.1.4 Effet de l'angle de *cant* θ de la dérive portante sur la dérive

Selon les allures du bateau (voir section 2.1.4), la dérive du bateau peut être plus ou moins désirée. En effet, à l'allure du près, l'objectif est de remonter le vent en parcourant le moins de distance possible. Ainsi, il est nécessaire d'avoir la plus grande force antidérive possible pour limiter la distance à parcourir et les manœuvres à réaliser. Au contraire, au large, la dérive peut être utilisée pour parcourir le minimum de distance, la force antidérive n'est pas donc importante à cette allure.

Selon la Figure 3.6, à $\theta = 0$, la force antidérive est presque totalement générée par F_1 alors que la force de portance est globalement générée par F_2 . Selon l'angle du coude, la composante y de F_2 contrebalance plus ou moins F_1 . Dans cette configuration, le bateau dérive peu : cette configuration est utilisée au près. Pour un angle de *cant* θ moyen, les forces F_1 et F_2 génèrent de la portance et la composante y de F_2 contrebalance réellement la force antidérive, composante y de F_1 . D'après l'effet de la dérive du bateau sur les efforts décrits à la section 3.1.3.1, la force F_2 varie selon l'angle λ de dérive. Cependant, dans cette configuration, la force de portance globale est importante et le bateau peut dériver. Cette configuration est donc utilisée pour des allures allant du travers au grand large, permettant au bateau de voler et donc d'avoir une vitesse moyenne plus grande. Ce compromis entre la force de portance et la force d'antidérive à faire selon les allures du bateau explique pourquoi les catamarans sur *hydrofoils* ne volent pas ou très peu au près, alors qu'ils volent tous du travers au grand large.

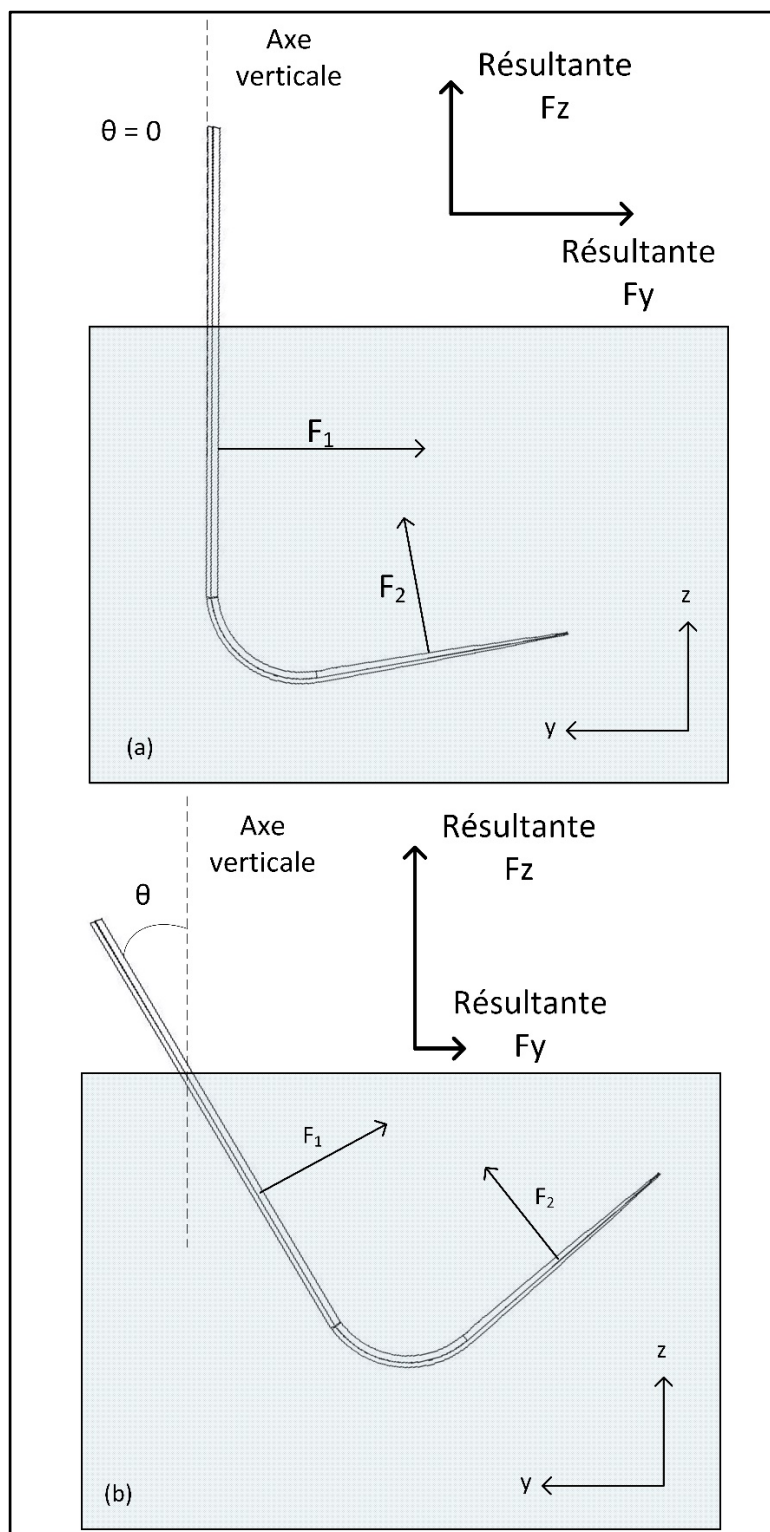


Figure 3.6 Influence de l'angle de *cant* θ sur la dérive; (a) Forces générées pour $\theta = 0$; (b) Forces générées pour θ moyen.

3.1.5 Choix du profil hydrodynamique

Cette partie présentera l'étude du profil hydrodynamique H105 de T. Speer choisi au début de ce projet.

3.1.5.1 Plage du nombre de Reynolds

La connaissance de la plage du nombre de Reynolds dans laquelle le profil évoluera est une caractéristique importante pour caractériser les coefficients de portance (C_L) et de trainée (C_D) du profil. L'équation (A-I.1) permet de calculer le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds dépend de la longueur caractéristique du profil, de la vitesse de l'écoulement, de la masse volumique et de la viscosité dynamique de l'eau. Dans le cadre des compétitions de catamaran CLASS-C, les régates se déroulent sur des lacs durant l'été. L'eau est donc supposée douce et à 20 °C. De plus, la vitesse maximale d'un catamaran CLASS-C est d'environ 35 nœuds soit 18 m/s, et il est supposé que la corde des *hydrofoils* d'un tel catamaran est entre 0,1 et 0,3m.

Les données utilisées sont donc les suivantes :

- Viscosité dynamique de l'eau douce à 20 °C : 0,001003 kg/(m.s) ;
- Masse volumique de l'eau douce à 20 °C : 998,29 kg/m³.

Les résultats sont présentés dans la Figure 3.7. Seules les variations de Re pour les longueurs caractéristiques de 0,1m, 0,2m et 0,3m sont présentées. Les *hydrofoils* développés pendant ce projet sont donc utilisés sur une plage de Re de 0-5 370 000.

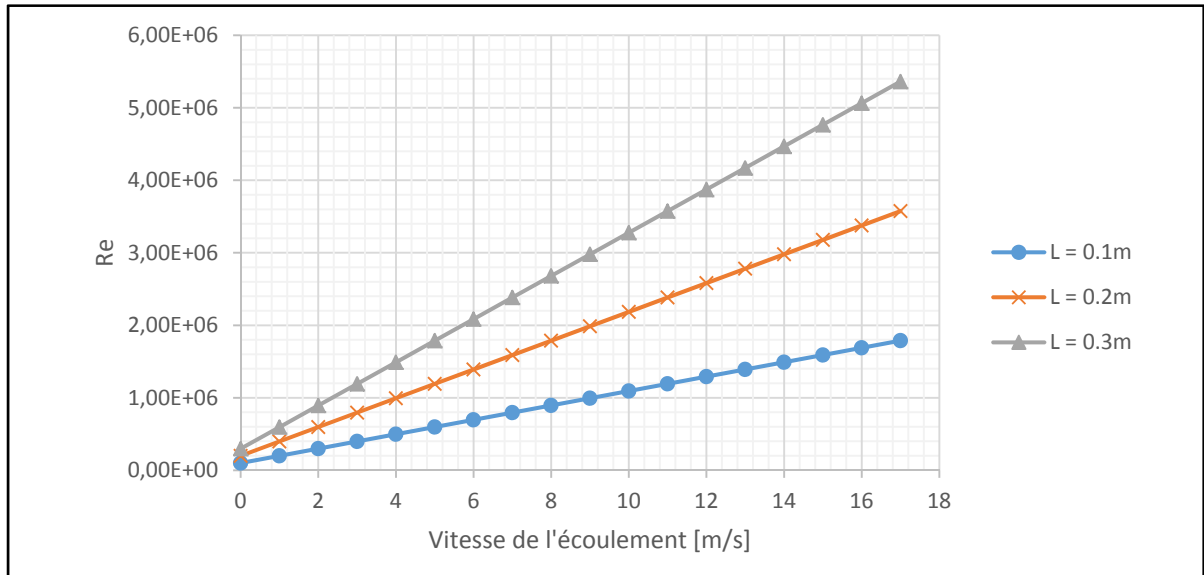


Figure 3.7 Évolution du nombre de Reynolds Re en fonction de la vitesse d'écoulement pour les longueurs caractéristiques $L_c = 0,1m$, $L_c = 0,2m$ et $L_c = 0,3m$

3.1.5.2 Profil H105 de T. Speer

L'étude de différents profils n'a pas été le sujet de ce présent projet. Le profil H105 de T. Speer est conçu spécialement pour des *hydrofoils*. Comparé à d'autres profils d'*hydrofoils* comme le Eppler 817, le profil H105 sacrifie la plage des hauts angles d'attaques pour limiter la trainée et la cavitation (Speer, 2014). Il a donc été conçu pour maximiser la portance tout en limitant la trainée. Le profil H105 a donc été choisi pour réaliser les *hydrofoils* de ce mémoire. La suite de cette partie présentera ses caractéristiques. De plus, le profil H105 a été conçu pour limiter la séparation de l'écoulement au niveau de bord d'attaque et la ventilation à basse vitesse. À haute vitesse, la cavitation est limitée pour des angles d'attaques modérés (Speer, 2014). C'est un profil biconvexe dissymétrique (voir Figure 3.8) ayant une épaisseur relative maximale t de 12,55%. La polaire permet de comparer C_L et C_D par rapport à l'angle d'attaque α (voir Figure-A V-1). L'évolution du C_L et du C_D en fonction de l'angle d'attaque α sont présentés respectivement dans Figure-A V-2 et Figure-A V-3. Toutes ces données sont regroupées dans les ANNEXE II, ANNEXE III et ANNEXE IV et seront utilisées comme base de données du modèle dynamique présenté au CHAPITRE 4.

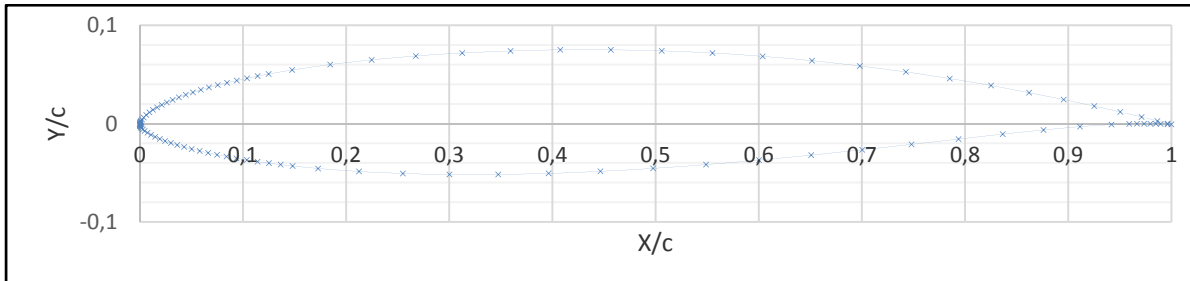


Figure 3.8 Profil H105 de T. Speer

3.1.6 Choix de la géométrie

Le choix de la géométrie est essentiel dans la conception d'un bateau sur *hydrofoils*. Cette partie justifie les formes adoptées pour la dérive portante et les safrans porteurs de cette présente étude.

3.1.6.1 Formes actuelles des *hydrofoils*

La navigation sur *hydrofoils* est encore dans sa phase développement. C'est pourquoi la forme des dérives portantes est propre à chaque bateau. Dans le cas des catamarans sportifs, la forme retenue est souvent en L ou J. Deux stratégies sont alors à distinguer pour obtenir les meilleures performances possibles :

1. Minimiser les réglages : le moins de contrôle possible entre les mains de l'équipage sont souhaités afin qu'il puisse se focaliser sur les réglages des voiles ou de l'aile rigide, sur la navigation et sur la stratégie de course;
 - Dans certains cas, l'angle d'attaque α est ajustable et le réglage de la profondeur de la dérive portante fait varier simultanément l'angle de *cant* θ . La géométrie de la dérive portante est donc complexe, s'approchant de la forme de la lettre S. Ce choix simplifie les réglages sur le catamaran, mais complexifie la fabrication de la dérive portante. De plus, les ajustements sont figés dès la phase de conception, il est donc impossible de revenir en arrière si le comportement de la dérive portante ne correspond pas aux attentes;

- Dans d'autres cas, un compromis sur la performance est réalisé pour faciliter la navigation et simplifier la géométrie de la dérive portante. En effet, tel le catamaran de série *Flying Phantom*, l'angle de cant n'est pas ajustable ni par un réglage mécanique, ni par la géométrie de la dérive. Dans ce cas, sa forme est étudiée pour avoir le meilleur compromis entre la performance et la stabilité. Cette configuration peut être un inconvénient face à un autre catamaran qui bénéficierait de tous les réglages et surtout d'un équipage très expérimenté.
2. Préserver tous les réglages : moins dépendre des choix des concepteurs ou s'adapter à toutes les situations de navigation est souhaitée dans ce cas. La forme des dérives portante est alors plus simple puisque la profondeur, l'angle d'attaque α et l'angle de *cant* θ sont variables.

3.2 Modélisation des *hydrofoils*

Cette partie présente les détails de modélisation de la dérive portante et des safrans porteurs. Les caractéristiques définies sont utilisées comme variables dans le modèle SimMechanics du CHAPITRE 4. La modélisation étant paramétrable, les résultats obtenus à la fin du CHAPITRE 4 permettent d'obtenir la forme finale des *hydrofoils* utilisée pour l'optimisation de la structure composite des *hydrofoils* du CHAPITRE 5.

Afin de faciliter la compréhension du modèle, ces pièces sont découpées en plusieurs zones décrites dans la Figure 3.9. Comme expliqué précédemment, la forme en J pour la dérive est retenue.

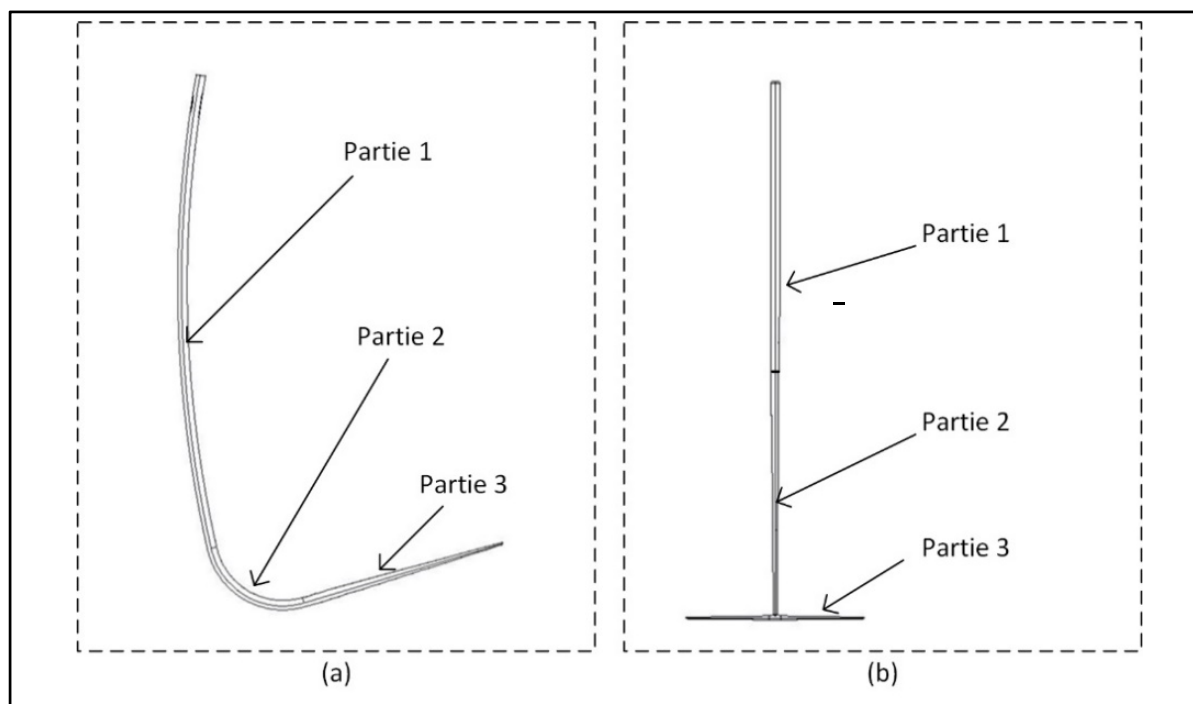


Figure 3.9 Schéma présentant les différentes parties des *hydrofoils*;
(a) Dérive portante; (b) Safran porteur

3.2.1 Modélisation de la dérive portante

3.2.1.1 Géométrie globale

La dérive portante développée au sein de ce projet de recherche est fabriquée par MC. Sa conception est un compromis afin de s'adapter au catamaran ESPADON 20 de MC et au catamaran CLASS-C construit par les étudiants. Puisque ces deux catamarans sont différents, une forme simple de dérive portante a été retenue afin de pouvoir ajuster les performances par des réglages selon le catamaran. De plus, selon le cahier des charges défini à la section 1.2.3, la géométrie doit rester simple pour la fabrication. Les ajustements de l'angle d'attaque α , de l'angle de *cant* θ et de la profondeur seront réalisés par des systèmes intégrés aux catamarans.

Ainsi, selon les observations de la section 3.1.6.1 précédente, le cas 2 décrivant une forme simple avec tous les systèmes d'ajustement est retenu. Selon l'analyse de la stabilité de la section 3.1.3, la forme en L ou en J est une forme stable. En raison des restrictions de la LC (voir section 1.2.2), la forme en J permet un ajustement de l'angle de *cant* θ maximal sans sortir de la largeur autorisée grâce à sa partie courbée. En effet, lorsque la dérive portante est relevée, sa forme courbée limite son encombrement latéral lorsque l'angle de *cant* θ est élevé. Ainsi, la forme générale de la dérive portante sera en J.

La modélisation de la dérive portante utilise le module surfacique de CATIA® V5R21. Afin de faciliter les modifications du modèle CAO, la forme générale de la dérive est paramétrable selon les variables présentées dans la Figure 3.10. Les paramètres présentés dans la figure sont utilisés dans le modèle dynamique du catamaran pour définir la dérive portante (voir section 4.1.3). Suite aux sections 3.1.3.1 et 3.1.3.2, la dérive portante doit être ajustable en profondeur, en angle de *cant* θ et en angle d'attaque α . La forme de la partie 1 est paramétrable par son rayon de courbure, sa hauteur et sa corde. La partie 2 est paramétrable par son rayon de courbure et sa corde. L'angle du coude est fixé à 90°. La partie 3 est seulement paramétrable par son envergure.

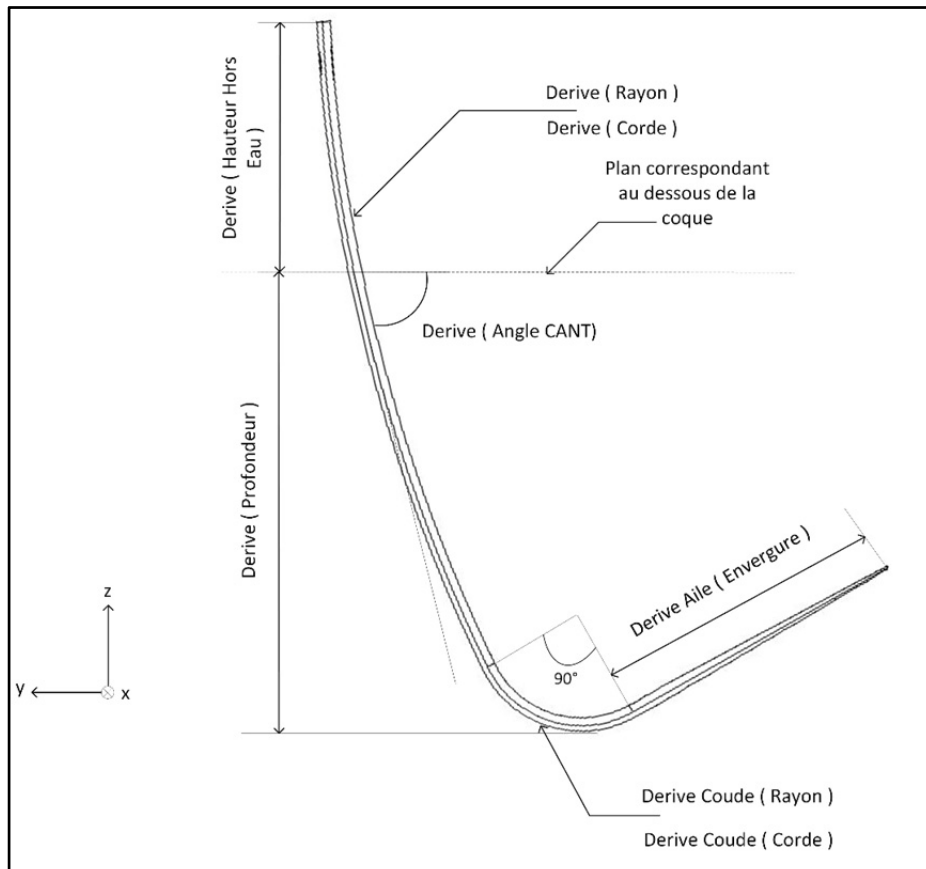


Figure 3.10 Variables de conception de la dérive portante

3.2.1.2 Géométrie de l'aile de la dérive portante

Les safrans porteurs sont les parties mobiles destinées au contrôle directionnel du catamaran (voir Figure 3.9). Dans notre cas, une aile (partie 3 du safran porteur) est placée à son extrémité. Cette aile est nécessaire pour un bateau à *hydrofoils* pour les éléments suivants :

- Stabiliser le catamaran pendant sa phase de vol;
- Récupérer une partie du poids du catamaran total (catamaran et équipage).

L'innovation sur les safrans porteurs est moins nécessaire. En effet, la fonction principale du safran porteur est le contrôle directionnel du catamaran : le profil de la partie verticale du safran porteur doit donc être symétrique et droit. Il serait impossible d'avoir une forme courbée puisque la répartition des efforts sur le safran créerait un moment sur la direction. Ce moment serait récupéré en permanence par le pilote (*skipper*).

Actuellement, les safrans porteurs sont tous de type T ou L. Cependant, alors qu'une forme en L crée un moment M par sa dissymétrie, ce moment M est nul pour la forme en T. Ainsi, les safrans porteurs de ce présent projet seront donc également en T, afin de stabiliser le vol du catamaran.

Le profil H105-V1 de T. Speer est utilisé pour les parties 1 et 2. La partie 3 a un profil dont la corde diminue, passant du profil H105-V1 au niveau de la fin de coude au profil H105-V2 à la fin de l'aile de la dérive tel que représenté par la Figure 3.11. La corde du profil est ici divisée par cinq. L'utilisation du même profil le long de la dérive permet de respecter le point 4 du cahier des charges (voir section 1.2.4), c'est-à-dire faciliter la fabrication.

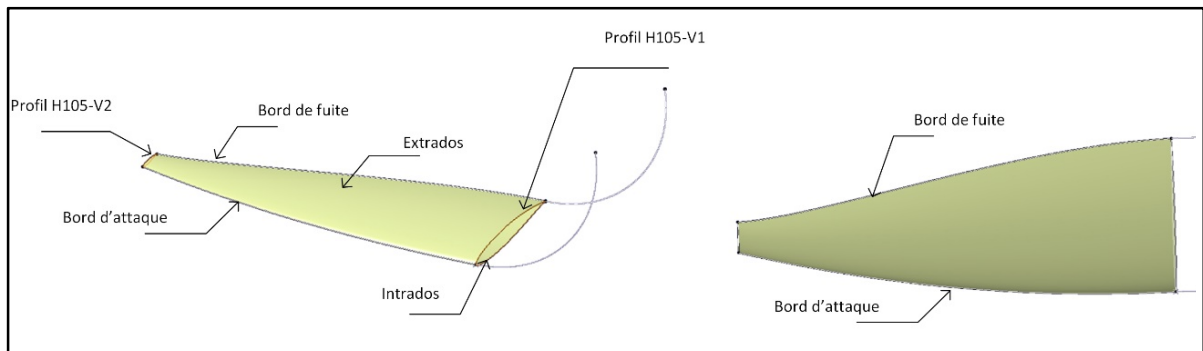


Figure 3.11 Modélisation de l'aile de la dérive portante

3.2.2 Modélisation des safrans porteurs

3.2.2.1 Géométrie globale

Les différentes variables de conception utilisées pour caractériser le safran porteur sont définies à la Figure 3.12. Certaines de ces variables seront utilisées dans le modèle SimMechanics du CHAPITRE 4. Trois catégories sont à définir :

- Direction du catamaran : Les safrans génèrent une force permettant de manœuvrer le catamaran. Les variables définissant la surface mouillée du safran caractérisent la force que le safran peut développer;

- Portance : L'aile du safran génère une force de portance. Cette force dépend de sa surface, donc de sa corde et de son envergure;
- Stabilité du vol : Pendant la phase de vol, les safrans ont une partie immergée qui varie selon la hauteur de vol. Cette caractéristique est représentée par la hauteur du safran.

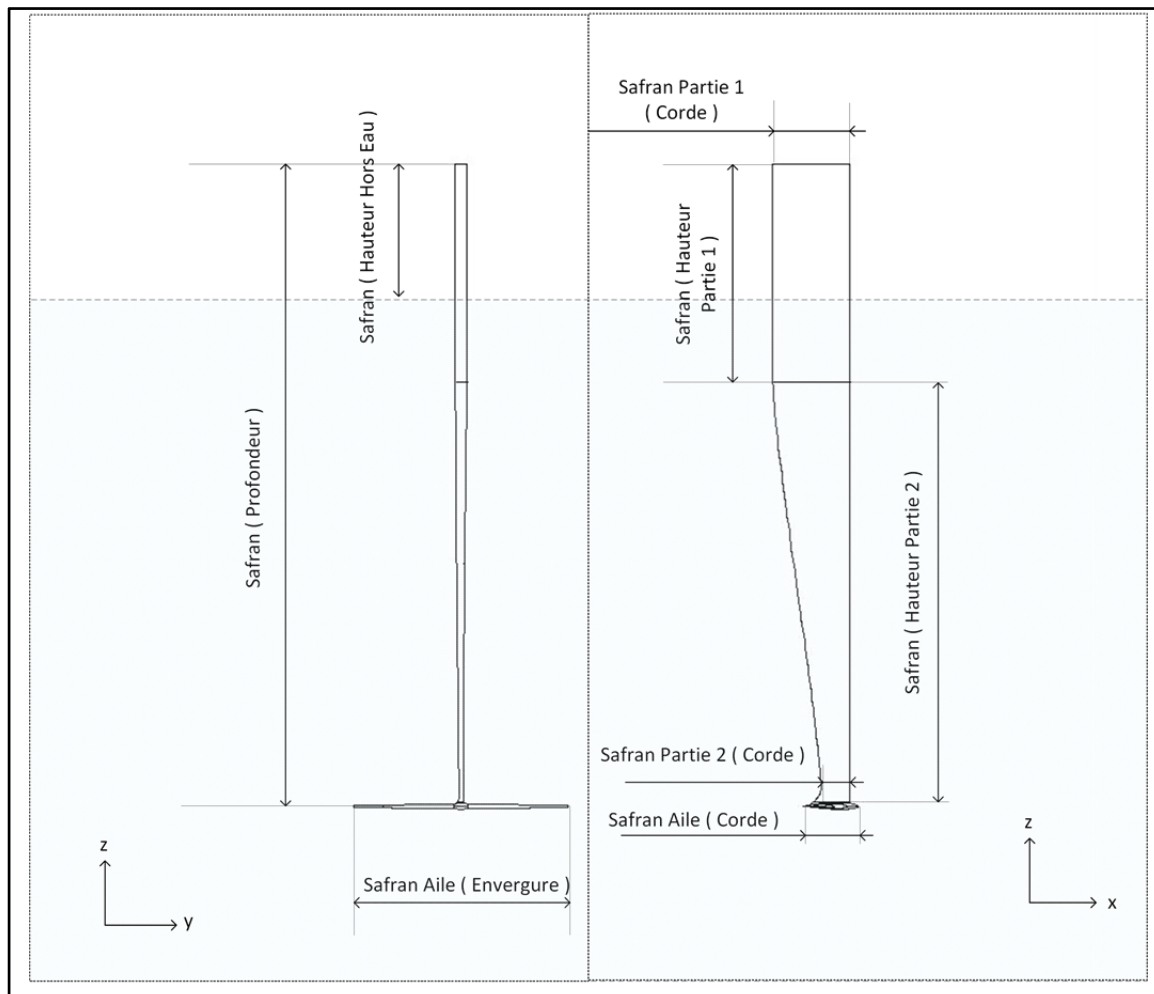


Figure 3.12 Variables de conception du safran porteur

3.2.2.2 Géométrie de la partie 2

La partie 2 verticale du safran pilote le catamaran (voir Figure 3.12). La surface immergée, lorsque le pilote pivote les safrans selon l'axe z , crée une force suivant y . Une liaison pivot autorise donc cette rotation. L'axe de cette liaison pivot doit être le plus proche possible du

centre de pression de la partie immergée afin de limiter le moment nécessaire pour entraîner en rotation le safran. Or, lorsque le catamaran vole, seul le bas du safran reste immergé. Selon la forme du safran, il est possible de faire varier le centre de poussée par rapport à la hauteur afin de faciliter ou non les efforts nécessaires à fournir par le pilote pour tourner.

Afin de limiter le moment au point de pivot du safran, réduire la distance entre ce point et les centres de poussées des profils est nécessaire. Un bord d'attaque droit (voir Figure 3.12) permet donc de réduire cette distance tout en gardant une géométrie simple.

3.2.2.3 Géométrie de l'aile

L'aile du safran ayant une épaisseur très faible, il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur au niveau de l'assemblage de l'aile avec la partie verticale du safran (voir Figure 3.13 a). En effet, les efforts de portances doivent être transmis au catamaran grâce à cette liaison. Elle doit donc être résistante, et c'est pourquoi l'augmentation de l'épaisseur permet de mettre plus de matière ainsi que des inserts métalliques. Aucune étude hydrodynamique n'a été effectuée sur cette forme, mais elle s'inspire des formes d'ailes d'*International Moths*.

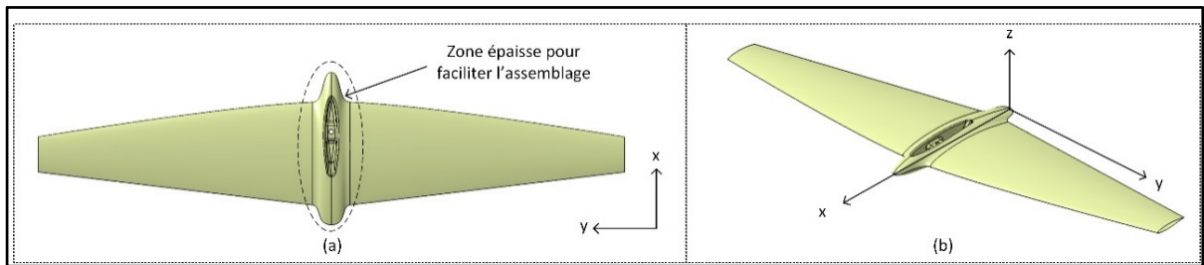


Figure 3.13 Aile du safran porteur; (a) Vue de dessus; (b) Vue isométrique

Selon l'ANNEXE I, pour une aile finie, le rapport de la longueur sur la corde (AR) est important. Ainsi, plus AR est grand, plus le coefficient de portance C_L augmente, et moins il y a de trainées créées par les tourbillons. Or, la corde doit respecter une certaine dimension afin de ne pas rendre impossible la fabrication ou rendre la pièce trop fragile. La portance étant générée par la surface de l'aile, cette surface doit être modélisée pour optimiser la portance

tout en limitant la trainée. C'est pourquoi la corde réduit quand on s'éloigne de plan milieu. En effet, il est ainsi possible d'augmenter AR, tout en optimisant sa surface portante.

3.2.2.4 Géométrie de la liaison entre l'aile et la partie verticale du safran porteur

Afin de bien assembler l'aile avec la partie verticale, une mise en position et un maintien en position sont nécessaires (voir Figure 3.14). Pour la mise en position, deux empreintes coniques sont présentes sur l'aile du safran. Elles annulent ainsi le jeu entre les deux pièces et elles permettent une mise en position de qualité. En effet, l'angle entre ces deux pièces doit être contrôlé lors de l'assemblage afin de ne pas créer une erreur d'angle d'attaque par rapport aux contrôles sur le catamaran. Pour le maintien en position, une vis et de la colle sont utilisées.

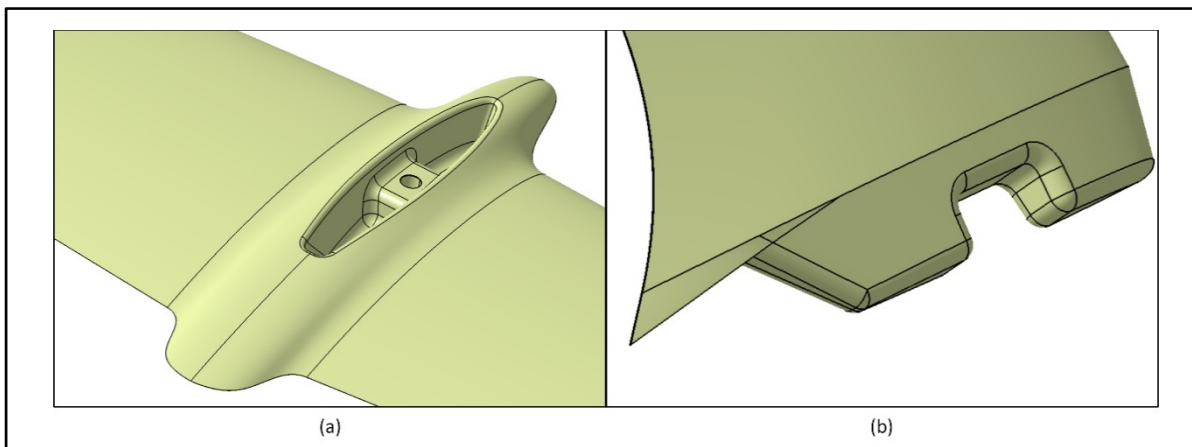


Figure 3.14 Liaison entre l'aile et la partie 2 verticale du safran porteur; (a) Empreintes sur l'aile; (b) Formes coniques sur la partie 2 verticale

CHAPITRE 4

MODÈLE DYNAMIQUE DU CATAMARAN SUR HYDROFOILS SOUS MATLAB SIMMECHANICS

Le modèle dynamique de SimMechanics (SM) de ce chapitre utilise les concepts décrits dans le CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3. Il est développé pour étudier rapidement différentes géométries d'*hydrofoils*. Une première partie présente les objectifs, les limitations et les configurations testées afin de définir le cadre du développement du modèle. Une seconde partie décrit le développement du modèle afin de comprendre l'implémentation des efforts sur les différents éléments. Finalement, l'étude de l'influence des variables de conception et de configuration des *hydrofoils* est présentée afin de définir leurs géométries finales et les cas de chargement utilisés pour l'optimisation structurale du CHAPITRE 5.

4.1 Objectifs, limitations et configurations testées

4.1.1 Objectifs

Les objectifs du modèle dynamique SM sont les suivants :

1. Évaluer la performance du catamaran en fonction de différents paramètres de conception pour déterminer les paramètres optimaux respectant le cahier des charges (voir section 1.2.3). L'évaluation de la performance sera faite par les indicateurs suivants :
 - Vitesse de décollage;
 - Vitesse maximale de stabilité.
2. Déterminer les efforts sur les *hydrofoils* afin de définir les différents cas de chargement à utiliser pour optimiser la structure composite de la dérive portante (voir CHAPITRE 5).

Vitesse de décollage

D'après la relation (A-I.3), l'augmentation de la vitesse U_{∞} du catamaran génère, dans la majorité des cas (nuancé par l'influence de la dérive expliquée dans la section 3.1.3.1), une augmentation de la portance globale (L) des *hydrofoils*. Cette portance élève le catamaran verticalement dès que la portance globale dépasse le poids de l'ensemble du catamaran et de l'équipage. Ainsi, la vitesse de décollage est acquise dans le modèle SM lorsque les deux coques sont hors de l'eau.

Stabilité

Le modèle SimMechanics crée une visualisation 3D du comportement du catamaran. La stabilité du catamaran est donc observable grâce à cette visualisation et à l'analyse des résultats. La stabilité décrit un vol de façon stable avec une assiette proche du plan horizontal. La limite de la stabilité est donc atteinte lorsque le catamaran est atteint l'une des deux situations décrites ci-dessous aux axes de la Figure 4.1 sont alors possibles :

1. Basculement autour de l'axe x : c'est un chavirage. Cette situation est rencontrée quand le bateau remonte le vent, au près. Elle dépend principalement de la force générée par les voiles ou l'aile rigide. Elle est donc contrôlée par l'équipage et peut être évitée;
2. Basculement autour de l'axe y vers l'avant : c'est un enfournage. Dans cette situation, les safrans sortent généralement de l'eau. L'équipage perd alors le contrôle du catamaran. Cette situation est rencontrée quand le catamaran est au travers ou vent arrière. La force générée par les voiles est principalement vers l'avant, créant un moment autour de l'axe y . L'avant des coques peut donc entrer dans l'eau de manière anormale, ralentissant brusquement le catamaran. L'avant des coques devient alors le point du pivot du catamaran.

L'indicateur utilisé dans le modèle pour décrire la fin de la stabilité est la hauteur du safran porteur au vent (celui sur la coque du côté le plus proche du vent) par rapport à l'eau.

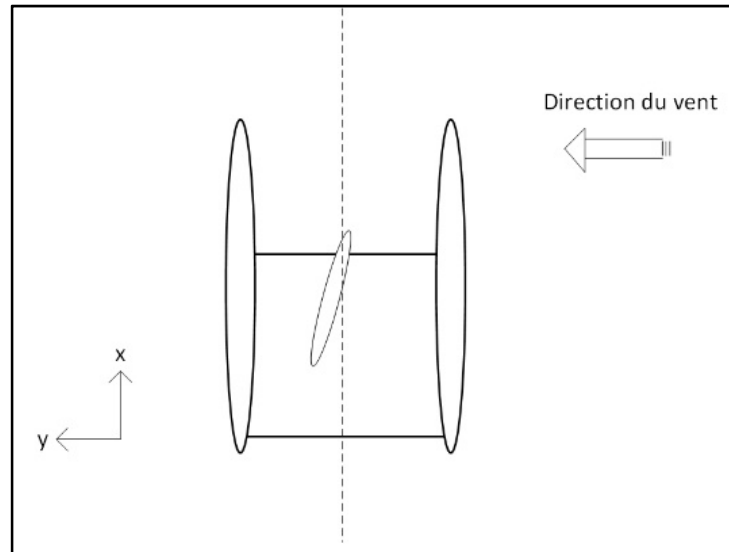


Figure 4.1 Axes de références

Efforts sur les *hydrofoils*

Les efforts sur les *hydrofoils* sont acquis pour une vitesse de 10 nœuds. Ils sont exprimés par rapport au référentiel global afin de pouvoir observer la répartition des efforts entre la portance et la force d'antidériver (voir section 4.3.2.2).

4.1.2 Limitations

La conception d'un modèle dynamique demande de modéliser les forces exercées sur les différents éléments du système mécanique. Or, pour le cas d'un catamaran où la majorité des efforts sont aérodynamiques ou hydrodynamiques, le calcul des forces demande des études *CFD* afin d'obtenir des efforts précis pour une géométrie donnée et une situation donnée. Ce modèle dynamique est développé pour être un outil de conception rapide d'*hydrofoils*. C'est-à-dire qu'il doit fournir les vitesses de décollage, de stabilité maximale et les efforts structuraux pour différentes formes en peu de temps. Il n'a donc pas l'objectif d'être un modèle permettant de calculer précisément la vitesse du catamaran dans toutes les situations tel un *Velocity prediction program (VPP)*. Des hypothèses simplificatrices sont donc posées pour bâtir le modèle SM.

Simplification des efforts sur les voiles ou l'aile rigide

L'étude détaillée des efforts sur des voiles souples ou une aile rigide n'est pas le sujet de ces travaux. Ainsi, seules une force de portance (L) et une force de trainée (D) sont implémentées au centre de poussée C_P . Le C_P est placé approximativement à la moitié de la hauteur de l'aile et à 25% de la corde (c) de l'aile. Les coefficients de portance (C_P) et de trainée (C_D) sont ceux discutés à la section 2.2.1.2. De plus, étant donné qu'il est difficile pour un catamaran sur *hydrofoils* de voler au près tel que décrit dans la section 3.1.4, les phases de vol sont obtenues avec un vent réel au grand large.

Limitation des degrés de liberté et de la dérive du catamaran

Le catamaran est un système libre dans l'espace, subissant les différentes lois de la physique pour passer d'un état d'équilibre à un autre. Simuler cette liberté est compliquée car tous les changements doivent être contrôlés. En effet, le respect de la variation de la norme, de la direction et du point d'application des efforts selon toutes les situations rencontrées pendant la simulation est primordial afin d'avoir une suite d'états d'équilibres réalistes. C'est pourquoi la représentation physique des différentes parties du catamaran (dimensions, inerties, centre de gravité) doit également être réaliste dans le cas d'un objet libre dans l'espace puisque tout déséquilibre des efforts crée un mouvement dynamique. Or, lors du développement du modèle, il a été impossible de libérer totalement le catamaran dans l'espace sans créer une situation d'instabilité. En effet, l'approximation des centres de poussée C_P des différentes forces, ainsi que la simplification de certains efforts empêchent le catamaran d'être en équilibre lorsqu'il est totalement libre. Afin de résoudre ce problème, le catamaran est libéré selon les axes où les efforts sont bien représentatifs de la réalité. Le catamaran peut donc se déplacer en translation sur l'axe x et z , et en rotation autour des axes x et y (voir Figure 4.1). Par conséquent, les effets de la dérive du catamaran ne sont donc pas pris en compte. Cette limitation annule l'effet du cycle de stabilité créé par la dérive du catamaran. La force antidérive est donc plus faible qu'en réalité, et la force de portance plus importante.

Limitation de l'évolution des configurations

Les équations décrivant la dynamique sont basées sur des équations dérivées. Ces équations ne tolèrent donc pas de grandes variations d'états entre chaque itération, car le résultat pourrait tendre à diverger. SM interdit donc la modification des variables de configuration (ces variables sont les variables de positionnement des différents éléments) pendant la simulation. Cette limitation empêche ce modèle de simuler de façon réaliste les réglages à faire pour les différentes allures. Or, les réglages réduisant la vitesse de décollage sont différents de ceux permettant la vitesse maximale du catamaran en vol.

4.1.3 Description des variables

Les variables de conception des *hydrofoils* ont été documentées dans la section 3.2. Elles permettent de définir la géométrie globale de la dérive portante et des safrans porteurs. Elles sont résumées dans le Tableau 4.1. Cependant, seule l'influence de quelques variables de conception est observée dans le modèle SM (voir Figure 3.10 et Figure 3.12). Ces variables sont identifiées par une étoile dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Variables de conception des *hydrofoils*

	Dérive portante	Safran porteur
Variables de conception	Derive (Corde)*	Safran Partie 1 (Corde)
	Derive (Rayon)*	Safran Partie 2 (Corde)
	Derive Coude (Rayon)*	Safran Aile (Envergure) *
	Derive Coude (Corde)	Safran Aile (Corde) *
	Derive Aile (Envergure)*	

Le comportement du catamaran varie également selon leurs inclinaisons par rapport au catamaran, et donc par rapport à l'écoulement du fluide. La profondeur, l'angle d'attaque et de *cant* de la dérive portante et l'angle d'attaque des safrans porteurs sont donc paramétrables (voir Figure 3.10 et Figure 3.12). Ces variables de configuration sont résumées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Variables de configuration des *hydrofoils*

	Dérive portante	Safran porteur
Variables configuration	Derive (Angle Attaque)*	Safran (Profondeur)
	Derive (Hauteur Hors Eau)	Safran (Hauteur Hors Eau)
	Derive (Profondeur)*	Safran (Angle Attaque)*
	Derive (Angle CANT)*	

4.1.4 Variables étudiées

Ce modèle SM est conçu pour évaluer l'influence d'un certain nombre de variables sur le comportement du catamaran. Ainsi, 53 configurations sont testées. Lors de chaque acquisition, une seule variable d'une configuration de base définie plus loin est modifiée. Ces résultats démontrent l'influence des variations d'une variable indépendamment des autres variables. Le Tableau 4.3 décrit la plage des valeurs variables discrètes testées dans le modèle dynamique. Les configurations testées sont données en ANNEXE VI. De plus, les valeurs des variables testées sont définies par l'observation des *hydrofoils* existants sur les catamarans CLASS-C. La vitesse de décollage et la vitesse maximale de stabilité sont alors acquises pour chaque configuration. Les forces sur la dérive portante sont acquises pour une vitesse de 10 nœuds également. L'objectif est de déterminer les effets des variables de configuration et des variables de conception sur le comportement du catamaran et sur les efforts de la dérive portante.

Tableau 4.3 Configurations testées

Variables	Valeurs
Derive (Profondeur)	[1;1,3] [m]
Derive (Corde)	[0,2 ; 0,25 ; 0,28] [m]
Derive (Rayon)	[3 ; 4 ; 5] [m]
Derive Coude (Rayon)	[0,15 ; 0,25 ; 0,3] [m]
Derive Aile (Envergure)	[0,5 ; 0,7 ; 0,8] [m]
Safran Aile (Corde)	[0,08 ; 0,1] [m]
Safran Aile (Envergure)	[0,45 ; 0,5] [m]
Derive (Angle CANT)	[0 ; 10 ; 20] [°]
Derive (Angle attaque)	[0 ; 3 ; 6] [°]
Safran (Angle attaque)	[-2 ; 0 ; 3] [°]

4.2 Développement du modèle SimMechanics du catamaran

4.2.1 Structure et variables du modèle

Cette partie est consacrée à la description des éléments standards utilisés dans SM pour simuler le comportement d'un système mécanique. Elle décrira plus particulièrement la façon dont l'ensemble du catamaran est modélisé dans le modèle SM. Ensuite, la gestion des différents degrés de liberté du catamaran, de l'assemblage des différents éléments et des données d'entrées est présentée.

4.2.1.1 Description des éléments

SimMechanics simule le comportement dynamique d'un système multicorps soumis à des contraintes ou à des mouvements. Dans le cadre de ce projet, le modèle utilise le solveur différentiel ODE45 (Dormand-Prince). SM utilise différents types de blocs pour représenter et simuler les systèmes mécaniques. Chaque bloc est ensuite relié afin de créer le système complet. Les corps (*Body Elements*), les contraintes (*Constraints*), les forces et les moments

(*Forces and Torques*), les référentiels et changement de référentiels (*Frame and Transforms*), les engrenages et accouplements (*Gears and Couplings*), les liaisons (*Joints*) et les utilitaires (*Utilities*) sont les sept catégories de blocs disponibles dans la 2nd génération de SM (voir Figure 4.2)

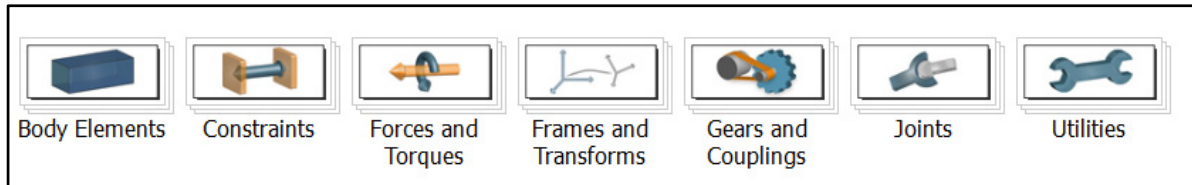


Figure 4.2 Blocs de SimMechanics

- Les corps : Ils dérivent les éléments du système mécanique. Ils regroupent les informations liées à la forme, les dimensions, la masse, l'inertie, et la représentation graphique de l'élément;
- Les contraintes : Elles sont des limitations géométriques d'angle ou de distance entre deux corps du modèle. Elles sont liées à deux corps dans le référentiel global ou lié au référentiel d'un des deux corps;
- Les forces et moments : Les forces et moments sont des efforts appliqués sur un corps. Ils peuvent être implémentés par rapport au référentiel global ou liés directement au référentiel relatif du corps. Il est possible de représenter des forces et moments externes, internes, un champ de gravité, un ressort ou un amortisseur, ou des lois d'attraction ou de répulsion;
- Les référentiels et changements de référentiels : Ils représentent le lien dans l'espace entre les différents blocs. Ils permettent notamment de fixer la position des liaisons ou des efforts par rapport au corps lié ou d'acquérir la position entre deux référentiels;
- Les engrenages ou les accouplements : Ils représentent la transmission de mouvement entre des engrenages ou des poulies. Ces éléments simulent donc la transmission d'effort et de mouvement entre deux composantes en respectant les lois mécaniques des engrenages ou poulies (rapport de réduction, etc...);
- Les liaisons : Elles simulent le lien mécanique entre deux pièces. Grâce à 15 blocs différents, tous les degrés de liberté peuvent être simulés. Ces blocs permettent

également d'acquérir la position, la cinématique ou les efforts de la liaison utilisée. Il est possible d'imposer le mouvement ou d'imposer un effort. La dissipation due au frottement peut être implémentée;

- L'utilitaire : Il est composé d'un seul bloc regroupant les informations sur la norme et la direction de la gravité utilisée dans le modèle SM.

4.2.1.2 Interface du modèle

Les modèles SM utilisent une interface visuelle pour créer le système mécanique afin de pouvoir modéliser des systèmes sans devoir programmer. Cependant, le nombre d'éléments et d'informations rend rapidement la lecture du modèle difficile pour des systèmes complexes. Le développement d'un modèle SM nécessite donc de créer une hiérarchie dans le modèle grâce à des dossiers nommés masques. Ces masques peuvent recevoir des variables, des données, des blocs.

Afin de faciliter l'utilisation du modèle, un masque est utilisé pour chaque fonction ou groupe d'éléments du modèle (voir Figure 4.3). Quatre zones sont à distinguer :

- Zone 1 : configurations des variables et de l'acquisition des données;
- Zone 2 : modèle SM du catamaran;
- Zone 3 : gestion des fonctions contrôlant le comportement du catamaran;
- Zone 4 : gestion des calculs des différentes forces.

Ce choix est arbitraire : il est utilisé pour gagner du temps lors des changements de configurations et faciliter la compréhension globale du modèle. Dans ce modèle, les masques ne sont pas dynamiques, mais il est possible d'afficher des informations en temps réel si besoin.

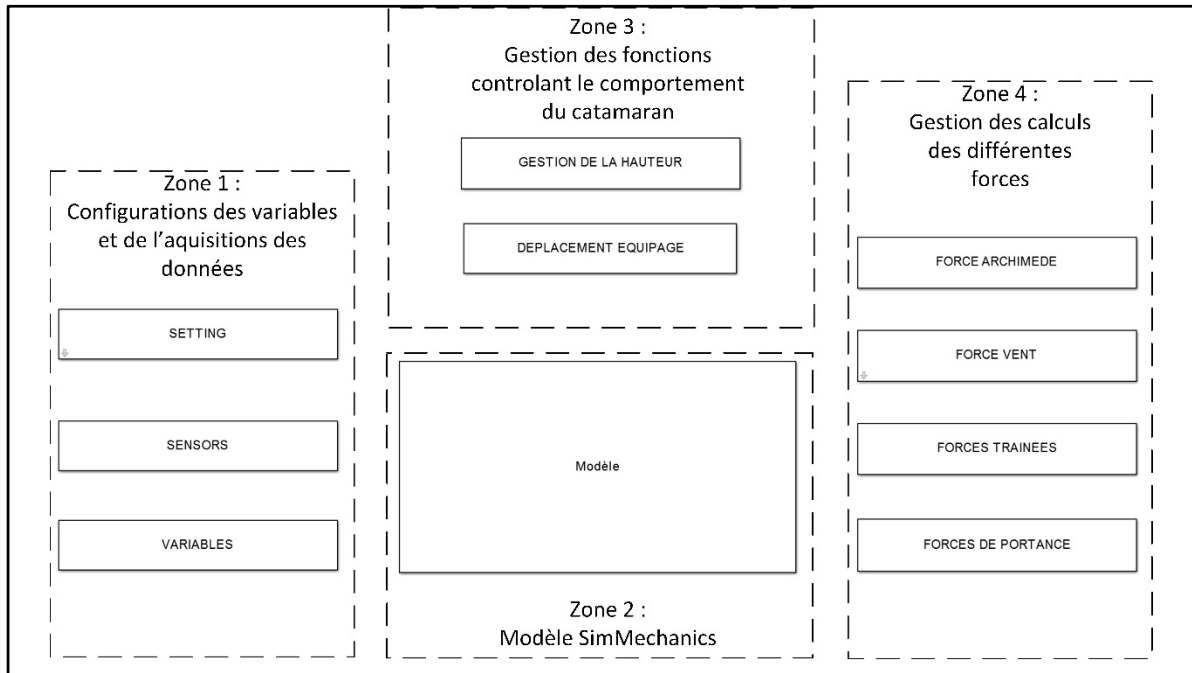


Figure 4.3 Interface de la base du modèle SM du catamaran

4.2.1.3 Gestion des degrés de liberté du catamaran

Le choix du solveur, la définition des caractéristiques de la gravité et le choix du référentiel global sont regroupés dans des masques définis par SimMechanics (voir Figure 4.4). Le modèle SM du catamaran évolue sur l'eau représentant le référentiel global du modèle. La position et la vitesse du catamaran sont donc acquises par rapport à ce référentiel global. Les données de position et de vitesse du modèle SM sont acquises sur la liaison entre l'eau et le catamaran. Les conditions initiales (position, vitesse, accélération ou efforts) sont définies en entrée de la liaison. Selon les limitations décrites à la section 4.1.2, la translation suivant y et la rotation suivant z sont bloquées. La liaison utilisée est la liaison qui permet de gérer manuellement les six degrés de liberté. Ce choix simplifie la modification et le contrôle des degrés de liberté. En effet, les liaisons possédant des caractéristiques plus spécifiques (pivot, plan, etc...) ont leurs repères prédéfinis, nécessitant des changements de repères selon le mouvement souhaité. L'assiette du catamaran est acquise à la sortie de cette liaison. Par prévention, l'utilisation d'un filtre passe-bas au niveau de l'acquisition des données réduit

l'influence des perturbations de haute fréquence. La fréquence de coupure utilisée est de 10Hz afin de ne pas atténuer les fréquences du comportement réel du catamaran.

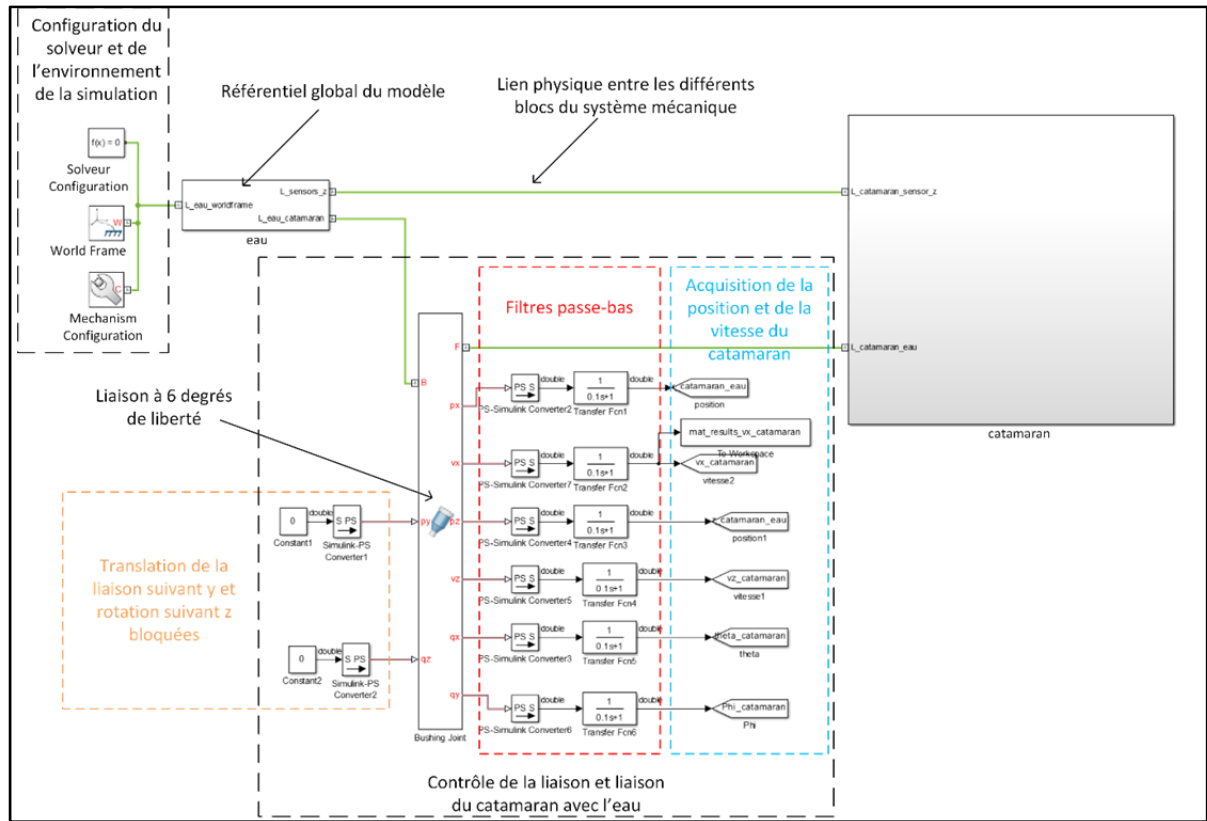


Figure 4.4 Gestion des degrés de liberté du catamaran

4.2.1.4 Gestion de l'assemblage des différents éléments du catamaran du modèle

Les différents éléments du catamaran sont assemblés par différentes liaisons. Tous les degrés de liberté de ces liaisons sont bloqués afin de figer la configuration du catamaran. L'utilisation de liaisons au lieu d'encastrement a été adoptée, car l'acquisition des données s'effectue seulement au niveau des liaisons. De plus, seules les entrées d'une liaison peuvent être contrôlées au cours de la simulation.

Le modèle dynamique du catamaran a été construit de la manière suivante (voir Figure 4.5) :

- Zone 1 : Les deux coques ont leurs référentiels relatifs calculé par rapport au référentiel global lié à l'eau. Une liaison encastrement entre les coques et la plateforme rigidifie l'ensemble;
- Zone 2 : Des liaisons pivots suivant z lient les safrans porteurs aux coques. Des liaisons à deux degrés de liberté en rotation lient les dérives portantes aux coques. Les réglages de la configuration des *hydrofoils* s'effectuent au niveau de ces liaisons par le changement des angles d'attaques α et des angles de *cant* θ ;
- Zone 3 : Le corps des dérives portantes et des safrans porteurs sont définis. Le masque simplifie ici la lecture du modèle;
- Zone 4 : La plateforme lie les deux coques;
- Zone 5 : L'équipage se déplace sur la plateforme afin d'équilibrer le catamaran pendant la navigation. Le pilote (*skipper*) et l'équipier sont donc liés à la plateforme par une liaison glissière permettant leur déplacement;
- Zone 6 : L'aile rigide est liée par encastrement au mât, qui est lié à la plateforme par une liaison pivot. Son orientation est alors paramétrable.

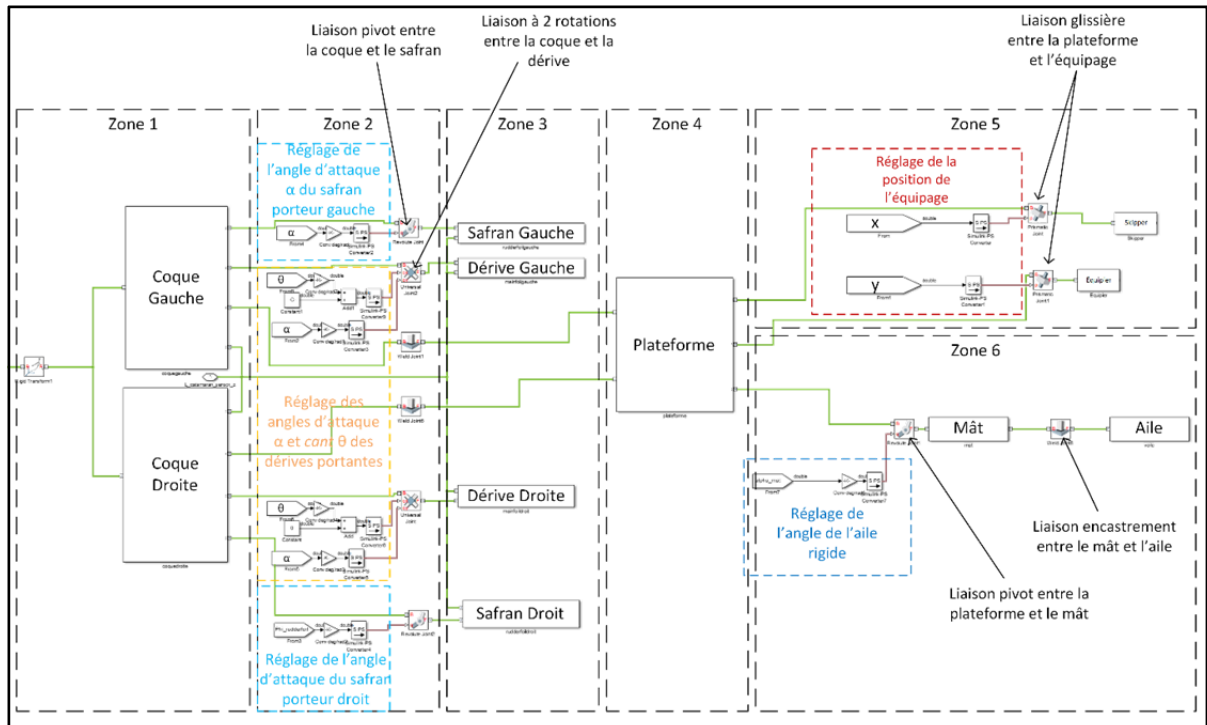


Figure 4.5 Assemblage des différents éléments du catamaran dans le modèle SimMechanics

4.2.1.5 Gestion des variables de conceptions et des variables de configuration

L'objectif de ce modèle est de tester rapidement des formes d'*hydrofoils* et des configurations différentes. Les variables de configurations étant intrinsèques au modèle, il est possible de modifier directement ces variables dans l'interface de SM (voir Figure 4.6). L'accès aux variables de configurations est alors simple et rapide. Cette interface utilisateur est disponible pour modifier l'angle d'attaque α et de *cant* θ de la dérive portante, et l'angle d'attaque α des safrans porteurs. Il est également possible de régler l'angle caractérisant la longueur de l'arc de cercle du coude de la dérive portante, cependant cette variable n'a pas été étudiée durant l'étude. Les variables de conception des *hydrofoils* sont disponibles dans un fichier MATLAB puisque la forme est obtenue par un traitement des différents paramètres préalable au chargement du modèle SM. La disponibilité de tous ces paramètres dans le même fichier facilite également le traitement des données.

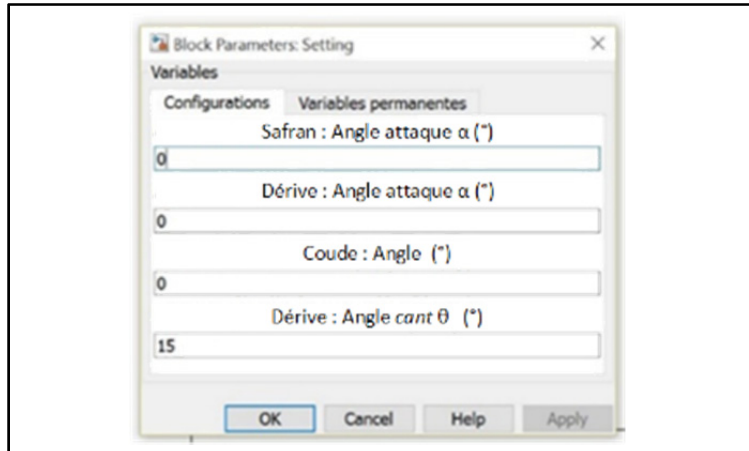


Figure 4.6 Interface utilisateur pour modifier les variables de configuration

4.2.2 Caractéristiques dimensionnelles des différents éléments du catamaran ESPADON 20 de MC et du catamaran CLASS-C

La conception soignée du modèle SM permet de modifier rapidement la géométrie du catamaran. En effet, l'utilisation de paramètres stockés directement dans le modèle grâce aux masques, ou dans un fichier MATLAB lu par SM au début de la simulation, permet un gain de temps pour tester différentes configurations. Le catamaran CLASS-C n'ayant pas encore été conçu pendant le développement du modèle SM, seules les caractéristiques du catamaran ESPADON 20 de MC ont été implémentées dans le modèle SM.

SimMechanics modélise tous les éléments par des formes géométriques simples possédant une masse et une inertie. Le catamaran est donc modélisé par des parallélépipèdes et des cylindres. Le Tableau 4.4 fait la liste exhaustive des éléments et des caractéristiques de l'ESPADON 20 et du catamaran CLASS-C. La comparaison des caractéristiques de l'ESPADON 20 et du catamaran CLASS-C ainsi que les masses justifient l'utilisation de l'ESPADON 20 pour simuler le comportement d'un catamaran entre 20 et 25 pieds sur *hydrofoils*. Les caractéristiques dimensionnelles et de masse du catamaran CLASS-C sont les objectifs fixés par les étudiants pendant la phase de conception de ce catamaran.

Tableau 4.4 Caractéristiques des éléments du catamaran ESPADON 20 et du CLASS-C

Éléments	Nombre	ESPADON 20	CLASS-C
Coque	2	L = 6,1m ; l = 0,3m ; H = 0,4m ; Masse = 55 kg	L = 7,62m ; l = 0,3m ; H = 0,3m ; Masse = 40 kg
Traverse	2	L = 3,2m, Masse = 15kg	L = 4,25m, Masse = 5kg
Mât	1	H = 10m ; Masse = 20kg	H = 10m ; Masse = 15kg
Voile ou Aile	1	Surface = 26 m ² Masse = 20kg	Surface = 30 m ² Masse = 55kg
Plateforme (Trampoline)	1	L = 3,2m ; l = 1,6m Masse = 20 kg	L = 3,81m ; l = 4,25m Masse = 10 kg
Dérive portante	2	Masse visée 12kg	Masse 12kg
Safran porteur	2	Masse 3 kg	Masse 3 kg
	Masse totale :	230kg	200kg

4.2.3 Implémentation et gestion des efforts sur les différents éléments

4.2.3.1 Efforts sur les coques

Les coques sont soumises à la poussée d'Archimède (voir section 2.2.2.1) qui permet de maintenir les coques à la surface de l'eau. Pour cela, un programme a été écrit et testé pour calculer la poussée d'Archimède sur une coque quelconque. Le déplacement des coques dans l'eau génère de la trainée (voir section 2.2.2.2), et selon l'écoulement du fluide par rapport au plan symétrique de la coque, le fluide peut générer également une force antidérive. Cependant cette dernière n'a pas été implémentée dans le modèle, car la dérive n'est pas prise en compte (voir section 4.1.2).

La poussée d'Archimède :

Une modélisation réaliste de la poussée d'Archimède $F_{\text{Archimède}}$ est essentielle au bon fonctionnement du modèle SM du catamaran. En effet, $F_{\text{Archimède}}$ doit s'adapter en continu à la variation de l'assiette du catamaran en mouvement afin de garder le catamaran en équilibre. Un programme MATLAB a ainsi été écrit afin d'obtenir la force $F_{\text{Archimède}}$ et la

position de son centre de poussée C_P (voir section 2.2.2.1) d'une coque quelconque. Le programme utilise une modélisation surfacique de la coque au format *STL*. Il peut analyser facilement et rapidement une coque donnée afin de pouvoir modifier le modèle dynamique rapidement.

Structure du programme

Le programme est écrit sous la forme d'une fonction MATLAB. Les variables entrées de cette fonction sont donc le fichier *STL* de la coque, la hauteur de l'eau par rapport à la coque, l'angle de roulis et l'angle de tangage. Les sorties sont la norme de la PA et les moments créés par la PA par rapport au centre de gravité de la coque.

La méthode et la structure du programme sont décrites ci-dessous :

- Lecture du fichier .STL (voir ANNEXE VII) contenant le surface de la coque afin d'obtenir le nombre de triangles formant la surface globale de la coque;
- Lecture et sauvegarde dans une matrice des coordonnées du vecteur normal et des coordonnées des trois sommets de chaque triangle;
- Calcul du volume total et du centre de gravité de la coque;
- Rotation par rapport au centre de gravité calculé de la surface de la coque selon l'angle de tangage, l'angle de roulis et translation suivant le vecteur z de la coque pour respecter les données d'entrées de la fonction;
- Détermination du volume de la coque immergée par rapport au plan de l'eau. Pour cela, la position des sommets des triangles est comparée à un plan horizontal représentant la surface de l'eau à la hauteur z ;
 - Suppression des triangles qui ont leurs trois sommets au-dessus la surface de l'eau;
 - Sauvegarde des triangles qui ont leurs trois sommets en dessous la surface de l'eau;
 - Sélection triangles restants, soit ceux qui ont un sommet en dessous la surface de l'eau et un autre au-dessus, soit les triangles ayant un sommet ou deux sommets sur la surface de l'eau;

- Découpe des triangles sélectionnés (création d'un ou de deux sommets sur la surface de l'eau) en supprimant la partie au-dessus de la surface de l'eau;
- Sélection et liaison de tous les sommets des triangles sur la surface de l'eau afin de fermer le volume immergé;
- Calcul du volume immergé et de son centre de poussée.
- Calcul du moment exercé par la PA par rapport au CG de la coque.

Suite à l'exécution de la fonction, toutes les données sont extraites et utilisées dans le modèle. Afin de limiter le temps d'exécution dans le modèle SimMechanics, une matrice a été créée regroupant les données. La matrice regroupe alors les angles de roulis de -45° à $+45^\circ$ avec un pas de 1° ; les angles de tangage de -45° à $+45^\circ$ avec un pas de 1° ; les hauteurs de -3m à $+5\text{m}$ avec un pas de $0,5\text{m}$. En effet, la hauteur du CG de la coque par rapport à l'eau peut être de $3,0\text{m}$ si l'angle de tangage est élevé. Ces différents paramètres étant acquis à chaque itération pendant la simulation, la matrice est interpolée. Dans la simulation, l'équilibre est alors atteint grâce à une variation du volume immergé et du centre de poussée par rapport à l'inclinaison de la coque.

Résultats du programme de la poussée d'Archimède

Afin de valider le programme, la surface de la coque traitée par le code est présentée (voir Figure 4.7 ou Figure 4.8) en identifiant la partie immergée (en jaune) et la partie au-dessus de l'eau (en bleue). Cette figure permet de voir le découpage des triangles de la surface de la coque selon la configuration testée. En effet, la zone en jaune est celle utilisée pour le calcul du volume immergé. La position de son barycentre CB est alors calculée afin d'obtenir les moments de la force d'Archimède par rapport au centre de gravité CG de la coque.

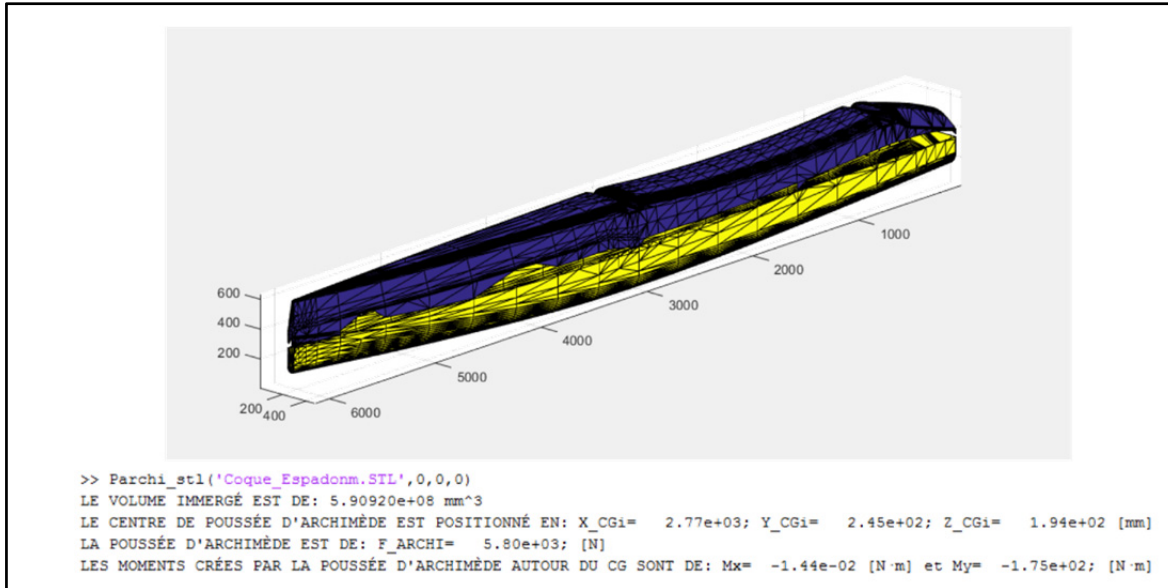


Figure 4.7 Résultats du programme de calcul de la poussée d'Archimède pour une hauteur d'eau passant par le CG de la coque ($z = 0$) et pour des angles nuls

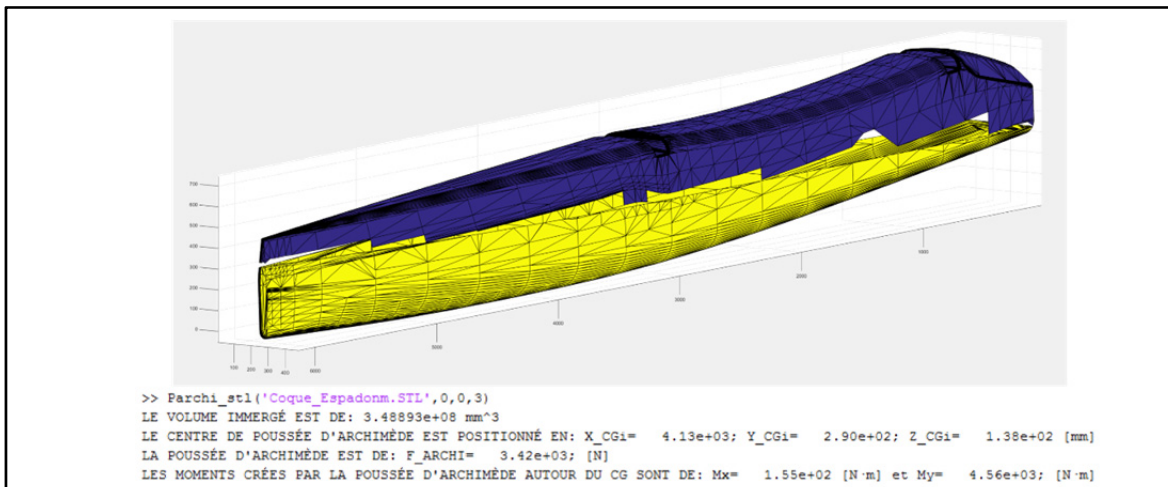


Figure 4.8 Résultats du programme de calcul de la poussée d'Archimède pour une hauteur d'eau passant par le CG de la coque ($z = 0$), angle de roulis nul et 3° en angle de tangage

Pour une configuration quelconque, la poussée d'Archimède implémentée sur chaque coque en fonction de la vitesse a été acquise (voir Figure 4.9). À $t=0$, des oscillations sont visibles, car la position des coques par rapport à l'eau n'est pas équilibrée. Afin de dissiper ces oscillations, un faible coefficient d'amortissement a été introduit dans les liaisons du modèle dynamique. En effet, le modèle dynamique sans coefficient d'amortissement n'est pas stable puisque toute perturbation est conservée ou amplifiée naturellement par les différents

algorithmes de SM. Or en réalité, tout phénomène s’amortit avec le temps s’il n’y a plus d’excitation.

Dans le modèle, la coque gauche est au vent et la coque droite est sous le vent. Naturellement, pendant la navigation, la coque au vent lève en premier. Ensuite, grâce à l’augmentation de la vitesse du catamaran, les *hydrofoils* génèrent assez de portance pour lever la coque sous le vent. Le calcul de la poussée d’Archimède est donc cohérent. La portance des hydrofoils complète la somme des poussées d’Archimède des deux coques.

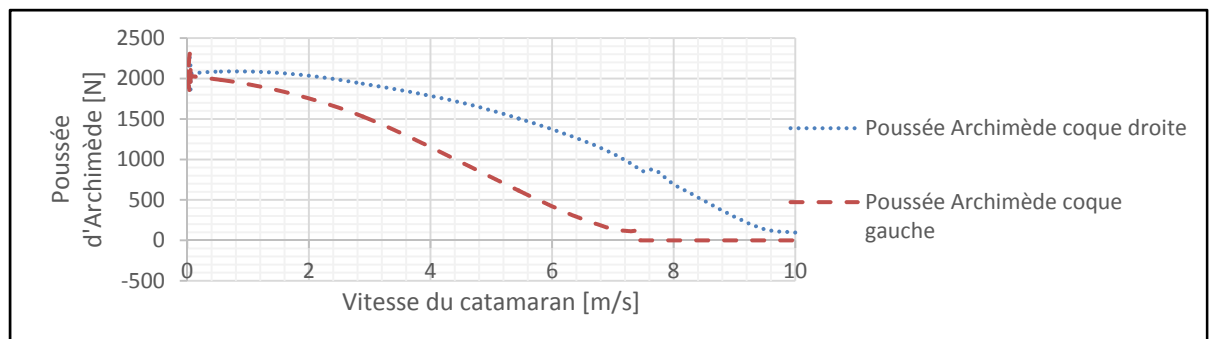


Figure 4.9 Évolution de la poussée d'Archimède sur les coques en fonction de la vitesse

Validation de la trainée sur les coques pendant une simulation

La trainée telle que décrite à la section 2.2.2.2 a été calculée par le logiciel libre de droit Michelet. Une matrice regroupant la trainée selon la vitesse et la hauteur de la ligne d’eau a été utilisée dans le modèle SM. Les inclinaisons de la coque selon l’axe x (le roulis) et l’axe y (le tangage) n’ont pas été prises en compte. L’évaluation de la vitesse ne sera donc pas exacte, mais pour une assiette contrôlée, la trainée est évaluée correctement. De plus, la configuration de simulation étant la même que le paragraphe précédent, la trainée de la coque gauche qui s’élève en première est plus faible que la coque droite dès que la vitesse permet de lever la coque au vent (voir Figure 4.10). À partir de cet instant, alors que la trainée de la coque gauche diminue, celle de la coque droite continue à augmenter, car elle est toujours dans l’eau. La trainée maximale est d’environ 200N sur la coque au vent.

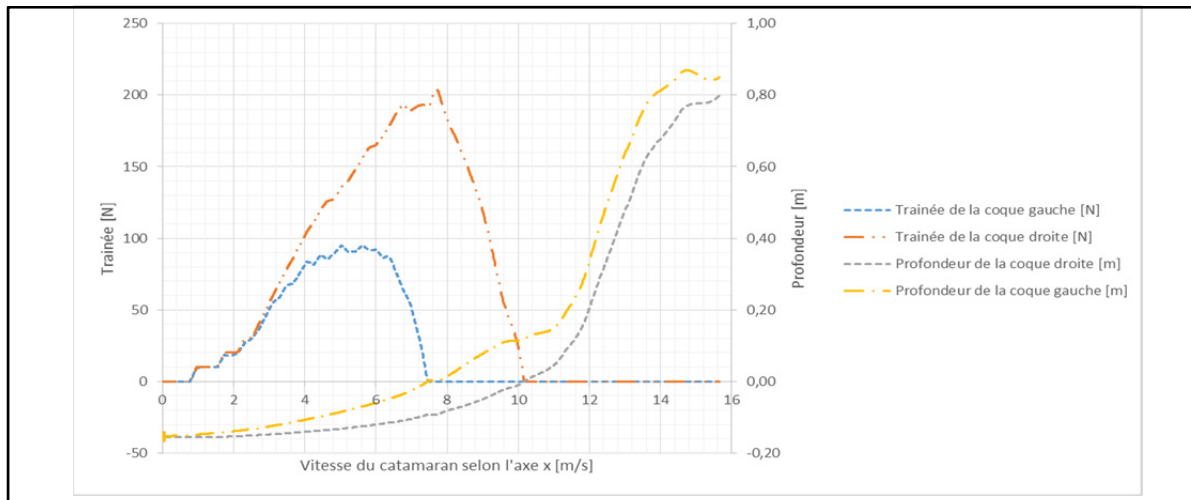


Figure 4.10 Évolution de la trainée sur les coques et de la profondeur des coques en fonction de la vitesse du catamaran selon l'axe x

4.2.3.2 Efforts sur la dérive portante

Les efforts sur la dérive portante sont créés par l'écoulement de l'eau sur les différentes parties. La portance L , la trainée D et la gestion de ces forces par rapport à la hauteur de l'eau sont décrites dans les paragraphes suivants.

Portance

Dans le modèle, la forme géométrique de la dérive portante est modélisée par une série de parallélépipèdes dont le placement les uns par rapport aux autres permet d'obtenir la forme désirée. C_L et S sont calculés dans le logiciel Xflr5. Dans le cas des parallélépipèdes de la partie 1 et de la partie 2 de la dérive portante, C_L est calculé pour une aile infinie possédant exactement la section choisie (profil H105). Le C_L de la partie 3 de la dérive est obtenu par une modélisation complète de la partie 3 tel une aile finie sous Xflr5 (sans prendre en compte la partie 1 et 2).

L'équation (A-I.3) de la portance L s'applique sur une aile dont le C_L et la surface S sont définis. S correspond alors à la surface projetée du parallélépipède pour un angle d'attaque α nul. La différence de portance entre les parties 1 et 2 comparées à la partie 3 est obtenue grâce à des coefficients de portance C_L différents. De plus, la variation de l'angle d'attaque α

modifie seulement les C_L des parties 2 et 3 pour un angle de CANT inférieur à 20° . Par exemple, pour un angle d'attaque α de la dérive portante de 0° , le C_L de la partie 1 et 2 est identique, alors que celui de la partie 3 est un peu plus faible, car la chute de portance en bout d'aile est prise en compte. Au contraire, si α est non nul, alors seules les parties 2 et 3 voient leurs portances augmentées. Une force de portance L et une force de trainée D sont alors appliquées sur chaque parallélépipède suivant leurs repères respectifs et relatifs (voir Figure 4.11 a et b). Ces forces sont calculées directement dans la simulation selon l'assiette du catamaran.

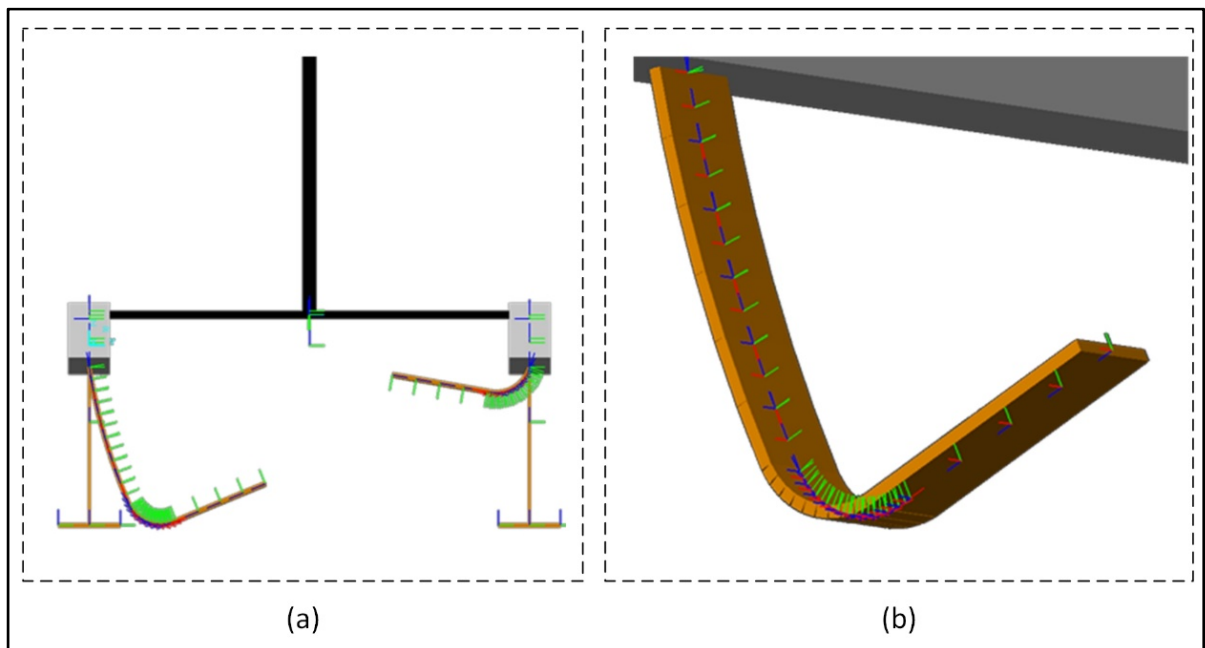
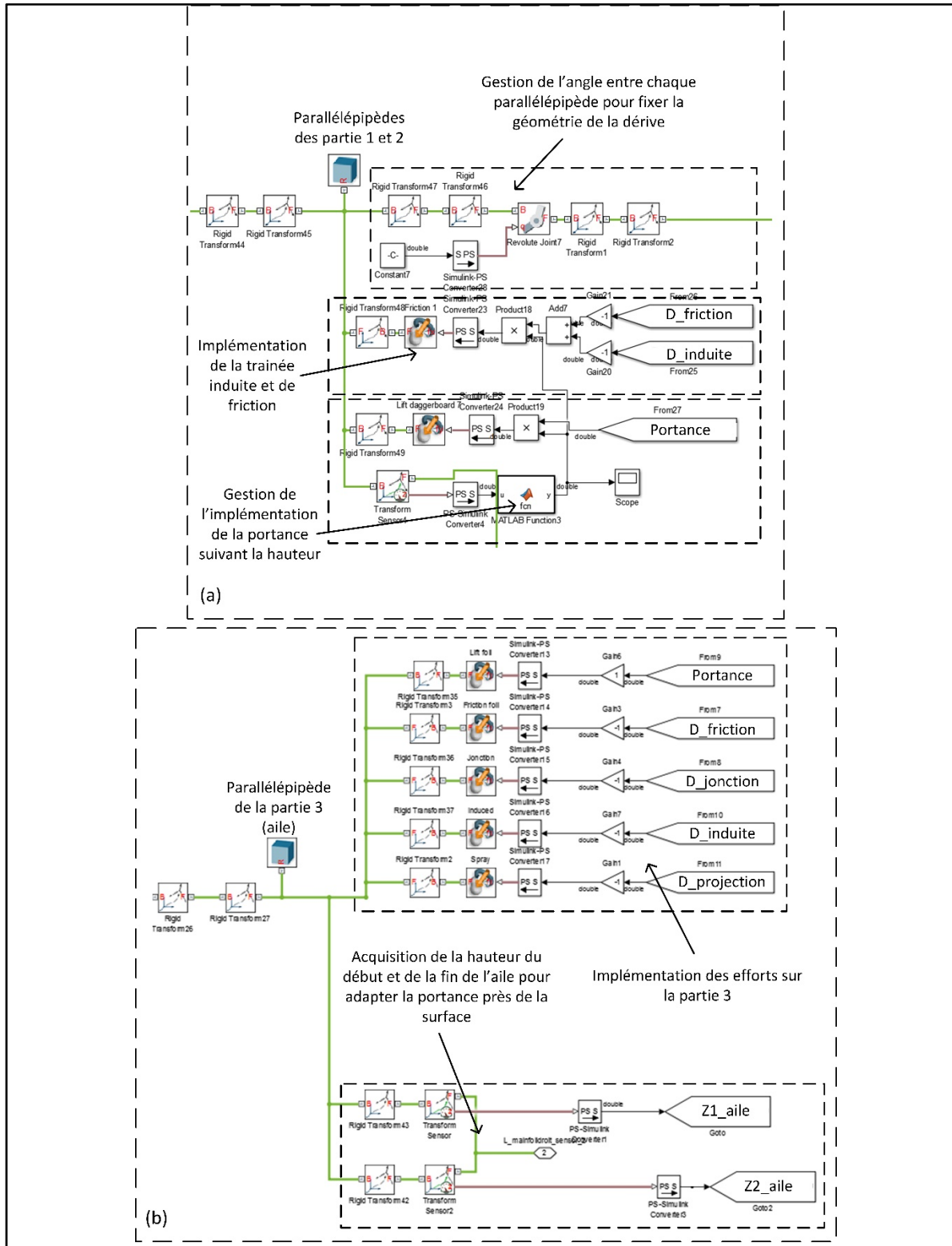


Figure 4.11 Modélisation de la dérive portante dans le modèle dynamique;
(a) Modélisation du catamaran; (b) Modélisation de la dérive sous le vent

Trainée

La dérive portante est découpée en trois parties. L'implémentation des trainées (voir équation (3.1) et (3.2)) sur chaque section (voir Figure 4.12) est décrite ci-dessous :

- La partie 1 et la partie 2 génèrent de la trainée induite et de friction;
- La partie 3 génère de la trainée induite, de friction, de jonction, et de forme;
- La trainée de vague est ici négligée.



Gestion de la hauteur de l'eau

Une gestion du niveau de l'eau par rapport à la dérive portante est nécessaire. En effet, lorsque la vitesse du catamaran augmente, le catamaran s'élève petit à petit par rapport au niveau de l'eau. Or, la stabilité d'un catamaran sur *hydrofoils* est en partie due à la régulation de la portance par rapport à la surface immergée de la dérive portante (voir section 3.1.3.2). Ainsi, seules les parties immergées génèrent de la portance. C'est pourquoi la distance entre le CG, chaque parallélépipède et le niveau de l'eau sont mesurés en permanence afin de désactiver la portance et la trainée de cet élément lorsqu'il n'est plus immergé. De plus, le phénomène de la surface libre est également à prendre en compte. Selon l'ANNEXE I, cette perte de portance peut être simplifiée par un C_L divisé par deux proches de la surface. Dans le modèle, la prise en compte de la diminution de la portance à l'approche de la surface de l'eau est implémentée seulement sur la partie 3 de la dérive portante (voir Figure 4.12 b). En effet, par expérience, le coude est toujours immergé. Ainsi, la portance L de l'aile de la dérive portante diminue linéairement de la portance normale (sans influence de la hauteur de l'eau) à une portance nulle lorsque la surface libre est à moins de 0.3m de la partie la plus haute de l'aile.

4.2.3.3 Efforts sur le safran porteur

De même que pour la dérive portante, la portance L , la trainée D et la gestion de la hauteur de l'eau par rapport au safran porteur sont décrites dans les paragraphes suivants.

Force de portance

Le safran porteur est modélisé par deux parallélépipèdes (voir Figure 4.13). Seule la partie 2 génère de la portance L . L'aile du safran a été modélisée sous Xflr5 afin d'en déduire les caractéristiques hydrodynamiques (voir Figure 4.14). En effet, cette étude fournit les différentes caractéristiques hydrodynamiques de l'aile finie du safran (voir Figure 4.15). Ainsi la perte de portance en bout d'aile est prise en compte dans le modèle. Ces résultats permettent de connaître l'intervalle d'angle d'attaque α où le rapport C_L/C_D est le meilleur.

Pour cette aile ayant le profil H105, la meilleure plage est entre 1° et 2° . Xflr5 ne fournit pas le C_L pour un angle d'attaque α supérieur à 10° .

Ainsi, la portance L du safran est obtenue par l'équation (4.1). $C_{L\alpha}$ est la fonction linéaire que décrit la variation du C_L en fonction de α (voir équation (4.2)) de l'étude faite sur Xflr5 pour un angle d'attaque α entre -10° et $+10^\circ$. L'angle α est alors la somme de l'angle d'attaque du safran et de l'inclinaison du catamaran.

Le phénomène de décrochage de l'aile pour un haut angle d'attaque α n'est pas pris en considération. Le coefficient de portance est donc borné. La portance est implémentée telle que présentée dans le Figure 4.16.

$$L_{safran} = 0,5 C_{L\alpha} \rho U_\infty^2 S \quad (4.1)$$

$$C_{L\alpha} = 0,0818 \alpha + 0.216 \quad (4.2)$$

Où α est compris entre -10° et 10°

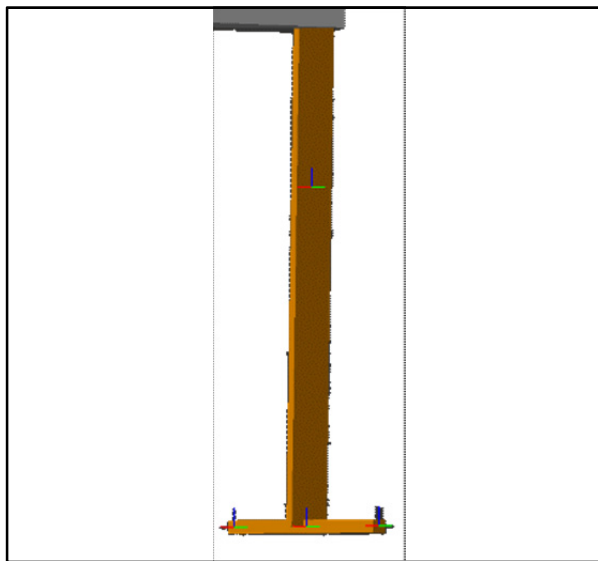


Figure 4.13 Modélisation du safran porteur dans le modèle SimMechanics

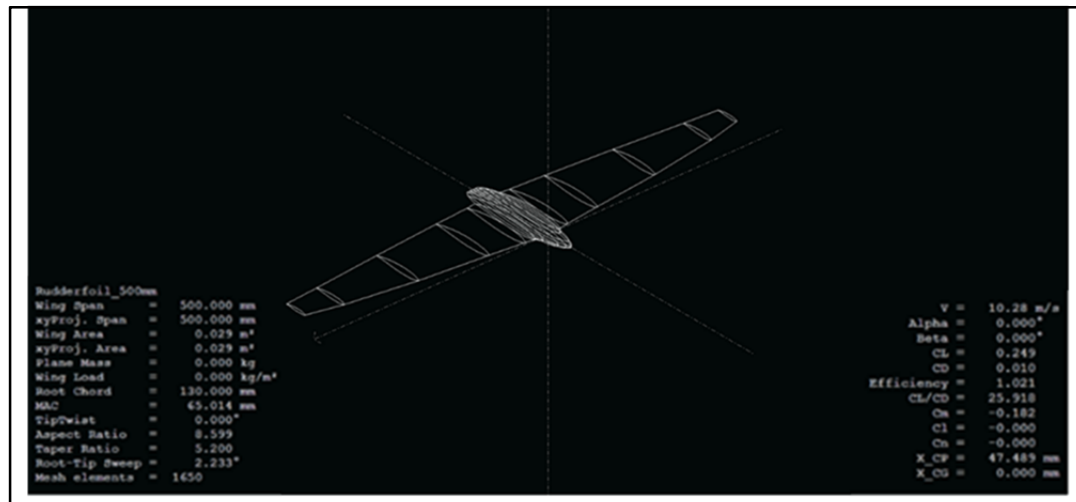


Figure 4.14 Modélisation et caractérisation de l'aile du safran porteur sous Xflr5 pour une envergure de 500mm et une vitesse de 10.28 m/s

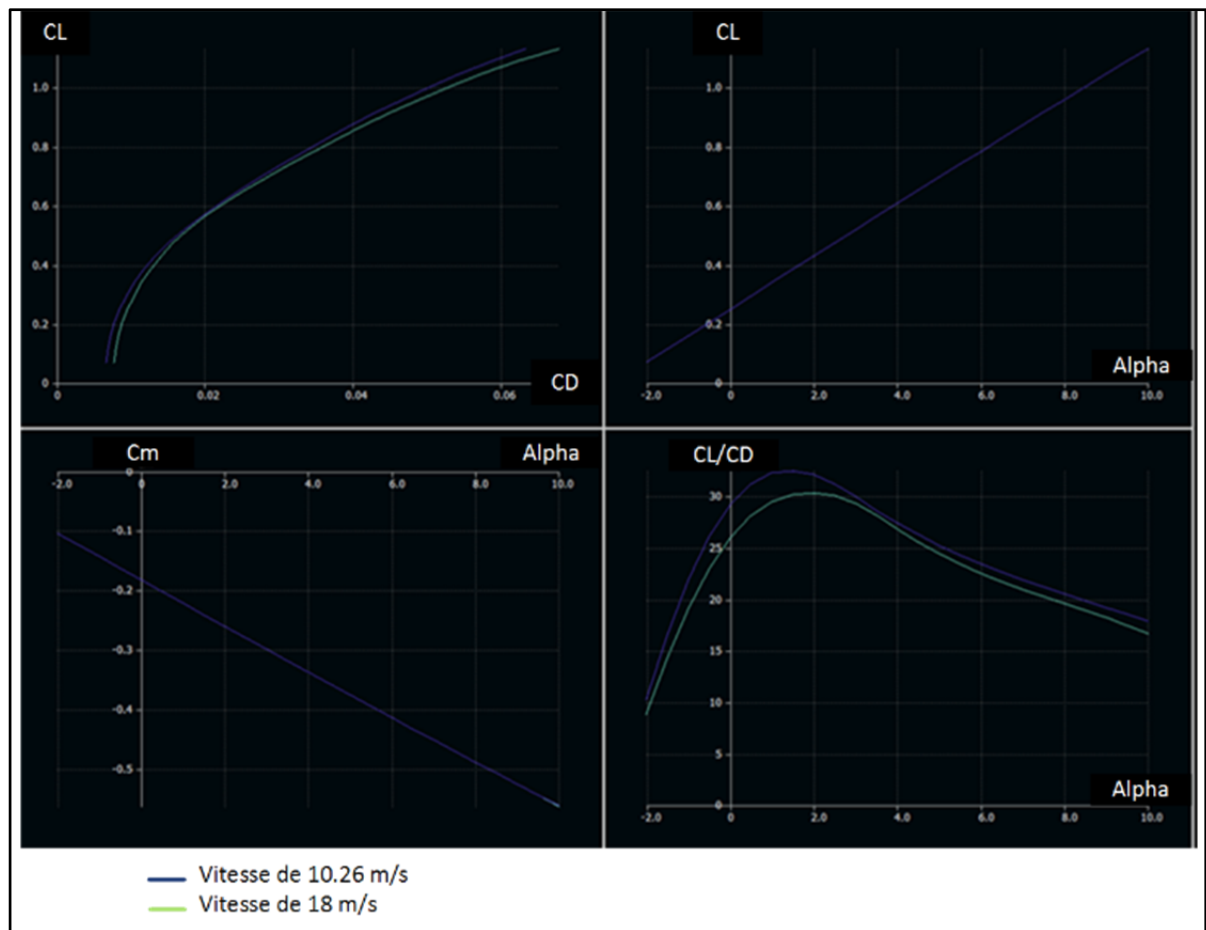


Figure 4.15 Résultats de l'analyse de l'aile du safran sous Xflr5 pour une envergure de 500mm et une vitesse de 10.28 et 18 m/s

Force de trainée

Le safran est un *hydrofoil* en T. La trainée détaillée dans la partie 3.1.2 est implémentée sur les différentes parties du safran porteur (voir Figure 4.16). Sur la partie 1, seules les trainées de vagues, projections et de friction sont implémentées. Sur la partie 2, les trainées induites et de friction sont implémentées. Ces différentes trainées représentent mieux la trainée réelle du safran que le coefficient C_D obtenu avec Xflr5 puis qu'elles prennent en compte la liaison des deux parties du safran et la surface libre.

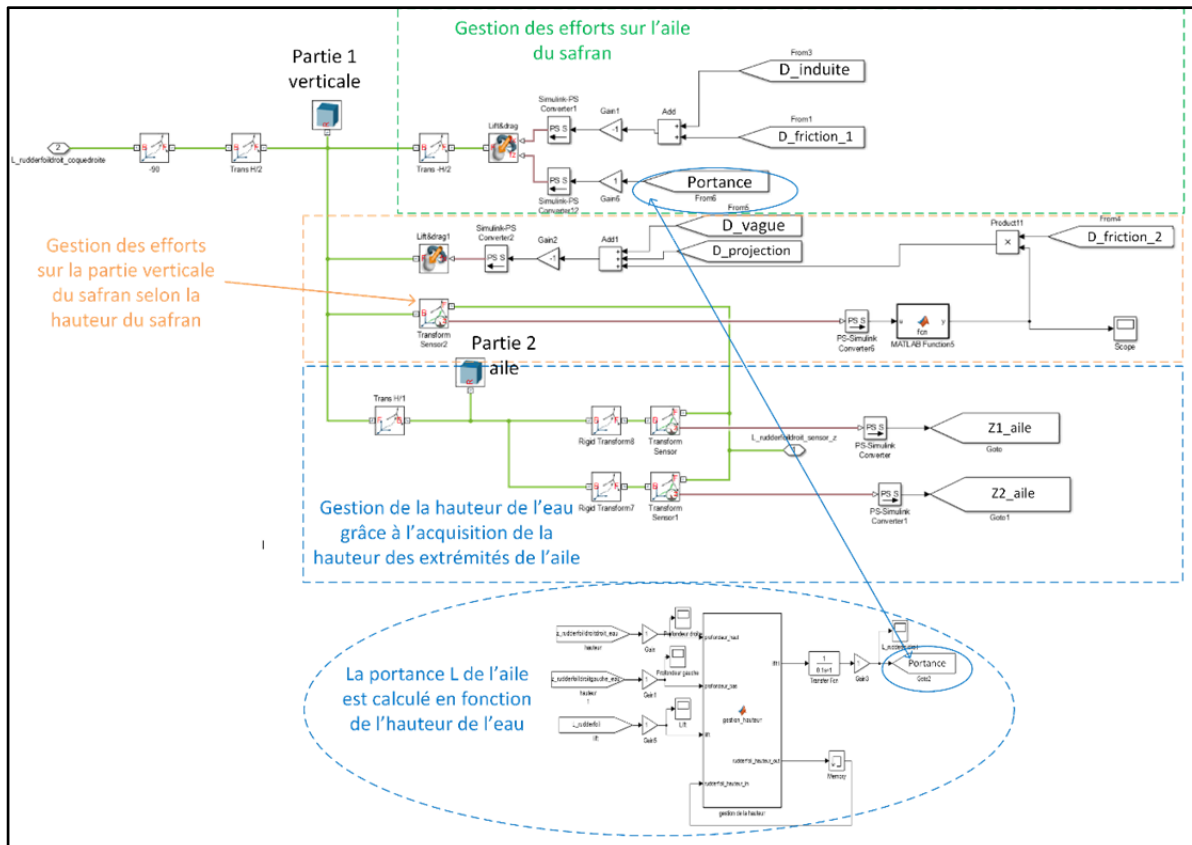


Figure 4.16 Modélisation SimMechanics des efforts sur le safran porteur

Force pour gouverner le catamaran

L'impossibilité de libérer totalement le catamaran dans l'espace a rendu impossible l'étude de la force nécessaire pour gouverner le catamaran. Cependant une analyse sous Xflr5 a été effectuée pour déterminer les efforts à envisager sur la partie verticale de safran porteur. Pour cela, cette partie verticale a été modélisée sur Xflr5. Seule la partie immergée est

considérée. À une vitesse de 20 nœuds, seulement 1,0m de la partie verticale est immergé (voir Figure-A IX-3), soit une surface portante S1. À une vitesse de 35 nœuds, seulement 0,3m est immergé (voir Figure-A IX-1), soit une surface S2. Ainsi, S2 est inférieure à S1. On observe des $C_{L\alpha}$ différents selon les parties immergées. Les équations (4.3) et (4.4) donnent respectivement le $C_{L\alpha}$ pour les parties immergées à 20 et 35 nœuds pour un angle α compris entre -10° et $+10^\circ$. Ce coefficient est borné au niveau de ses extrêmes. Au final la force de gouverne générée par la safran dépend de la surface portante S (variant de S1 à S2), de la masse volumique, de vitesse suivant x du catamaran et de coefficient de portance $C_{L\alpha}$ (voir équation (4.4)).

$$C_{L\alpha} = 0,102 \alpha \quad (4.3)$$

$$C_{L\alpha} = 0,09 \alpha \quad (4.4)$$

$$F = \frac{1}{2} S C_{L\alpha} \rho U^2 \quad (4.5)$$

Gestion de la hauteur de l'eau et implémentation des efforts dans le modèle SM

La gestion de la portance par rapport à la surface de l'eau est également implémentée pour l'aile du safran tel que décrit dans la section 4.2.3.2 pour la dérive portante. En effet, la position suivant z des deux extrémités de la partie 2 du safran est acquise à chaque itération afin d'annuler ou de réduire la portance selon la hauteur et l'inclinaison (voir Figure 4.16).

4.2.3.4 Efforts sur l'aile rigide

Gestion du vent apparent

Dans le modèle SM, le changement d'angle entre le vent apparent lorsque la vitesse du catamaran suivant x augmente n'est pas pris en compte. En effet, sa prise en compte serait nécessaire si le catamaran pouvait dériver. La vitesse et la dérive auraient alors une influence sur l'angle du vent apparent $\beta_{\text{vent_apparent}}$, et donc la performance de l'aile. En effet, les forces

L et D calculées par le modèle sur l'aile rigide simplifiée n'a pas pour objectif de simuler le comportement réel d'une aile. De plus, l'impossibilité de modifier la configuration pendant la simulation (voir section 4.1.2) ne permet pas d'adapter le comportement du catamaran par rapport au vent apparent.

Portance et trainée

Les données d'entrées sont le coefficient de portance C_L , le rapport L/D, la surface S de l'aile, l'angle du vent β_{vent} par rapport à l'axe du catamaran, et sa vitesse (voir Figure 2.7). Dans le modèle, nous prenons un coefficient C_L de 2 constant et un rapport L/D de 15 issus de la littérature (voir section 2.2.1.2). α_{aile} est donc négligée (voir Figure 2.7).

4.2.3.5 Efforts de l'équipage

La masse de l'ESPADON 20 est de 230kg et la masse de l'équipage est supposée de 200kg (selon la section 4.2.2). L'équipage a donc une réelle influence sur le comportement du catamaran. La gestion du déplacement de l'équipage a été implémentée afin de stabiliser le catamaran en navigation.

Une fonction est utilisée pour adapter en temps réel la position de l'équipage selon l'assiette du catamaran. Le barreur et l'équipier sont représentés par des parallélépipèdes. En navigation, ils se déplacent afin de contrôler le roulis et le tangage du catamaran. L'objectif est de garder le catamaran à l'horizontale, autant suivant l'axe x que l'axe y. Ainsi, pendant la simulation, l'équipage (représenté par un carré jaune dans la Figure 4.17) se déplace dans la zone désignée. Le centre de gravité de l'équipage peut sortir de la plateforme du catamaran d'un mètre pour simuler la situation où l'équipage est au trapèze. Visuellement, l'équipage se déplace selon l'axe y pendant la simulation grâce à la fonction asservie de la Figure 4.18. En effet, la fonction compare la différence de degrés entre l'assiette souhaitée et l'assiette réelle du catamaran pendant la simulation. La fonction de transfert permet donc de déplacer l'équipage avec un temps de réponse raisonnable pour un être humain (τ est ici de 0,8s). Le déplacement de l'équipage selon x est virtuel afin d'améliorer la lecture du programme

SimMechanics (voir Figure 4.19). Le déplacement selon x est donc implémenté par un couple. En effet, si l'équipage était libre selon l'axe x, la position de l'équipage dépendrait alors de la position du catamaran dans le repère global. Il faut donc en permanence gérer la position de l'équipage sur le catamaran dans le repère global, solution contraignante dans SM. La solution d'ajouter un moment sur l'équipage permet donc de simplifier le modèle.

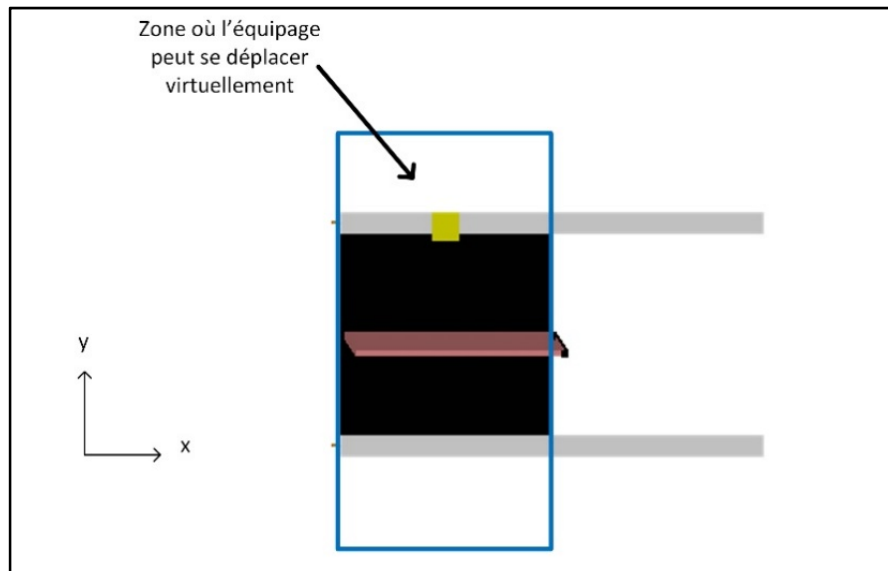


Figure 4.17 Vue du dessus du Catamaran du modèle SM

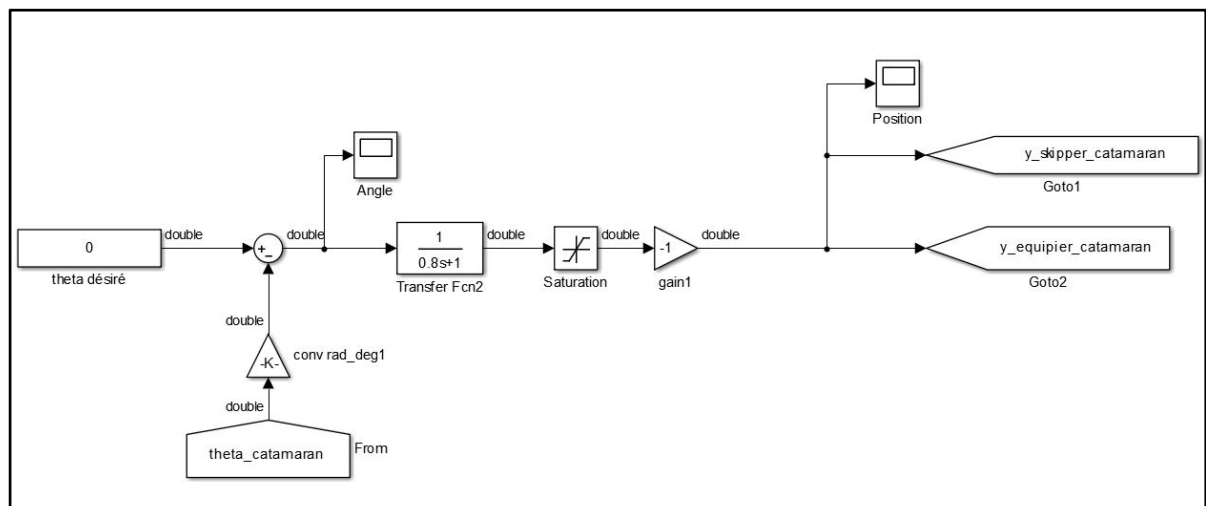


Figure 4.18 Fonction asservissant le déplacement de l'équipage selon y

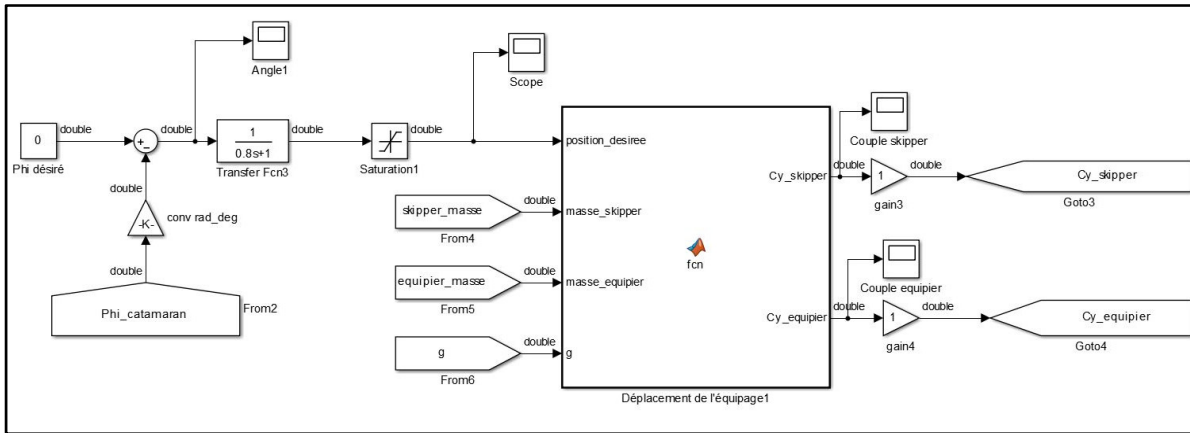


Figure 4.19 Fonction simulant le déplacement de l'équipage selon l'axe x par la création d'un couple

4.3 Résultats et Analyses

4.3.1 Visualisation du modèle 3D du catamaran

Le modèle SimMechanics simule le comportement dynamique de systèmes. Les données sont acquises dans des matrices et le comportement cinématique du système est observable grâce à une visualisation 3D. Dans le cas du modèle du catamaran, on distingue les différentes phases de navigation du catamaran (voir Figure 4.20). Le visuel du catamaran facilite grandement le développement d'un tel système pour les raisons suivantes :

- Possibilité d'observer directement les conséquences des différents réglages sur le comportement du catamaran;
- Possibilité de travailler dans un repère relatif visible sur la pièce en 3D;
- Facilité d'analyse des courbes.

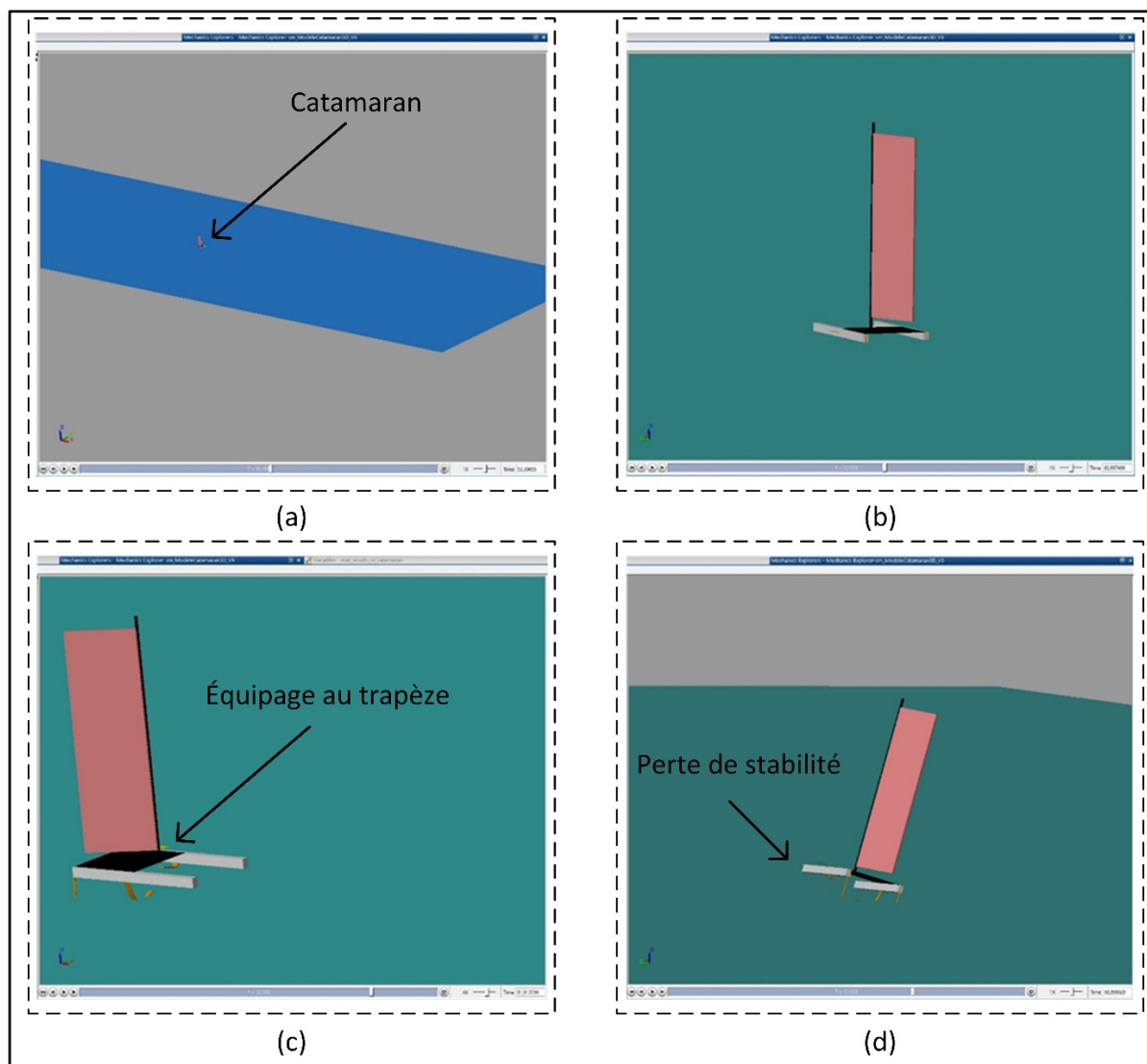


Figure 4.20 Simulation du catamaran par SimMechanics; (a) Vue du catamaran sur le plan d'eau; (b) Vue du catamaran peu de temps après le décollage; (c) Vue du catamaran dans son état de vol stable; (d) Vue du catamaran dans son état de vol instable

4.3.2 Influences des variables de conception et de configuration

4.3.2.1 Influence sur vitesse de décollage et vitesse maximale de stabilité

Dans un premier temps, la description de l'influence des variables de conception de la géométrie des *hydrofoils* est faite afin de fixer la forme finale. La variation d'une seule des variables est étudiée à la fois. Les autres variables (voir Figure 3.10 et Figure 3.12) sont alors fixées aux valeurs suivantes : Dérive (Corde) = 0,25m; Dérive (Rayon) = 4,0m; Dérive (Profondeur) = 1,3m; Dérive Coude (Rayon) = 0,25m; Dérive Aile (Envergure)= 0,7m; Dérive (Angle CANT) = 10°; Dérive (Angle attaque) = 3°; Safran Aile (Envergure)= 0,4m; Safran Aile (Corde) = 0,08m; Safran (Angle attaque) = 0°.

Les observations sont les suivantes :

- La variation de la corde principale de la dérive portante modifie directement la surface portante (voir Figure 4.21). La vitesse de décollage varie pour des cordes respectives de 0,2m et 0,28 m (diminution de la vitesse de décollage de 17 nœuds à 13.5 nœuds). L'augmentation de la corde au-dessus de 0,25m n'améliore pas de façon significative la vitesse de décollage;
- La variation du rayon de courbure de la dérive portante n'a pas d'influence sur la vitesse de décollage (voir Figure 4.22), mais un grand rayon de courbure réduit la vitesse maximale;
- L'augmentation du rayon du coude de la dérive portante permet de décoller à des vitesses plus faibles (voir Figure 4.23) et diminue la vitesse maximale;
- L'augmentation de l'envergure de l'aile de la dérive portante permet logiquement de décoller à des vitesses plus basses, tout en réduisant de la même façon la vitesse maximale (voir Figure 4.24);
- La variation de la corde et de l'envergure de l'aile de safran n'a pas d'influence sur les vitesses. Cette courbe n'est donc pas illustrée.

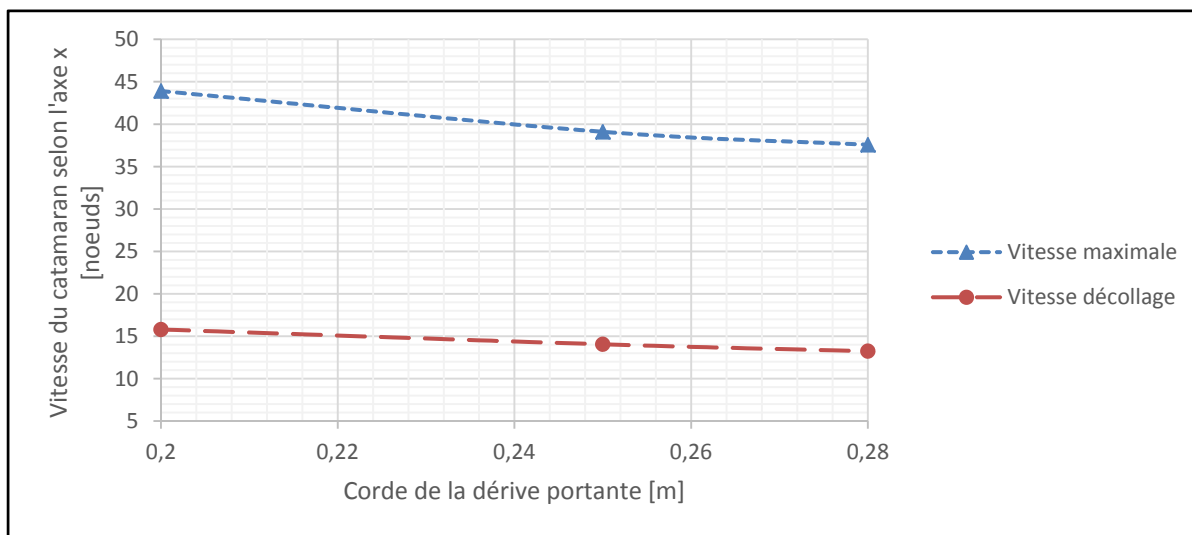


Figure 4.21 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de la corde de la dérive

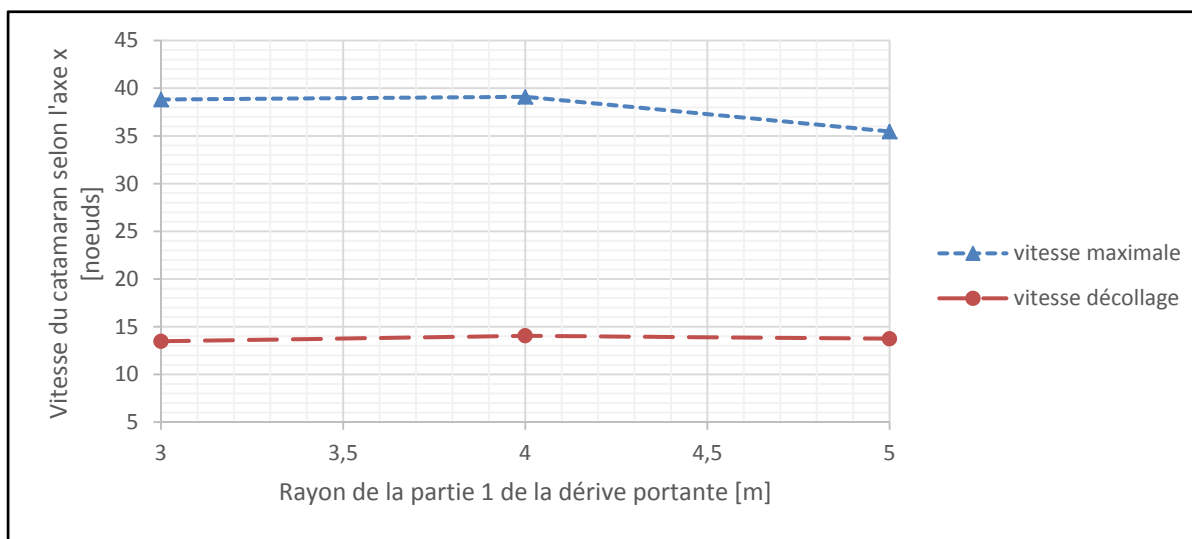


Figure 4.22 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction du rayon de la partie 1 de la dérive portante

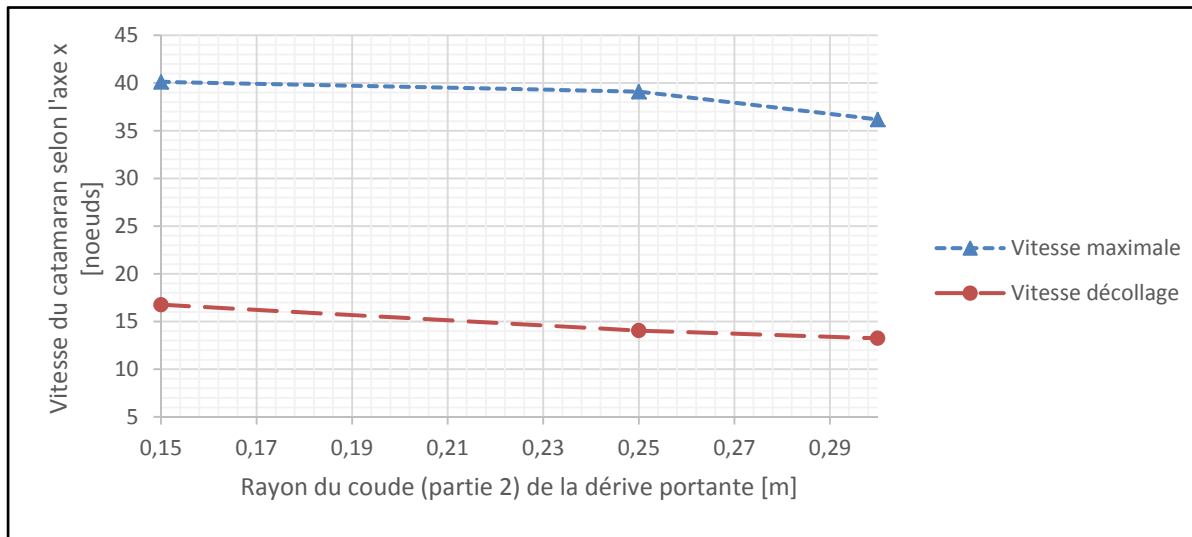


Figure 4.23 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction du rayon du coude (partie 2) de la dérive portante

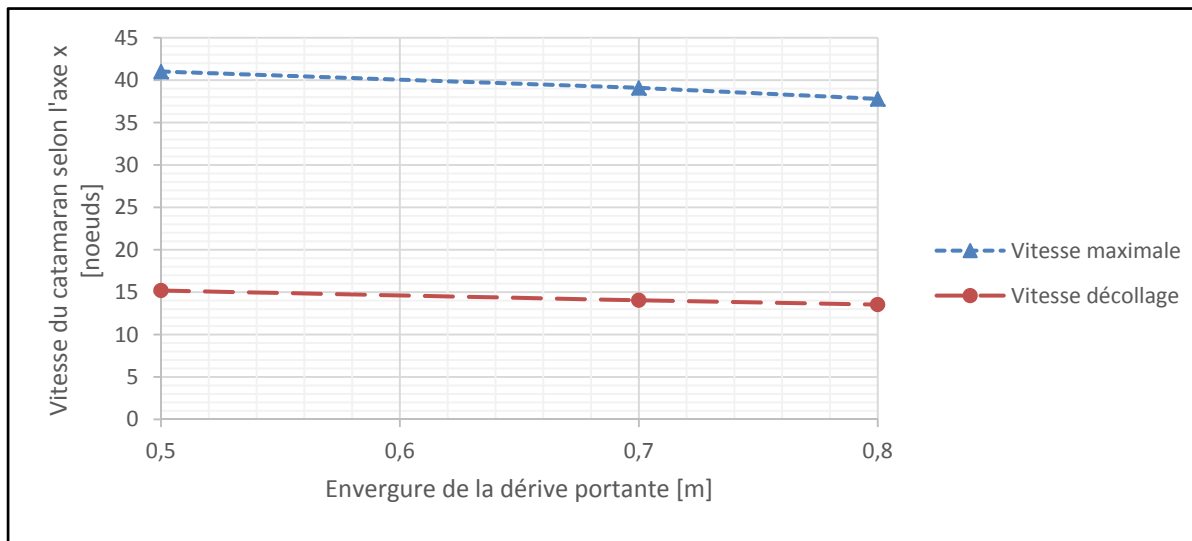


Figure 4.24 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de l'envergure de la dérive portante

Dans un second temps, l'étude de la variation des variables de configuration permet de mesurer l'influence des réglages sur les performances du catamaran. La configuration de base testée reste la même afin de limiter le nombre d'acquisitions.

Les observations sont les suivantes :

- L'augmentation de la profondeur de la dérive portante a une influence limitée sur la vitesse de décollage, mais elle augmente la vitesse maximale (voir Figure 4.25);
- L'augmentation de l'angle d'attaque (α) de la dérive portante permet d'abaisser la vitesse de décollage. Cependant, la vitesse maximale diminue également (voir Figure 4.26). Pour un angle de *cant* θ de 0° , la vitesse maximale est très faible. En effet, dans cette configuration, la stabilité due à la forme en V de la dérive portante n'est plus possible puisque la surface de l'aile est presque horizontale. Cependant, cette observation ne prend pas en compte la dérive du catamaran;
- L'augmentation de l'angle d'attaque α de la dérive portante augmente la vitesse de décollage et réduit la vitesse maximale (voir Figure 4.26). La variation de l'angle d'attaque de 0 à 6° permet un gain de 50% sur la vitesse de décollage alors qu'elle réduit la vitesse maximale seulement de 30%;
- La variation de l'angle d'attaque des safrans porteurs n'a pas d'influence les vitesses et n'est pas donc pas illustrée.

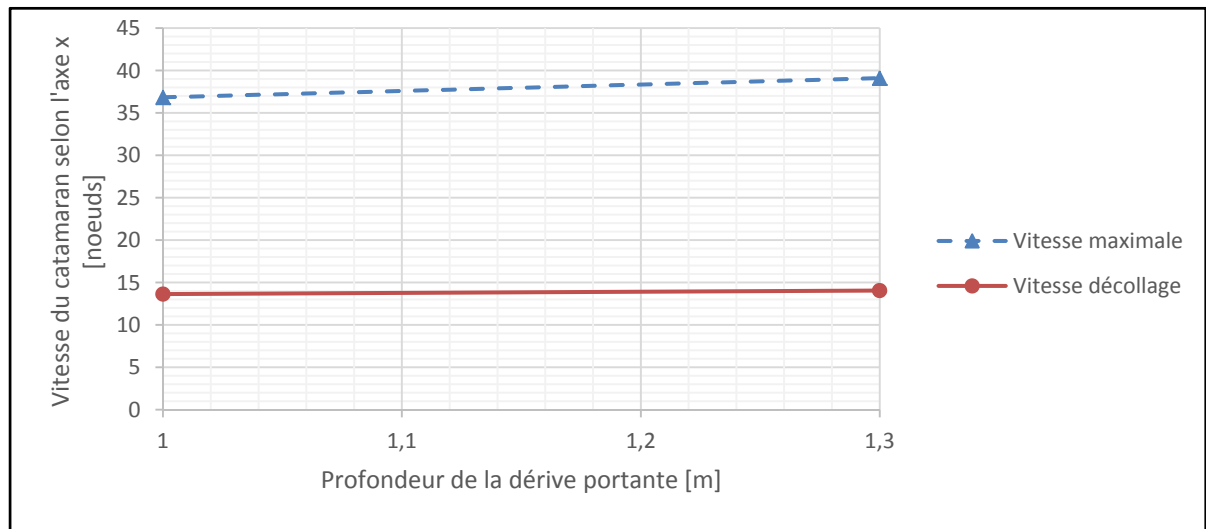


Figure 4.25 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de la profondeur de la dérive portante

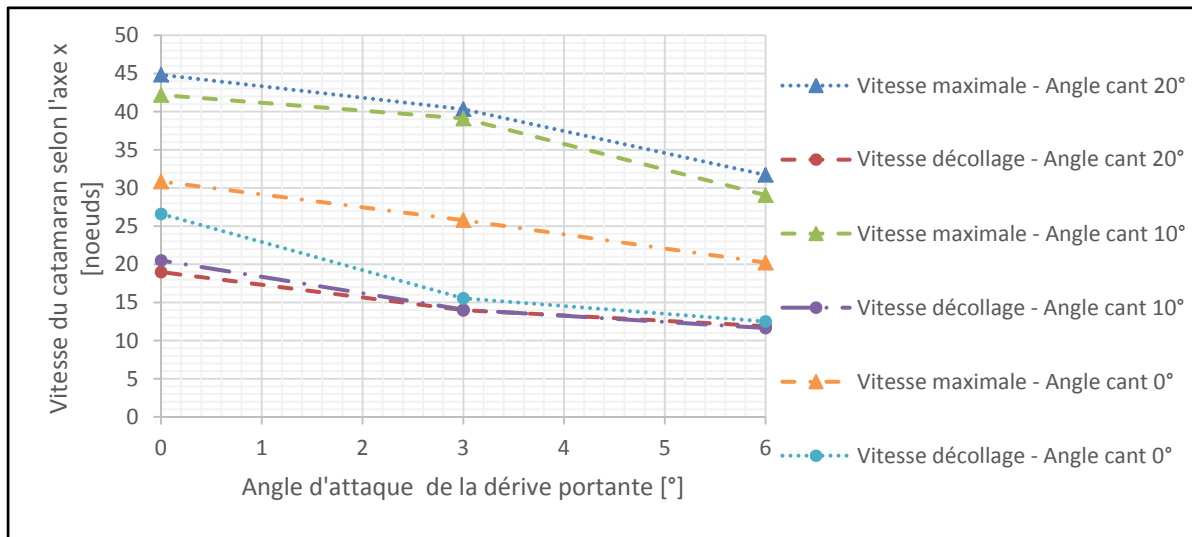


Figure 4.26 Évolution de la vitesse de décollage et de la vitesse maximale en fonction de l'angle d'attaque de la dérive pour différent angle de *cant* de la dérive

4.3.2.2 Influence de configuration sur les efforts générés par la dérive portante à 10 nœuds

Enfin, l'étude des efforts sur la dérive portante à 10 nœuds permet de quantifier l'influence des variables sur la force de portance et la force antidérive. En effet, la variation de certaines variables favorise la force de portance par rapport à la force antidérive ou inversement. Les variables fixées respectent la même configuration de base.

Les observations sont les suivantes :

- L'augmentation de l'angle de *cant* (θ) de la dérive portante diminue la force antidérive et la force de portance (voir Figure 4.27). Cependant, pour un angle de *cant* θ de 20°, l'augmentation de l'angle d'attaque α de la dérive portante diminue la force antidérive. En effet, l'angle d'attaque α modifie principalement les performances de l'aile de la dérive portante alors que l'angle de *cant* modifier la direction des vecteurs de forces ;
- L'augmentation de la corde de la dérive portante augmente les forces car la surface de la dérive augmente(voir Figure 4.28);

- L'augmentation du rayon de courbure de la partie 1 de la dérive portante a une forte influence entre 3,0 et 4,0m de rayon, mais beaucoup moins au-delà (voir Figure 4.29). L'augmentation de ce rayon diminue la force de portance et augmente la force d'antidérive. En effet, pour un faible rayon de courbure, la résultante des forces de la partie 1 a une forte composante verticale, or plus le rayon de courbure augmente, plus la composante horizontale augmente. Cependant, ce rayon influence également l'angle de l'aile de la dérive portante, et donc plus le rayon de courbure augmente, plus la composante verticale des forces de l'aile de la dérive augmente. C'est pourquoi la variation du rayon de courbure entre 3,0 et 4,0m a une forte influence sur les forces;
- Les forces engendrées par le coude augmente quand le rayon du coude est augmenté puisque la surface portante augmente (voir Figure 4.30).
- L'augmentation de l'envergure de l'aile de la dérive portante augmente donc sa surface et donc la force générée (voir Figure 4.31). Or, la position de la dérive n'étant pas modifiée, l'augmentation de la force générée par l'aile contrebalance directement la force antidérive. C'est pourquoi l'augmentation de l'envergure augmente la force de portance tout en diminuant la force antidérive.

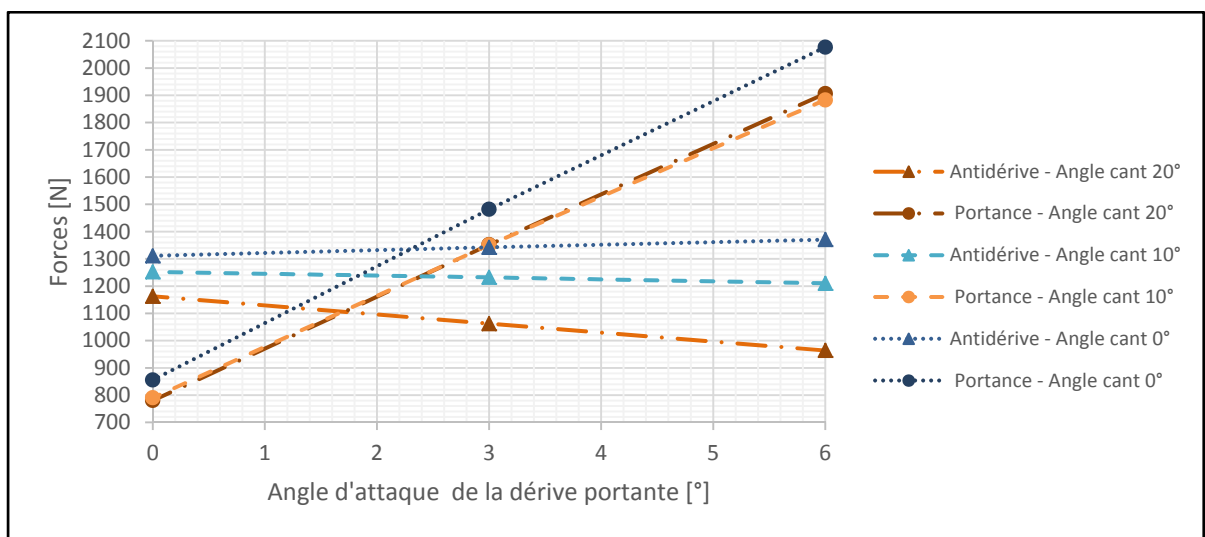


Figure 4.27 Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de l'angle d'attaque de la dérive portante pour différent angle de *cant* θ de la dérive portante

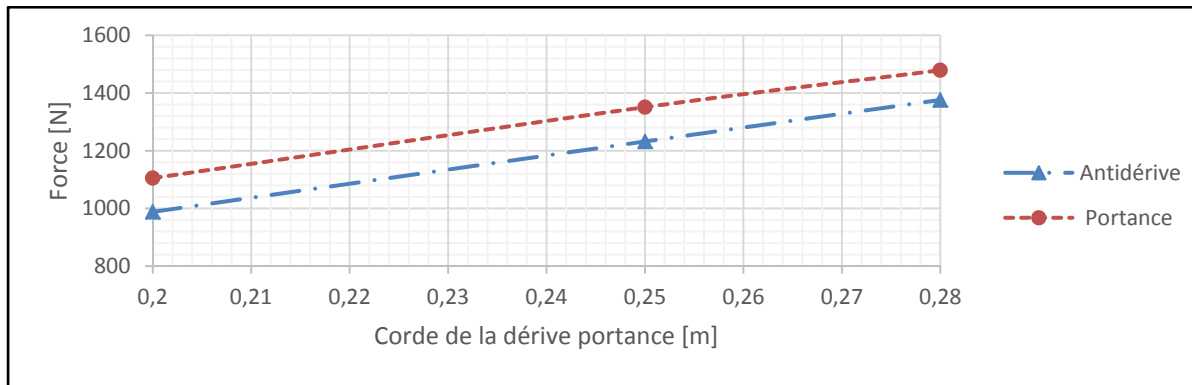


Figure 4.28 Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de la corde de la dérive portante

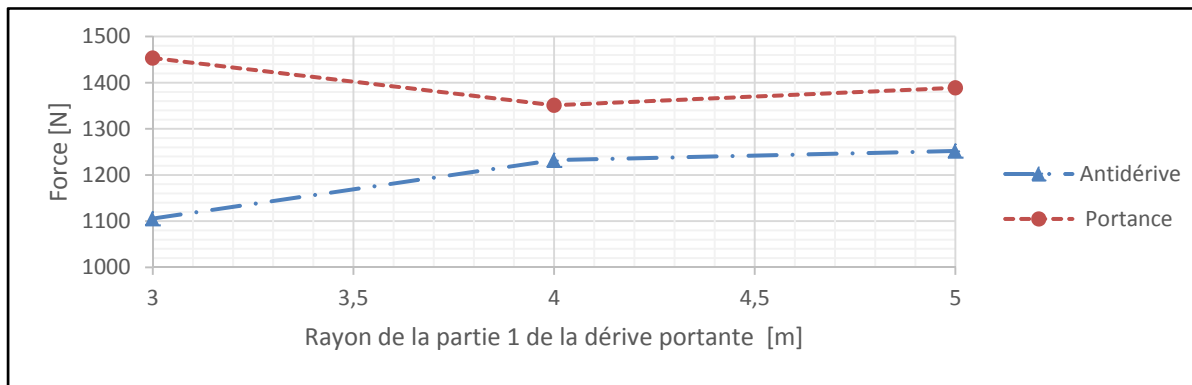


Figure 4.29 Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction du rayon de la partie 1 de la dérive portante

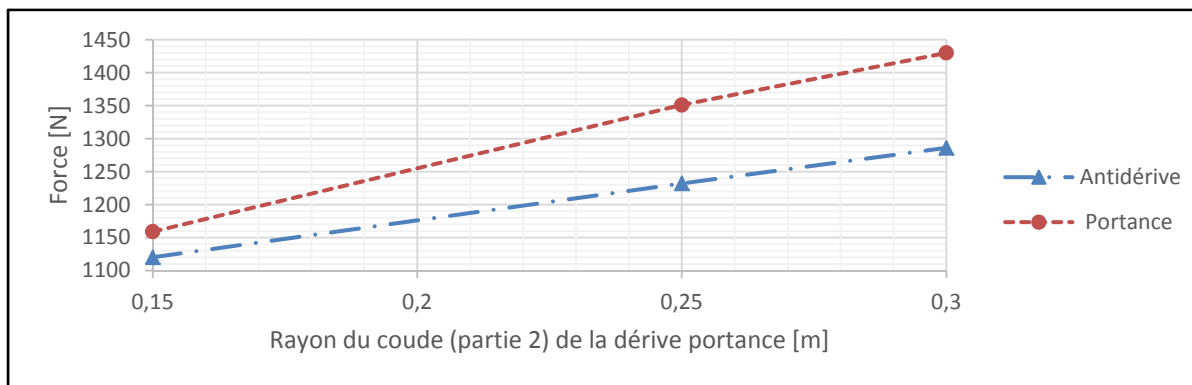


Figure 4.30 Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction du rayon du coude (partie 2) de la dérive portante

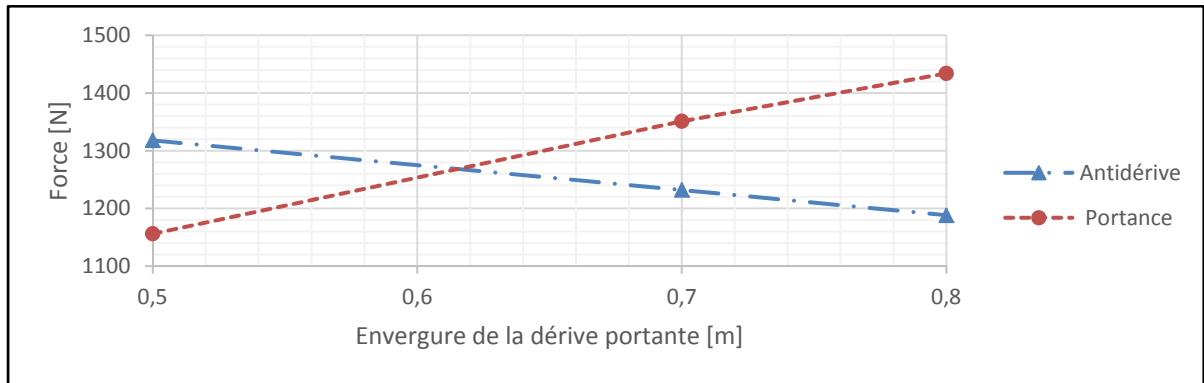


Figure 4.31 Évolution de la force antidérive et de la force de portance en fonction de l'envergure de la dérive portante

4.3.2.3 Influence de la masse du catamaran sur la vitesse de décollage

Jusqu'à présent, les vitesses de décollage et maximale étaient nos principaux indicateurs de performance pour un catamaran possédant des dimensions et caractéristiques similaire à l'ESPADON 20 sans *hydrofoils*. Or, dans le cas de notre projet, l'ESPADON 20 sera modifié pour intégrer ces *hydrofoils*, sa masse risque donc d'augmenter. Il est donc intéressant de connaître l'influence de l'augmentation de la masse totale causée par les modifications de l'ESPADON sur les performances du catamaran.

La masse d'un catamaran sans *hydrofoils* a un impact sur ses performances, mais l'optimisation de la forme des coques limite l'impact de l'augmentation de cette masse. Or, pour un catamaran volant, l'augmentation de la masse du catamaran influe directement la vitesse de décollage (voir Figure 4.32). Ainsi, la vitesse de décollage augmente de 2% pour chaque

10kg supplémentaire avec la configuration de base.

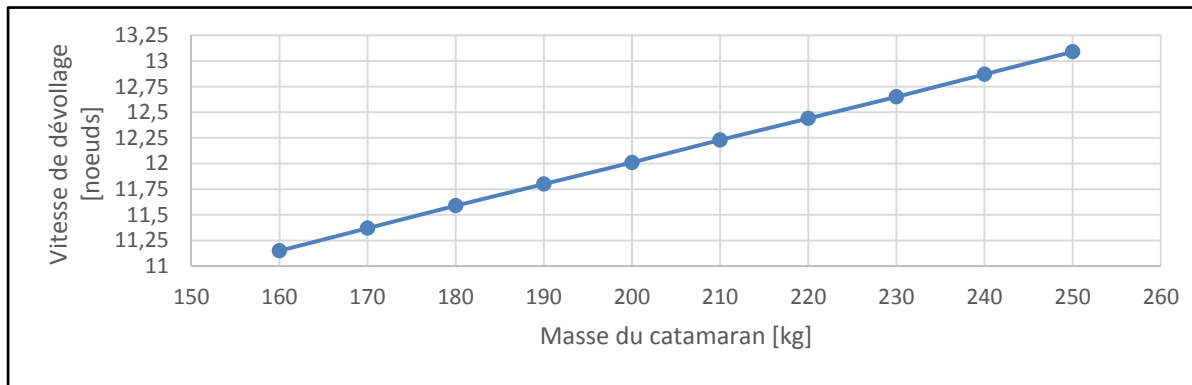


Figure 4.32 Évolution de la vitesse de décollage en fonction de la masse du catamaran

4.3.2.4 Analyse de la vitesse et de l'accélération du catamaran pour une configuration donnée

Pour une configuration donnée avec une vitesse de décollage de 13,5 nœuds, soit 7,0 m/s, la vitesse du catamaran et l'accélération du catamaran ont été observées pour valider le comportement dynamique du catamaran (voir Figure 4.33). La trainée limite l'accélération d'un corps dans l'eau. Dans la Figure 4.33, deux phases sont observables :

- Avant le décollage du catamaran à 7,0 m/s : une des coques est encore dans l'eau, ralentissant le catamaran. Une accélération moyenne de $0,13 \text{ m/s}^2$ est observée;
- Après 7,0 m/s : des deux coques sont hors de l'eau, le bateau accélère et l'accélération varie entre 0,5 et $0,7 \text{ m/s}^2$.

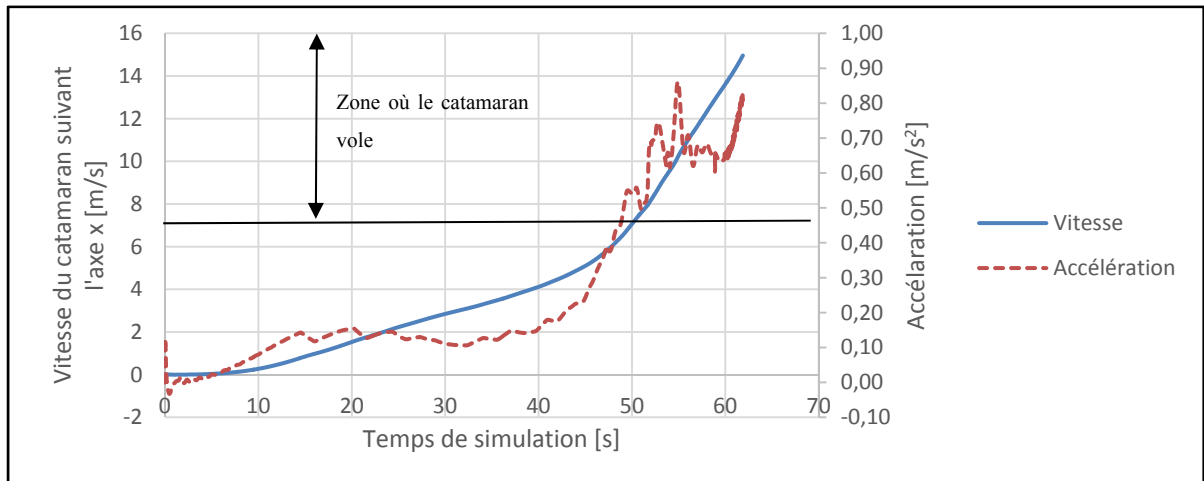


Figure 4.33 Évolution de la vitesse et de l'accélération du catamaran (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7m/s) en fonction du temps

4.3.2.5 Analyse des efforts sur la dérive portante

L'acquisition des efforts sur la dérive portante au niveau du puits de dérive permet de connaître l'ordre de grandeur des efforts suivant x, y et z (voir Figure 4.34). Ainsi, à l'instant du décollage, on observe donc que la force F_z de portance verticale est de 3 750N, la force F_y antidérive est de 1 550N et la force F_x de trainée de - 600N. F_z augmente et se stabilise autour de 4 300N, ce qui est le poids du bateau et de l'équipage simulé. Dans notre simulation, les safrans n'avaient aucun angle d'attaque, et l'asservissement de l'équipage rend le bateau stable. Dans ce cas, aucune portance n'est générée par les safrans, expliquant pourquoi tout le poids est retrouvé sur la dérive portante.

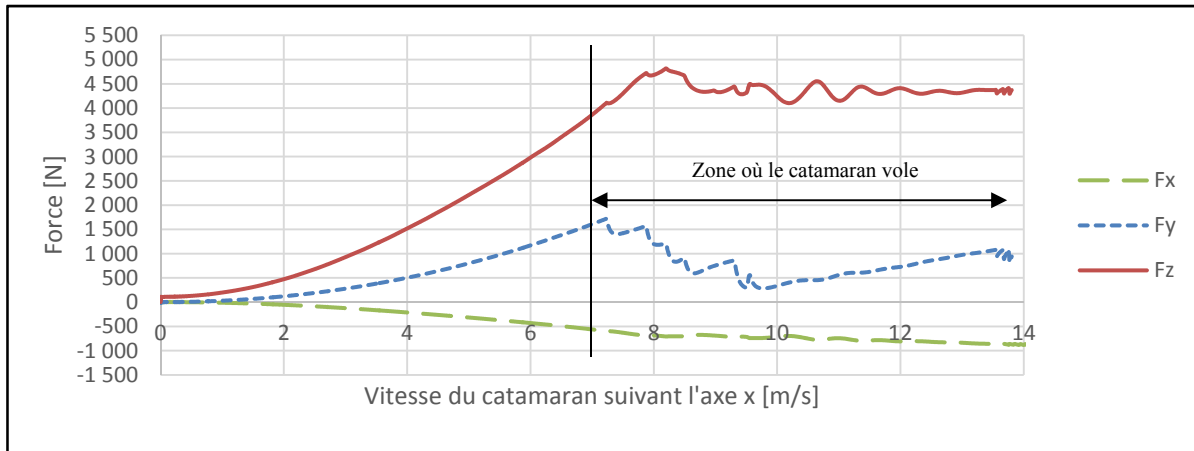


Figure 4.34 Évolution des efforts suivant x, y et z sur la dérive portante (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7m/s) en fonction de la vitesse du catamaran suivant x

4.3.2.6 Analyse des efforts sur un safran porteur

Force de portance

Cette simulation a été faite avec un angle d'attaque de 6° sur les safrans porteurs. Par expérience, un tel réglage est extrême, car la majorité des safrans porteurs sont réglés entre -3° et $+3^\circ$. Sur la Figure 4.35, la portance F_z est très faible jusqu'à la vitesse de décollage de 7m/s. Ensuite, le safran permet d'équilibrer le catamaran pendant sa phase de vol, d'où les oscillations. La valeur de la portance reste cependant faible avec un maximum de 400N. Ces valeurs faibles de portance ne représentent pas la réalité, car le modèle est équilibré de façon automatique, le vent est constant, l'effet de vague n'est pas présent.

Afin de donner des valeurs dépendantes seulement de l'angle d'attaque de l'aile sur safran, une étude de l'aile du safran seule sous Xflr5 à la section 4.2.3.3 a été faite (voir Figure 4.36). Cette portance est calculée pour des vitesses de 20 et 35 nœuds, soit des vitesses rapides. La force de portance F_z du safran porteur est supérieure à 1 000N dès 4.5° à 20 nœuds et -0.5° à 35 nœuds. De telles charges peuvent avoir lieu dans des cas dynamiques extrêmes.

Par expérience, il est important de régler l'angle d'attaque du safran porteur avant les courses ou pendant, selon la vitesse du vent réel. En effet, avec peu de vent, un angle d'attaque plus élevé est nécessaire pour équilibrer le catamaran et porter un certain pourcentage du poids du catamaran. Au contraire, dans un vent fort, un angle d'attaque faible voir négatif sera privilégier pour ne pas déséquilibrer totalement le catamaran qui aurait tendance à basculer vers l'avant.

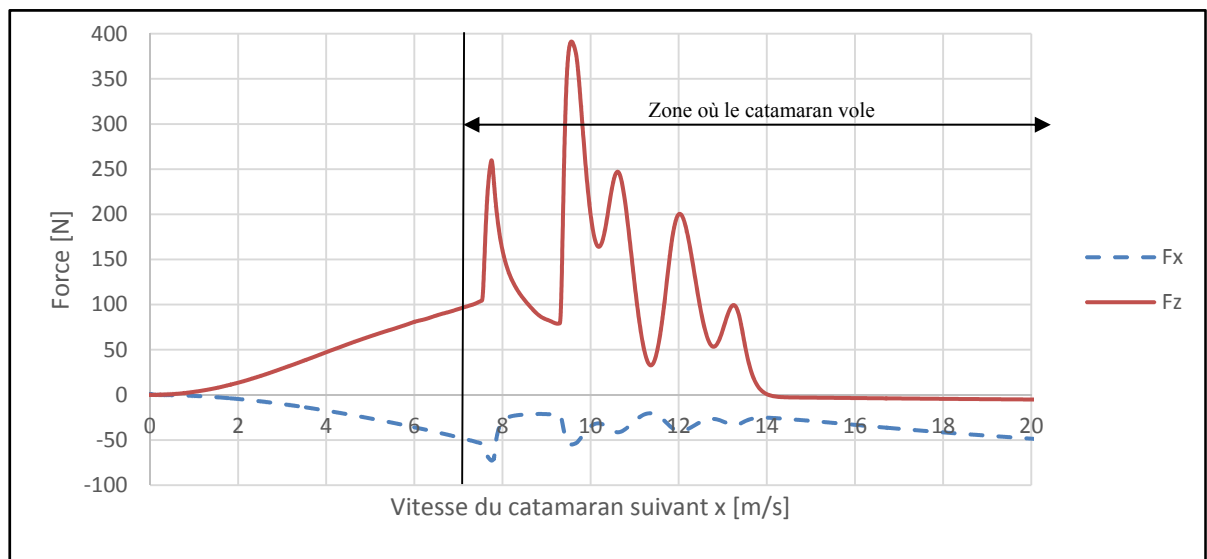


Figure 4.35 Évolution des efforts suivant x , y et z sur le safran porteur (pour une configuration donnée permettant un décollage à 7,0 m/s) en fonction de la vitesse du catamaran suivant x

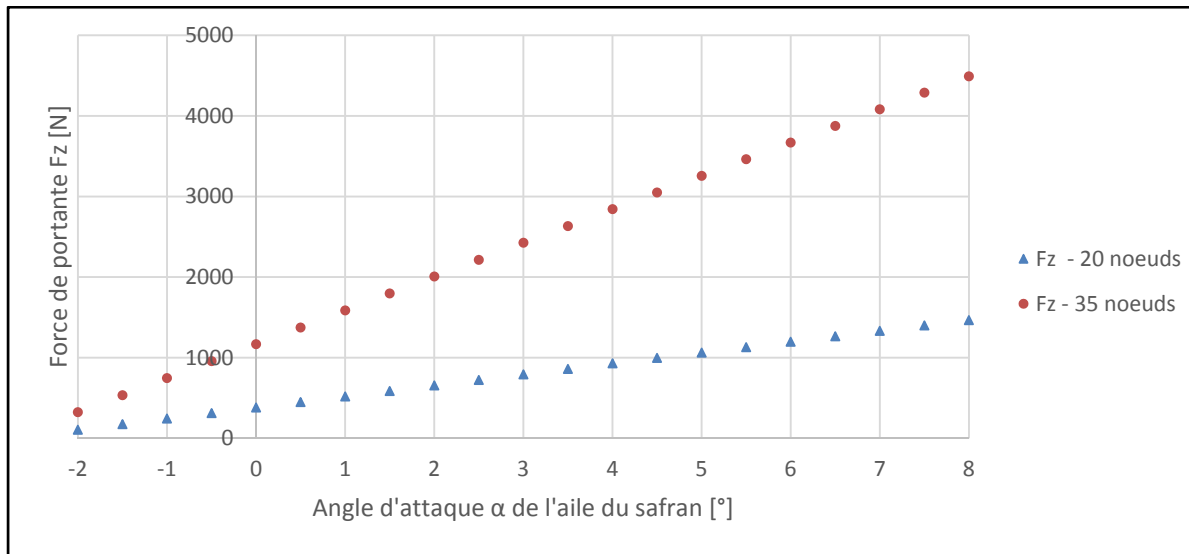


Figure 4.36 Évolution de la force de portance F_z calculée grâce à Xflr5 en fonction de l'angle d'attaque α de l'aile du safran porteur

Force horizontale pour gouverner le catamaran

Comme dit dans la section 4.2.3.3, selon la vitesse, la surface mouillée de la partie verticale est différente. Ainsi, selon la vitesse du catamaran, la force horizontale développée par le safran porteur augmente rapidement. En pratique, la force nécessaire pour gouverner le catamaran est relativement faible si le bateau est bien équilibré (c'est-à-dire, qu'il a ni tendance à remonter au vent, ni à descendre au vent). Cependant une force de 1 000N sur la partie verticale des safrans porteurs est atteignable (voir Figure 4.37).

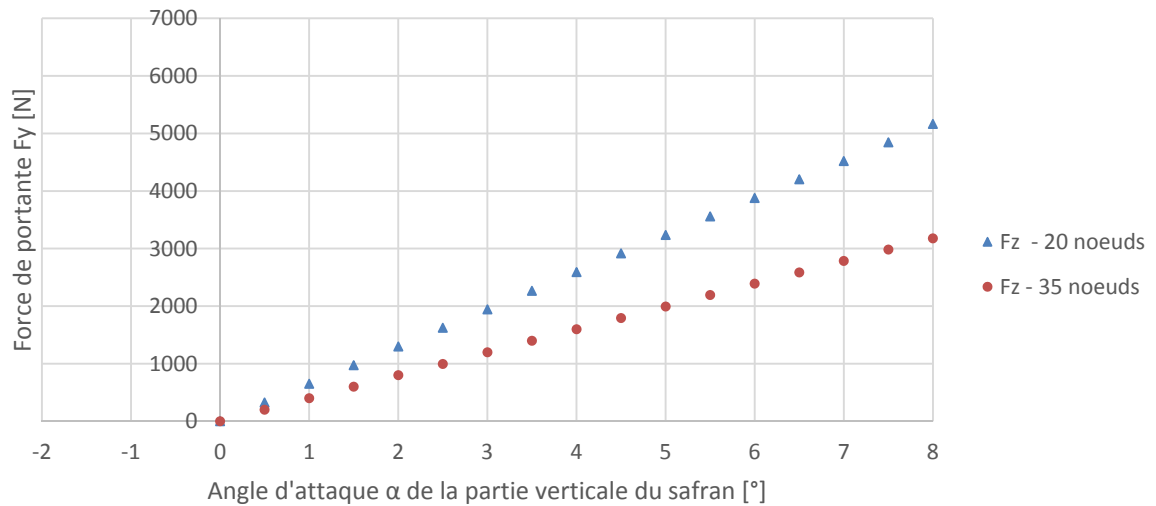


Figure 4.37 Évolution de la force de portance F_y calculée grâce à Xflr5 en fonction de l'angle d'attaque α de la partie verticale du safran porteur

4.3.3 Choix de la forme finale des *hydrofoils* et configurations optimales

Dérive portante

La conclusion de ce chapitre fige donc la géométrie des *hydrofoils*. Les différentes configurations montrent qu'il faut faire un compromis entre la vitesse de décollage et la vitesse maximale. L'influence des variables de configuration est vraiment importante par rapport aux variables de conception. Ainsi, avoir une corde de 0,25m est avantageux pour la vitesse de décollage, sans pour autant réduire drastiquement la vitesse maximale. La variation du rayon de courbure de la dérive n'a pas un réel effet sur la vitesse de décollage, et il est préférable d'avoir un rayon de courbure de 4,0m pour préserver une bonne vitesse maximale. De plus, l'augmentation du rayon du coude permet de décoller plus rapidement. De plus, un rayon de coude de 0,25m évite la concentration de contrainte dans cette zone, tout en favorisant le décollage. Quant à l'envergure de la partie 3 de la dérive, l'augmenter revient à décoller plus rapidement, mais limite la vitesse maximale. Une envergure de 0,7m serait idéale pour notre configuration.

Safrans porteurs

La géométrie des safrans porteurs n'a pas eu une réelle influence lors de la simulation. Or, les dimensions utilisées sont proches de celles observées sur des safrans porteurs réelles. Ces dimensions ont donc été conservées pour la suite de l'étude.

Les caractéristiques finales des *hydrofoils* sont donc décrites dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Dimensions finales des *hydrofoils*

Dérive portante	Safran porteur
Derive (Corde) = 0,25m	Safran Aile (Corde) = 0,08m
Derive (Rayon) = 4,0m	Safran (Hauteur) = 1,5m
Derive Aile (Envergure) = 0,7m	Safran Aile (Envergure) = 0,55m
Derive Coude (Rayon) = 0,25m	Safran (Hauteur Partie 1) = 0,5m
Derive Coude (Corde) = 0,25m	Safran (Hauteur Partie 2) = 1,0m
	Safran Partie 1(Corde) = 0,15m
	Safran Partie 2 (Corde) = 0,08m

Configurations optimales

Afin de respecter le cahier des charges, la configuration optimale pour le décollage et celle pour la vitesse maximale sont présentées dans le Tableau 4.6. En effet, suite à la section 4.3.2.1, une profondeur de dérive portante de 1,3m est optimale pour favoriser le décollage et la vitesse maximale. Cependant, la prise en compte de la dérive du catamaran modifierait cette conclusion. Un angle de *cant* de 10° ou 20° favorise respectivement le décollage ou la vitesse maximale. Finalement, la vitesse maximale est réduite par la force de portance. Un décollage rapide nécessite donc un angle d'attaque de 6° ou plus alors qu'un angle d'attaque de 0° favorise la vitesse maximale.

Tableau 4.6 Configurations optimales

Vitesse de décollage minimale	Vitesse maximale
Derive (Profondeur) = 1,3m	Derive (Profondeur) = 1,3m

Derive (Angle CANT) = 10°	Derive (Angle CANT) = 20°
Derive (Angle attaque) = 6°	Derive (Angle attaque) = 0°

4.3.4 Cas de chargement sur les *hydrofoils*

Selon la section 4.3.2.5, au décollage, la dérive portante génère une force verticale de 3 750N. De plus, dans la section 4.3.2.6, les safrans porteurs développent une force verticale inférieure à 400N. Or, nous estimons que le déplacement de l'équipage vers l'arrière du catamaran incline le catamaran suivant y, donnant ainsi un angle d'attaque supérieur au safran porteur. Afin de récupérer le poids du bateau sur ces trois éléments, les hypothèses sont les suivantes :

- Dérive portante : force verticale de 3 200N;
- Safrans porteurs : chaque safran développe une force verticale de 550N.

Ces résultats sont donc la base utilisée pour déterminer les cas de chargement utilisés pour la conception structurale des *hydrofoils*. Le mode d'application de ces cas de chargement sera décrit en détail dans le chapitre suivant à la section 5.2.3. La base des cas de chargement est la suivante :

- **Dérive portante :**
 - Cas courant : décollage :
 - Force verticale de 3 200N;
 - Toute la dérive est immergée;
 - Limite de déformation imposée à 90mm au niveau du coude.
 - Cas limite :
 - Force verticale de 4 300N;
 - Seule la partie basse de la dérive portante est immergée (bas de la partie 1 et de la partie 3, avec toute la partie 2);
 - Critère de rupture composite Tsai-Wu et critère de flambage imposés à toute la structure composite.

- **Safran porteur :**
 - Cas limite :
 - Force verticale de 1 000N;
 - Force horizontale de 1 500N;
 - Limite de la déformation au niveau de l'aile de 160mm;
 - Critère de rupture composite Tsai-Wu.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET OPTIMISATION STRUCTURALES COMPOSITES

Au cours de ce chapitre, la conception structurale de la dérive portante et d'un safran porteur est décrite. Pour cela, une première partie présente une revue sommaire des méthodes d'optimisation structurale et de structures composites. Une seconde partie met l'accent sur l'optimisation en trois étapes du laminé de la dérive portante en fibre de carbone/époxy : optimisation dimensionnelle libre, optimisation dimensionnelle et optimisation de l'empilement des plis. Finalement, le laminé du safran porteur est ensuite défini et analysé selon l'expérience acquise.

5.1 Revue de littérature

5.1.1 Formulation et résolution générale d'un problème d'optimisation

La réduction des coûts et de la masse conduit le domaine de l'ingénierie à régulièrement recourir à des algorithmes ou méthodes d'optimisation afin de répondre au mieux à l'utilisation.

Un problème d'optimisation est composé de trois éléments (Altair, 2014):

- **Variables de conceptions** : Lors de l'optimisation, ces variables représentant des paramètres de conceptions pouvant être variés dans une plage définie par l'utilisateur afin d'observer les effets sur la fonction objective;
- **Fonction objective** : La fonction objective permet de quantifier la performance de l'optimisation en étant minimisée ou maximisée suite à la variation des variables de conceptions;
- **Contraintes** : Les contraintes sont des critères de conception, fabrication ou dimensionnement à respecter lors de l'optimisation. Elles limitent la variation de variables de conception et sont généralement déterminées par le cahier des charges ou la fabrication.

Un problème général d'optimisation est alors formulé de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 & \min_x f(x) \\
 \text{Soumis à :} \quad & g_j(x) \geq 0, j = 1, \dots, n_g \\
 & h_j(x) = 0, k = 1, \dots, n_h \\
 & \underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i, i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Dans l'équation (5.1), $f(x)$ est la fonction objective à minimiser (ou à maximiser). $X = (x_1, \dots, x_n)$ représente le vecteur contenant les variables de conception dont \overline{x} est la valeur maximale et \underline{x} est la valeur minimale. Le problème est soumis à n_g contraintes d'inégalité $g_j(x)$ et à n_h contraintes d'égalité $h_k(x)$ (Altair, 2014; Forcier, 2010).

La résolution détaillée des différentes méthodes d'optimisation n'étant pas le sujet de cette étude, seule une brève description sera faite. Deux grandes familles sont à distinguer (Forcier, 2010) :

- Algorithme stochastique;
- Méthode basée sur le gradient.

Seule la méthode basée sur le gradient sera décrite dans la suite puisque c'est la méthode utilisée dans le logiciel éléments finis (EF) dans le cadre de ce mémoire. Cette méthode évalue le gradient de la fonction objective et des contraintes afin de déterminer l'influence de leurs variations par rapport à l'optimum. Les équations de Kuhn-Tucker permettent de résoudre l'équation (5.1) par la méthode basée sur le gradient (Forcier, 2010; Vanderplaats, 1984; Venkataraman, 2002) :

$$\nabla f(x^*) + \sum_{j=1}^{n_g} \lambda_j \nabla g_j(x^*) + \sum_{j=1}^{n_h} \lambda_{j+n_g} \nabla h_j(x^*) = 0 \tag{5.2}$$

$$h_k(x^*) = 0 \tag{5.3}$$

$$\lambda_j g_j(x^*) = 0, \lambda_j \geq 0 \quad (5.4)$$

L'équation (5.2) définit la combinaison des variables de conception afin de déterminer l'extremum de la fonction objective, soit son maximum soit son minimum. Aller au-delà de ces extremums signifierait violer une ou plusieurs contraintes.

λ et ∇ sont respectivement les multiplicateurs de Lagrange et l'opérateur gradient (équation (5.5)) tel que :

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\delta f}{\delta x_1}, \frac{\delta f}{\delta x_2}, \frac{\delta f}{\delta x_3}, \dots, \frac{\delta f}{\delta x_n} \right)^T \quad (5.5)$$

Le respect des contraintes d'égalité est donné par l'équation (5.3). L'équation (5.4) permet de ne pas prendre en compte les contraintes inactives ($g_j < 0$). Si plusieurs extremums sont obtenus au cours de l'optimisation, l'extremum global doit être déterminé.

Des auteurs décrivent plus en détail ce processus implémenté dans OPTISTRUCT[®] (Bruyneel, Duysinx et Fleury, 2002; Svanberg, 1987; Thomas, Zhou et Schramm, 2002; Vanderplaats, 1984; Zhou et al., 2004), le solveur EF favorisé pour le reste des travaux présentés.

5.1.2 Optimisation structurale

Suite à la description d'un problème d'optimisation général, l'optimisation structurale peut être effectuée par trois méthodes :

1. **Optimisation topologique :** L'optimisation topologique permet de déterminer la géométrie globale d'une pièce 3D soumise à un cas de chargement afin de respecter un objectif donné. En effet, elle modifie la densité de chaque élément (et proportionnellement la rigidité par la variation du module d'élasticité (E)) afin de minimiser la masse ou souplesse. Ainsi, cette optimisation nécessite seulement de définir le domaine de conception et la proportion de volume de ce dernier à être

utilisé pour créer la structure. Des membrures se forment alors pour dévoiler la géométrie globale nécessaire pour récupérer les efforts (voir Figure 5.1 a). Cette méthode s'applique seulement pour des matériaux isotropes (Bendsøe et Sigmund, 2003; Rozvani, 2001; Thomas, Zhou et Schramm, 2002);

2. **Optimisation de forme** : L'optimisation de forme permet de faire varier certaines dimensions d'une géométrie globale déjà déterminée. Les variables de conceptions sont donc la position de certains nœuds. Par exemple, dans la Figure 5.1 b, le contour des trous passe par des points dont leurs positions sont des variables de conception. La forme des trous va donc évoluer pendant l'optimisation afin de respecter un objectif donné. La variation maximale de la forme est limitée par la distorsion des éléments. En effet, cette distorsion peut invalider l'analyse (Altair, 2014; Forcier, 2010);
3. **Optimisation dimensionnelle** : L'optimisation dimensionnelle varie les propriétés structurales des éléments 2D tels que l'épaisseur, les dimensions de la section d'une poutre. Dans le cas de la Figure 5.1 c, les dimensions de la section des poutres sont variées sans que la géométrie ne soit modifiée.

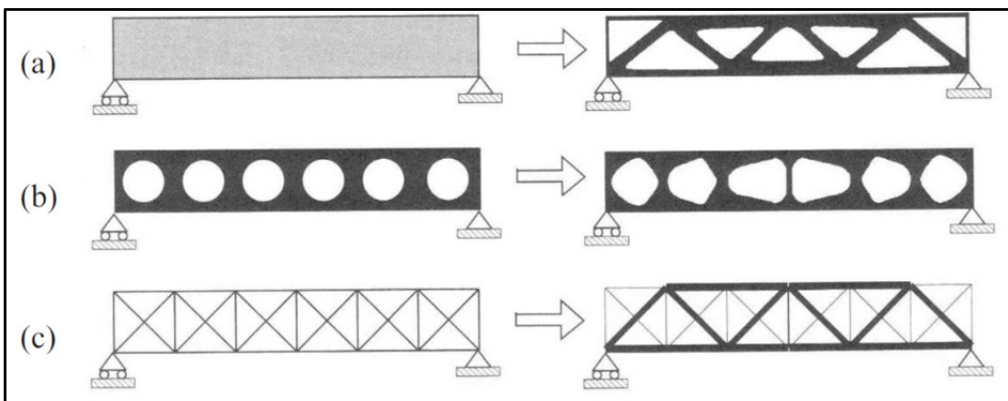


Figure 5.1 Différentes optimisations structurales; (a) Topologique;
(b) Forme; (c) Dimensionnelle
Adapté de Bendsøe et Sigmund (2003)

5.1.3 Optimisation des structures en composite

L'optimisation dimensionnelle est utilisée dans le cadre de l'optimisation des structures en composite. En effet, une structure composite est modélisée en EF par des éléments coques. La description de cette structure nécessite donc de connaître l'épaisseur, le matériau et l'orientation de chacune des couches du laminé (Forcier, 2010). La formulation d'un tel problème peut prendre deux formes : une variable est définie pour chaque couche de chaque élément ou une variable est définie pour chaque groupe d'éléments partageant le même laminé.

La première formulation permet de définir les changements de laminé, mais les nombreuses variations d'épaisseurs complexifient la fabrication du laminé. La deuxième formulation réduit le nombre de variables, et donc le temps d'optimisation, tout en simplifiant le laminé pour la fabrication. De plus, l'ordre des plis peut être ignoré ou pris en compte. Dans le premier cas, plusieurs plis peuvent être regroupés dans une même couche. L'épaisseur de la couche définit le nombre de plis en connaissance de leur épaisseur unitaire. Dans le deuxième cas, l'ordre des plis est une variable de conception, permettant l'optimisation poussée de la définition du laminé (Forcier, 2010).

Ainsi, l'optimisation d'une structure composite se déroule en trois étapes :

1. **Optimisation dimensionnelle libre :** Cette optimisation définit l'épaisseur et la distribution des plis pour chaque élément. Les propriétés mécaniques pour chaque élément sont ensuite homogénéisées afin d'éliminer toute notion d'empilement précis des plis (Michaud, 2014). L'épaisseur est bornée entre une valeur minimale et maximale afin d'éviter de converger vers un extremum local. Les contraintes sont alors évaluées par des variations du critère de Von Mises pour des matériaux composites (Altair, 2014). Cette optimisation représente donc la répartition optimale de l'épaisseur sur toute la structure. Ainsi, les éléments connectés ayant une épaisseur similaire peuvent être regroupés pour l'optimisation dimensionnelle;
2. **Optimisation dimensionnelle :** L'optimisation dimensionnelle consiste à regrouper les éléments d'une zone possédant un laminé similaire. Les variables de conception,

telles que les matériaux et l'épaisseurs des plis dans les différentes orientations, sont variées de façon discrète (Altair, 2014). Cette étape permet de fournir le nombre de plis de chaque orientation dans chaque zone. L'ordre des plis n'est pas encore pris en compte;

3. **Optimisation de l'empilement** : Elle optimise l'ordre des plis dans les différentes zones afin respecter l'objectif donné, généralement minimiser la souplesse. Les critères de fabrication y sont introduits comme contraintes.

5.1.4 Critère de rupture en composite Tsai-Wu

Il existe plusieurs théories pour prédire la rupture d'un matériau composite. Cependant, seule la théorie de Tsai-Wu utilisée lors de l'optimisation composite dans le cadre du projet sera décrite. Ce critère est « basé sur la théorie des tenseurs de contraintes et prend en compte que les composites possèdent différentes résistances en tension et compression » (Kassapoglou, 2013). Il est défini par l'équation (5.6) et dépend des contraintes admissibles du matériau dans chaque direction en tension (X_T et Y_T), en compression (X_C et Y_C) et en cisaillement (S_{12}). F_{ij} représente les différentes composantes de forces admissibles (Baker, Dutton et Kelly, 2004). f^1 permet d'adapter la résistance au cisaillement par rapport à la composition du laminé.

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (5.6)$$

Où

$$F_1 = \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C}; F_2 = \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C}; F_{11} = -\frac{1}{X_TX_C}$$

$$F_{22} = -\frac{1}{Y_TY_C}; F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}$$

Et

$$F_{12} = f^1\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad \text{où} \quad -1.0 \leq f^1 \leq 1.0$$

5.2 Optimisation composite de la dérive portante

Cette section traite de l'optimisation composite de la dérive portante. La dérive est optimisée par la méthode des éléments finis pour les différents cas de chargement définis dans la section 4.3.4 et en respectant le cahier des charges défini à la section 1.2.3.

5.2.1 Processus d'optimisation structurale

Le processus d'optimisation est composé de trois étapes : une optimisation libre (*free-size*), une optimisation dimensionnelle (*sizing*) et une optimisation de la séquence d'empilement des plis (*shuffling*), telles qu'implémentées dans OPTISTRUCT de la suite Altair HYPERWORKS (voir Figure 5.2). Cette méthode est également utilisée dans les travaux de F. Michaud (2014) pour optimiser le laminé d'une aile adaptative. En effet, suite à la définition des cas de chargement et des conditions aux limites, l'optimisation libre définit l'épaisseur de chaque pli individuel du laminé pour chaque élément. Ainsi, les éléments possédant une épaisseur similaire sont regroupés dans des zones dont les variables de conception seront identiques pour l'optimisation dimensionnelle. Cette étape optimise l'épaisseur du laminé dans les différentes zones. Suite à la validation de cette optimisation dimensionnelle, l'optimisation de la séquence des plis permet de respecter les critères de fabrication et faciliter la mise des plis.

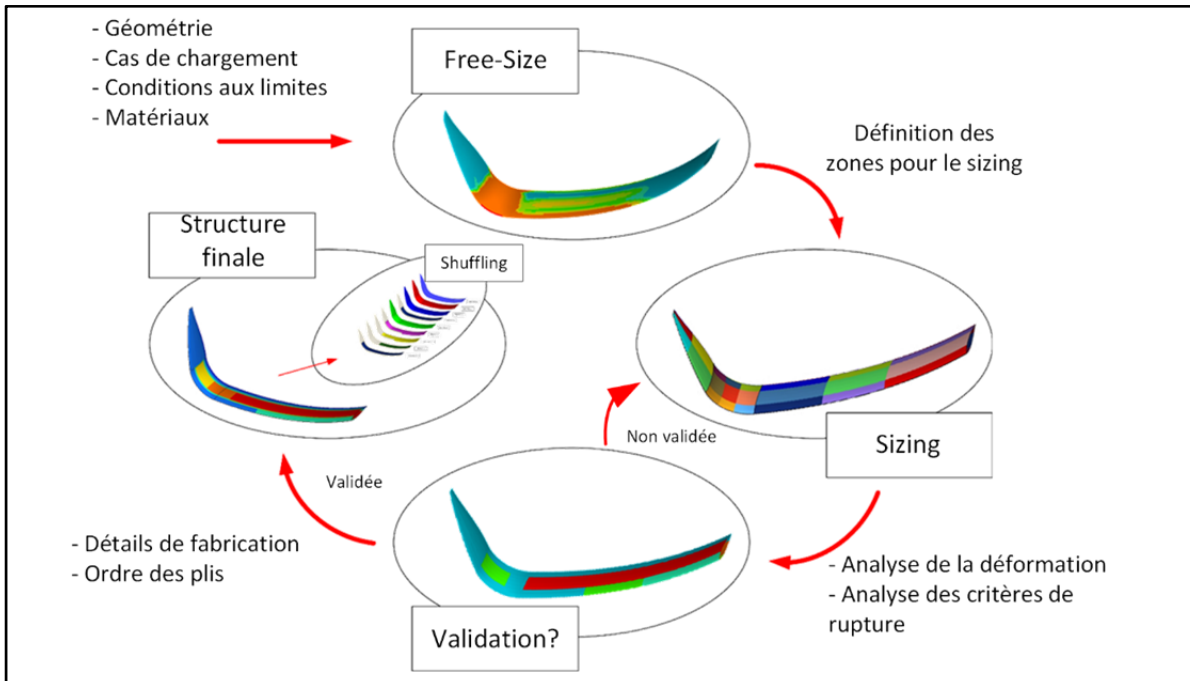


Figure 5.2 Méthodologie d'optimisation composite suivie

5.2.2 Géométrie et maillage

La géométrie finale des dérives portantes est donnée à la section 4.3.3. Grâce au CAD paramétrable présenté au CHAPITRE 3, cette géométrie a été modélisée et la surface extérieure a été importée dans le préprocesseur EF.

La globalité de la dérive est ici étudiée. Le modèle est constitué des éléments suivants :

- Éléments coques (quadrilatères à 4 nœuds) modélisant les surfaces de l'intrados et de l'extrados. Quelques éléments coques triangulaires à 3 nœuds sont présents afin de limiter la distorsion des quadrilatères et préserver une bonne qualité de maillage;
- Éléments solides hexaèdres à 8 nœuds modélisant la mousse. Les nœuds des côtés des éléments sur les surfaces sont coïncidents avec les nœuds des éléments coques décrits précédemment.
-

Le modèle maillé (voir Figure 5.3) est composé de 175 809 nœuds, 206 298 éléments coques (triangulaires et quadrilatères), 144 958 éléments solides quadrilatères et 7 éléments corps rigides. Ces éléments sont suffisants pour assurer la convergence des solutions éléments finis.

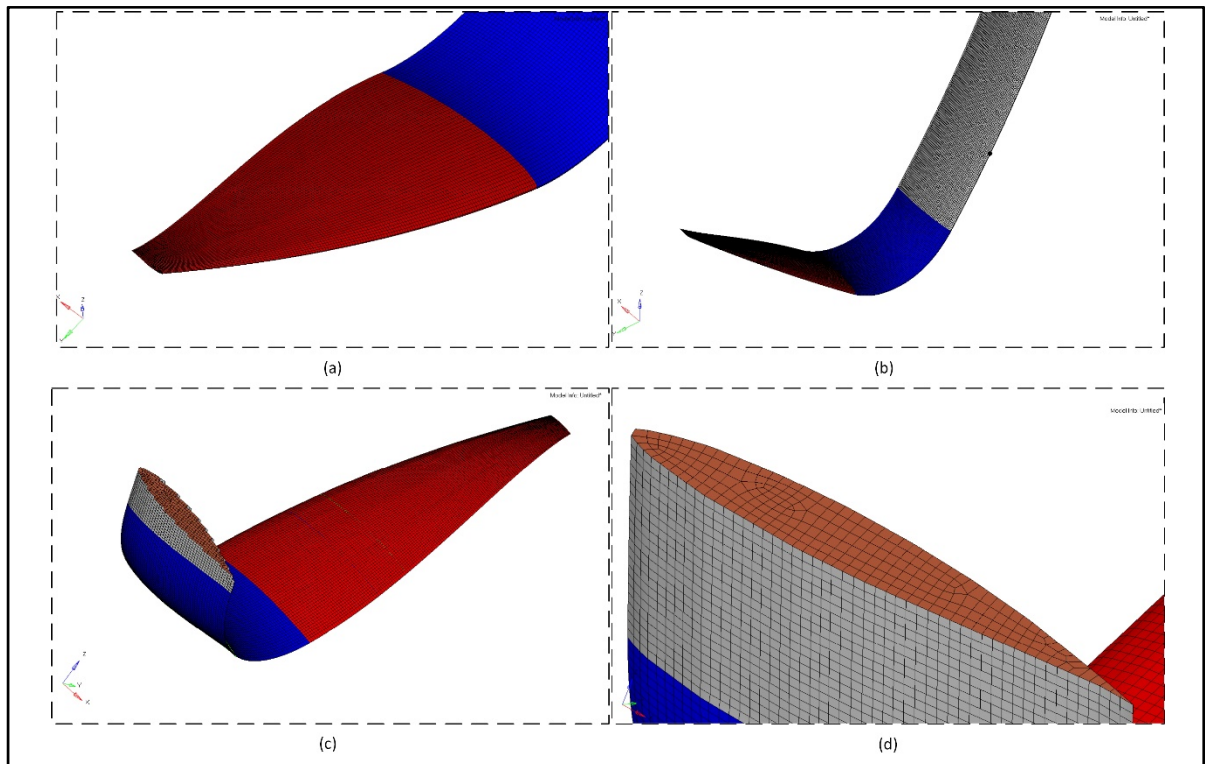


Figure 5.3 Modèle éléments finis de la dérive portante pour l'optimisation; (a) Vue de l'aile de la dérive portante; (b) Vue de la majorité de la dérive portante; (c) Vue de l'aile et du coude de la dérive; (d) Vue rapprochée de la section

5.2.3 Conditions aux limites et cas de chargements

Conditions aux limites

La dérive portante est en liaison glissière suivant z dans le puits de dérive de la coque du catamaran. Cette liaison est réalisée par deux zones de contact séparées de 0,5m entre le bas et le haut de la coque (voir Figure 5.4 a). La translation suivant z est annulée sur le haut de la dérive.

Les contacts avec la coque sont donc modélisés par des éléments corps rigides RBE3 sur plusieurs rangées de nœuds des surfaces extradors et intrados (voir Figure 5.4 b). Dans le cas d'un RBE3, un nœud esclave est créé au centre du volume formé par les nœuds maîtres précédents. Un RBE3 n'ajoute pas de rigidité à la structure. Les nœuds maîtres sont alors contraints selon les translations x et y (voir Figure 5.4 b). Afin de récupérer les charges verticales, tous les nœuds de la surface supérieure de la dérive sont fixés par rapport à l'axe z (voir Figure 5.4 b).

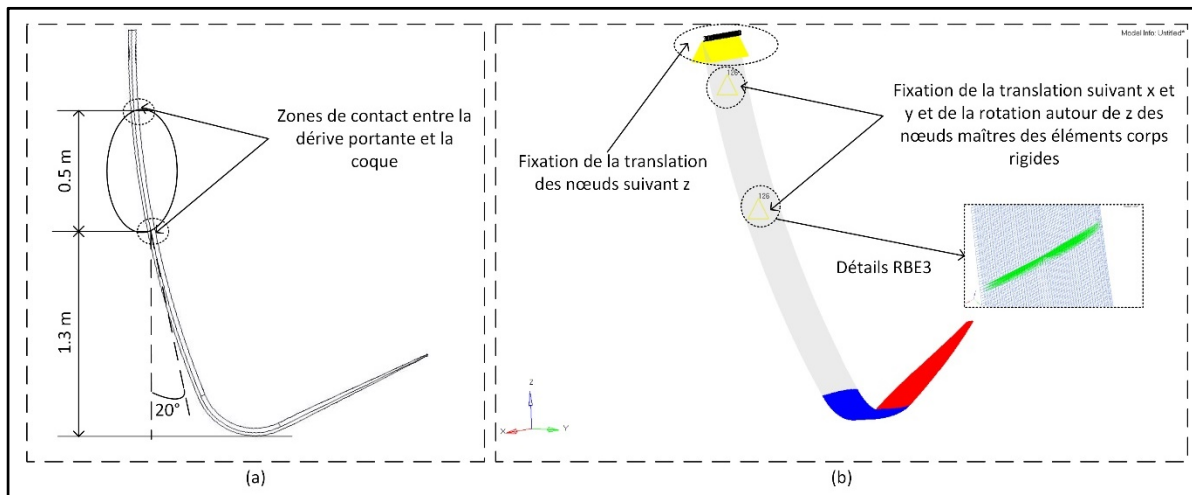


Figure 5.4 Position de la dérive portante pour l'optimisation; (a) Schémas de la configuration des conditions limites; (b) Représentation des conditions limites

Cas de chargement

Les chargements hydrodynamiques obtenus par le modèle SM du CHAPITRE 4 sont modélisés par des forces ponctuelles verticales appliquées sur les différentes parties de la dérive portante. Il est à noter que l'inclinaison de 20° de la dérive par rapport à la verticale décrit le cas le plus défavorable en utilisation. Ainsi, deux cas de chargements sont utilisés pour modéliser un cas courant d'utilisation et un cas limite d'utilisation (voir Tableau 5.1). Ils sont pondérés de la même manière. Le cas limite étant plus sollicitant pour la structure de la dérive, les critères de rupture (Tsai-Wu) et de flambage sont appliqués seulement sur ce cas de chargement. Pour le cas courant, une contrainte limite de déformation est prise en compte.

Cas 1 courant

- Description : Le cas 1 courant décrit une situation normale de décollage (coques hors de l'eau), où les safrans porteurs portent chacun 55kg. Dans cette situation, même si normalement toute la dérive est encore immergée, une situation de vol est considérée afin d'avoir un cas plus contraignant. C'est pourquoi seul le coude est entièrement immergé ; seules la zone basse de la partie 1 de la dérive et la moitié de l'aile sont immergées. La force de portance statique totale est alors de 3 200N;
- Critères de conception :
 - Flèche 3D limitante de 90mm au niveau haut du coude afin de minimiser la déformation tout en minimisant l'augmentation de la masse du laminé. L'angle de *cant* θ de la dérive portante étant de 20° , la géométrie décrit le cas le plus défavorable.
- Implémentation des efforts sur des REB3 (voir Figure 5.5a) :
 - Force ponctuelle sur la partie 1, proche du coude : 600N verticale vers le haut;
 - Force ponctuelle sur le coude : 1 500N verticale vers le haut;
 - Force ponctuelle à 1/4 de l'aile : 1 100N verticale vers le haut.

Cas 2 limite

- Description : Le cas 2 limite décrit le cas où le bateau ne volerait pas, et essayerait de décoller avec une vitesse nettement supérieure à la vitesse de décollage. Par expérience (confirmée par une discussion avec Martin Fisher lors de la LC 2015), pour prendre en compte les effets dynamiques, un coefficient dynamique de 1.4 est appliqué sur les charges du cas courant afin d'obtenir les charges dynamiques. On applique ensuite un coefficient de sécurité de 1.5 sur ces charges pour prendre en compte des cas imprévus et des erreurs de fabrication. La force de portance totale appliquée représentative dans ce cas est alors de 6750 N;
- Critères de dimensionnement :
 - Critère de rupture du composite (Tsai-Wu) : $FS_{min} = 1$. Le composite ne doit pas briser, car la défaillance a lieu en dessous d'un critère 1;
 - Critère de flambage : $\lambda_{min} = 3$: Le flambage a lieu en dessous d'un critère 1. Le choix de prendre un critère de 3 permet de s'assurer qu'il n'y ait pas de flambage dû au rapprochement des deux peaux de carbone quelque soit la mousse structurale utilisée.
- Implémentation des efforts des REB3 (voir Figure 5.5b) :
 - Force ponctuelle sur la partie 1, proche du coude : 1 300N verticale vers le haut;
 - Force ponctuelle sur le coude : 2 300N verticale vers le haut;
 - Force ponctuelle à 1/3 de l'aile : 3 150N verticale vers le haut.

Tableau 5.1 Résumé des contraintes d'optimisation

	Description du chargement	Valeur de la charge [N]	Contraintes d'optimisation	Valeurs des contraintes
Cas 1 courant	Dérive partiellement immergée	3 200	Flèche (au niveau haut du coude)	90 mm (dans toutes les directions)
Cas 2 limite	Dérive complètement immergée	6 750	Critère de rupture (Tsai-Wu)	$FS_{\min} = 1$
			Critère de flambage	$\lambda_{\min} = 3$

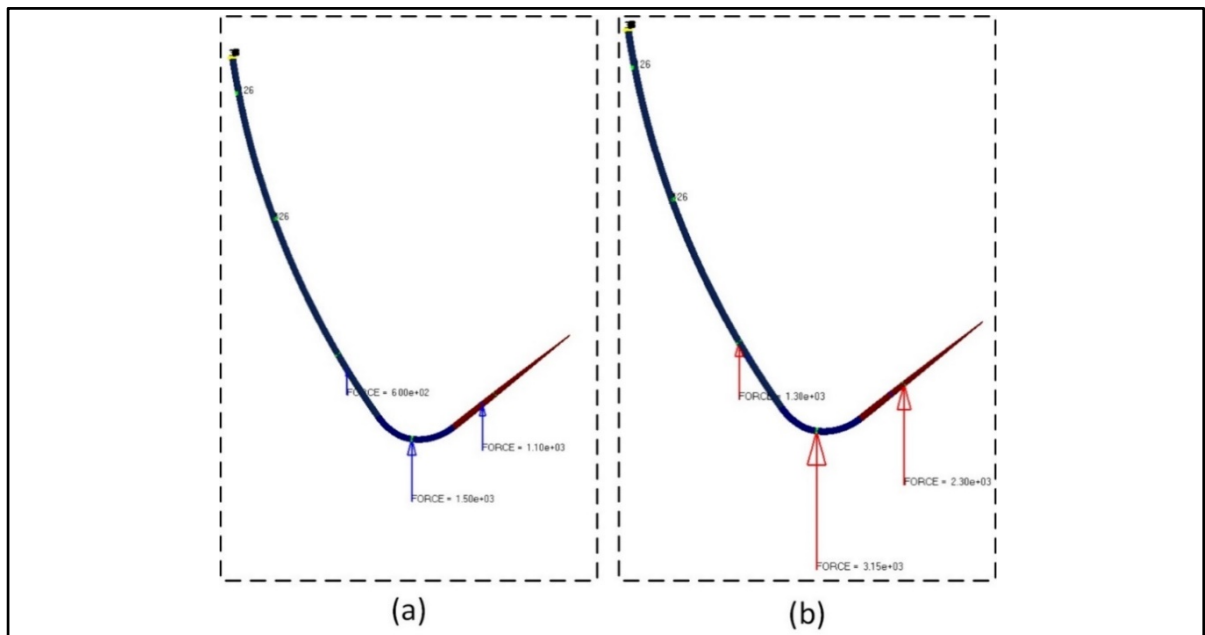


Figure 5.5 Cas de chargement sur la dérive portante; (a) Cas 1 courant; (b) Cas 2 limite

5.2.4 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés définis par le cahier des charges sont de la fibre de carbone unidirectionnelle (TC-09-U) avec de la résine époxy, de la fibre de carbone biaxiale (TC-06-T) avec de la résine époxy, et de la mousse structurale (Corecell M60). Leurs propriétés sont fournies dans l'ANNEXE X. L'orientation de la fibre unidirectionnelle est de 0° et celle de la

fibres biaxiales est de $\pm 45^\circ$. De plus, le laminé devra être symétrique et équilibré (même nombre de plis de -45° et $+45^\circ$) afin d'éviter toute flexion et torsion.

L'orientation de 0° est définie par la plus grande dimension de la dérive portante, donc l'orientation du 90° est selon la corde de la dérive portante.

5.2.5 Optimisation dimensionnelle libre

L'optimisation dimensionnelle libre est réalisée afin de déterminer l'épaisseur des plis des peaux en composite. Elle fournit une représentation des zones sollicitées en dimensionnant de façon continue l'épaisseur des plis de chaque orientation. L'objectif est donc de réduire la souplesse de la structure tout en respectant les contraintes structurales et de fabrications choisies. Seules les contraintes d'optimisation de déplacement statique et de flambage sont utilisées, car le logiciel EF utilisé ne rend pas disponibles les autres contraintes. De plus, la fonction *smear* est utilisée pour homogénéiser le laminé, tel que décrit dans la section 5.1.3.

5.2.5.1 Fonction objective

L'objectif de l'optimisation dimensionnelle libre est de minimiser la masse $m_{\text{dérive}}$ de la dérive portante en appliquant une contrainte de déplacement $\delta(x)_j$ sur les nœuds de jonction entre le coude (partie 2) et l'aile (partie 3) de la dérive. Le déplacement $\delta(x)_j$ de ces nœuds (n_j) est alors limité à 90mm dans toutes les directions. De plus, l'indice de flambage λ est utilisé et sa valeur minimale doit être supérieure à 3 afin de s'assurer qu'il n'y ait aucun flambage.

La variable de conception représentant l'épaisseur des plis de chaque direction pour chaque élément est x_{ik} . Mathématiquement, ce problème décrit par l'équation (5.7) où n_j est le nombre de nœuds.

$$\min m_{\text{dérive}} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Soumis à :} \quad & \delta(x)_j \leq 90\text{mm} & j = 1, \dots, n_j \\ & \lambda_{\min} \geq 3 \end{aligned}$$

De plus, afin d'éviter toute divergence du laminé, il est nécessaire d'imposer une épaisseur minimale T_k^L de 2mm et une valeur maximale T_k^U de 15mm (voir équation (5.8)).

$$T_k^L \leq x_{ik} \leq T_k^U \quad i = 1, \dots, NP \quad k=1, \dots, NE \quad (5.8)$$

5.2.5.2 Résultats

Les résultats de l'optimisation dimensionnelle libre permettent de définir les zones pour l'optimisation dimensionnelle. Selon la Figure 5.6, le coude de la dérive portante est la partie la plus sollicitée de la dérive portante. L'épaisseur du laminé varie entre 3mm et 14mm. Les différentes épaisseurs forment plusieurs zones dont on distinguera tout d'abord le bord d'attaque, la partie centrale et le bord de fuite. Ensuite, dans le sens de la hauteur de la dérive, l'aile, le coude, le bas de la partie 1 et le haut de partie 1 représentent également des zones différentes.

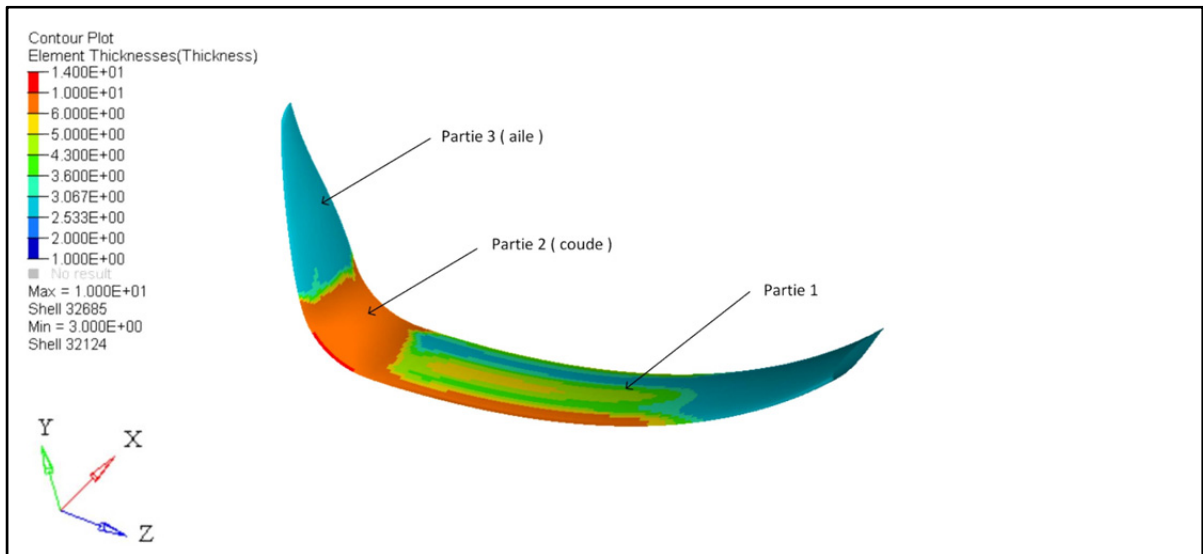


Figure 5.6 Distribution de l'épaisseur du laminé après l'optimisation dimensionnelle libre [mm]

La simplification de la forme des plis issus de l'optimisation permet de créer des zones pour lesquelles des variables de conceptions locales seront définies. Au total, 44 zones sont ainsi définies. Chaque zone colorée possède alors deux variables de conceptions, c'est-à-dire l'épaisseur des plis à 0° et $\pm 45^\circ$ (voir Figure 5.7) pour un total de 88 variables de conception. Ces zones sont modélisées avec des propriétés PCOMP, les plis ne sont donc pas continus entre les différentes zones.

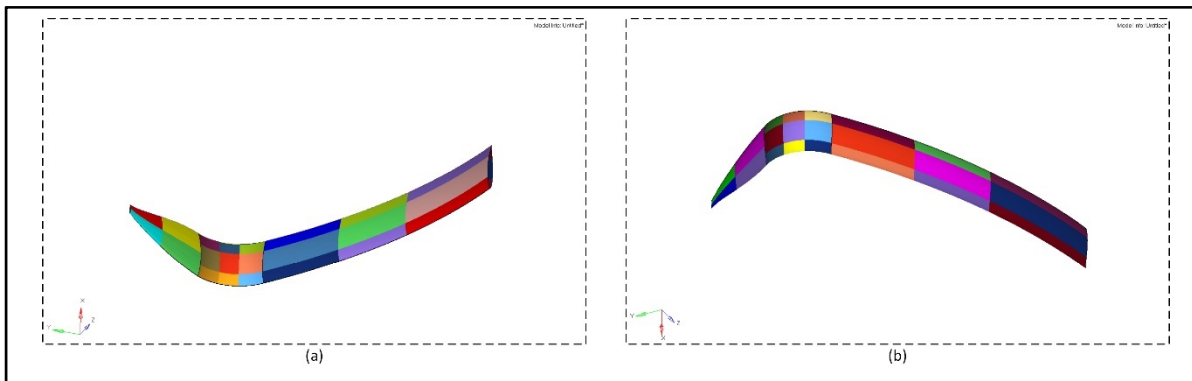


Figure 5.7 Modèle défini pour l'optimisation dimensionnelle;
(a) Zones extradors; (b) Zones intrados

5.2.6 Optimisation dimensionnelle

Le modèle issu de l'optimisation dimensionnelle libre (voir Figure 5.7) est utilisé par l'optimisation dimensionnelle afin de définir le nombre de plis dans les différentes zones d'optimisation afin de respecter les contraintes de conception et de fabrication. Les mêmes cas de chargements de la section 5.2.3 seront utilisés, soit le cas courant 1 et le cas limite 2.

5.2.6.1 Fonction objective

La fonction objective est similaire à celle utilisée pour l'optimisation libre, c'est à dire, minimiser la masse $m_{\text{dérive}}$. Le déplacement statique $\delta(x)_j$ des nœuds de la jonction entre le coude et l'aile est toujours limité à 90mm. Cependant, le nombre de variables de conception est limité à 88 grâce à la création des zones de dimensionnement. L'épaisseur du laminé est toujours bornée entre T_k^L et T_k^U .

L'optimisation dimensionnelle permet d'ajouter des nouvelles contraintes d'optimisation :

- Le critère de rupture composite (Tsai-Wu), FS_{\min} , doit toujours être inférieur à 1 pour éviter toute défaillance du laminé;
- Le critère de flambage, λ_{\min} , doit toujours être supérieure à 3 afin de s'assurer qu'il y ait aucun risque de flambage, quel que soit la mousse structurale utilisée. En effet, il y a flambage quand l'indice de flambage est inférieur à 1.

Mathématiquement, ce problème d'optimisation est décrit par l'équation (5.9) où n_j , NP , NE et NM sont respectivement le nombre de nœuds de la jonction, le nombre de plis, le nombre d'éléments et le nombre de modes.

$$\begin{array}{lll}
 \min & m_{\text{dérive}} & (5.9) \\
 \text{Soumis à :} & \delta(x)_j \leq 90mm & j = 1, \dots, n_j \\
 & \lambda_m \geq 3 & i = 1, \dots, NP \\
 & FS_k \leq 1 & k = 1, \dots, NE \\
 & T_k^L \leq x_{ik} \leq T_k^U & M = 1, \dots, NM
 \end{array}$$

5.2.6.2 Résultats

L'épaisseur du laminé de chaque zone est obtenue à la suite de l'optimisation dimensionnelle. Ainsi, le nombre de plis des différentes orientations est défini. L'épaisseur du laminé varie donc entre 2,24mm (6 plis) et 7,8mm (16 plis). L'épaisseur maximale est au niveau du centre de la partie 1 de l'extrados de la dérive. Le bout de l'aile, moins chargé, a un laminé moins épais (voir Figure 5.8). Contrairement au bord d'attaque de l'extrados, celui de l'intrados est davantage sollicité. Le bord d'attaque doit donc être renforcé dans ces zones. Finalement, le laminé de l'intrados est lui moins sollicité que celui de l'extrados puisque l'épaisseur de l'intrados est plus faible que celui de l'extrados (voir Figure 5.9). En effet, la différence d'épaisseur est justifiée comme les plis sont majoritairement orientés à 0° et que $X_C < X_T$. La masse finale de la dérive avec la prise en compte de la mousse structurale est de 11,8kg.

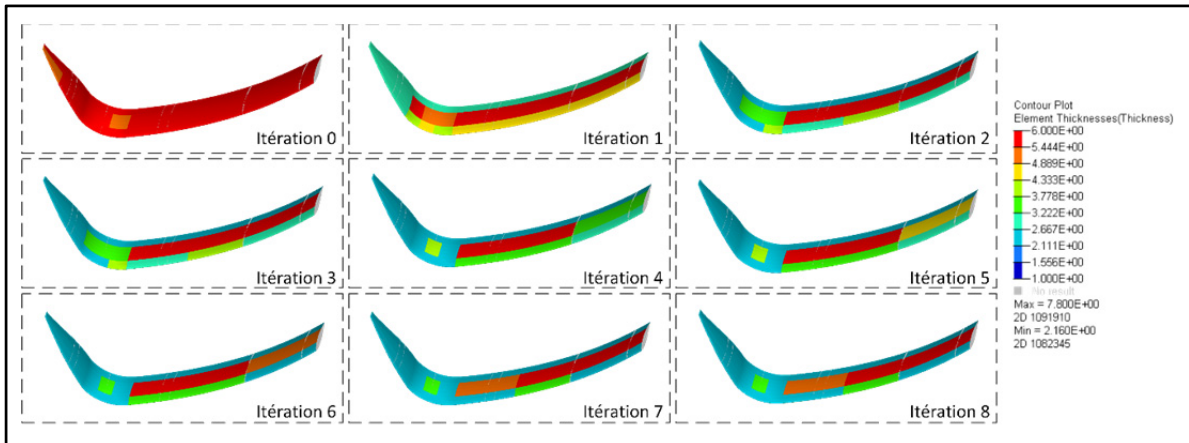


Figure 5.8 Évolution de l'épaisseur du laminé de l'extrados lors de l'optimisation dimensionnelle [mm]

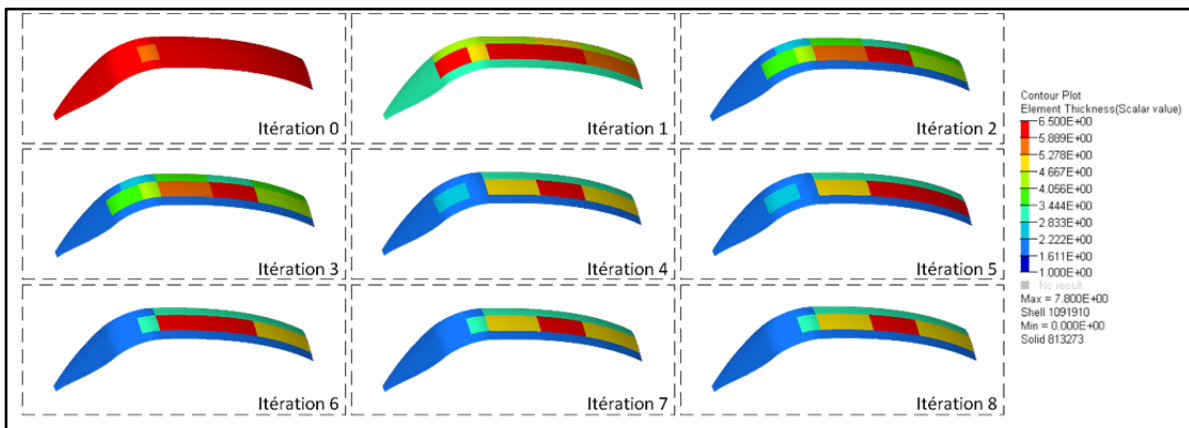


Figure 5.9 Évolution de l'épaisseur du laminé de l'intrados lors de l'optimisation dimensionnelle [mm]

5.2.6.3 Simplification du modèle

Le modèle issu de l'optimisation dimensionnelle comporte un laminé discontinu entre ses différentes zones. En effet, les plis utilisant les propriétés PCOMP sont définis dans chaque zone. Il faut donc utiliser les propriétés PCOMPG afin d'unifier les plis identiques des différentes zones. De nouvelles zones sont alors créées, contenant des plis de la forme de la zone (voir Figure 5.10). Ainsi, grâce à la propriété PCOMPG, certains plis de la zone 4 sont par exemple prolongés dans la zone 3 pour l'extrados, ou la zone 6 pour l'intrados. De plus, certains plis sont modifiés manuellement afin de simplifier leurs formes pour faciliter la fabrication. Des ajustements ont également été ajoutés pour satisfaire les transitions

progressives des plis d'une à l'autre. Finalement, les considérations suivantes sont faites pour l'optimisation de l'empilement des plis :

- Fabriquer un laminé symétrique et équilibré;
- Éviter l'empilement de plus de 4 plis consécutifs de même orientation;
- Ajouter un pli de $0^\circ/90^\circ$ de TC-06-T en surface après optimisation pour recouvrir les plis $\pm 45^\circ$ discontinus (éviter la délamination au joint en surface).

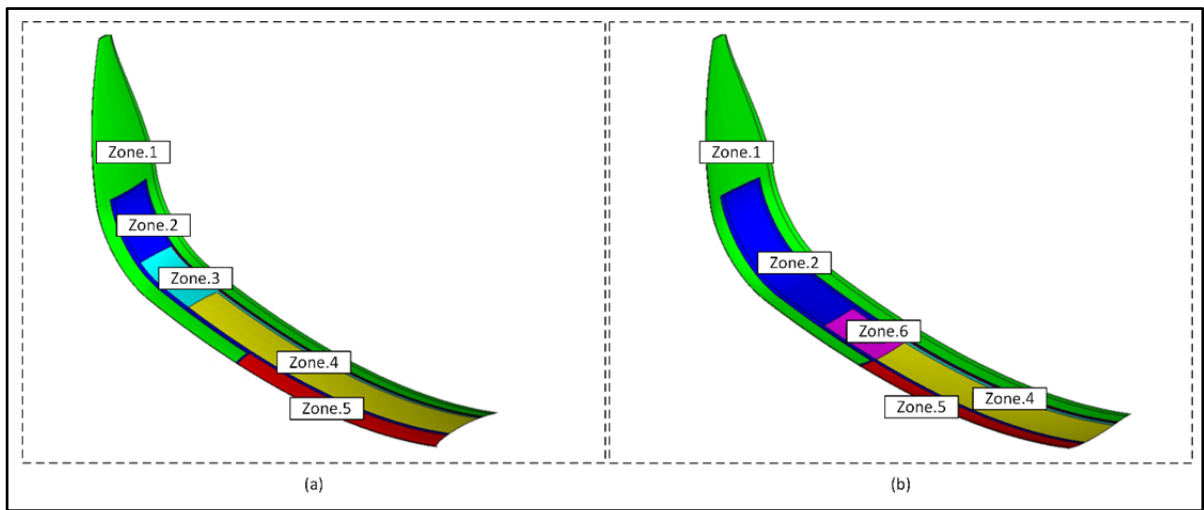


Figure 5.10 Identification des zones pour l'empilement; (a) Extrados; (b) Intrados

5.2.7 Optimisation de l'empilement des plis

Suite aux deux optimisations précédentes. Le laminé complet est défini dans un ordre quelconque pour chaque zone. L'optimisation de l'empilement permet donc de faire coïncider au maximum les plis des différentes zones afin d'avoir un laminé homogène, respectant les critères d'optimisation.

La séquence d'empilement de la dérive portante est présentée au Tableau 5.2. Le laminé comprend au maximum 9 plis symétriques (18 plis au total) qui sont répartis dans différentes zones pour l'intrados et l'extrados. L'épaisseur varie entre 2,68mm et 8,56mm. Ces zones sont identifiées à la Figure 5.10. Afin de bien visualiser la forme finale simplifiée des plis et leur ordre d'empilement, les plis numérotés de 1 à 9 (jusqu'au plan de symétrie) sont

présentés à la Figure 5.11. Finalement, les modifications apportées au laminé conduisent à une augmentation de la masse de la dérive. Sa masse finale est alors de 14,5kg.

Tableau 5.2 Séquence d'empilement des plis et épaisseur pour les différentes zones de la dérive portante

	ZONE ID					
PLI ID	1	2	3	4	5	6
1	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
2	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
3	0°	0°	0°	0°	0°	0°
4		0°	0°	0°		0°
5	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
6		0°	0°	0°	0°	0°
7		0°	0°	0°	0°	0°
8			±45°	±45°	±45°	
9				0°		0°
10				0°		0°
11			±45°	±45°	±45°	
12		0°	0°	0°	0°	0°
13		0°	0°	0°	0°	0°
14	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
15		0°	0°	0°		0°
16	0°	0°	0°	0°	0°	0°
17	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
18	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
Épaisseur [mm]	2,68	6,76	7,2	8,56	5,84	8,12

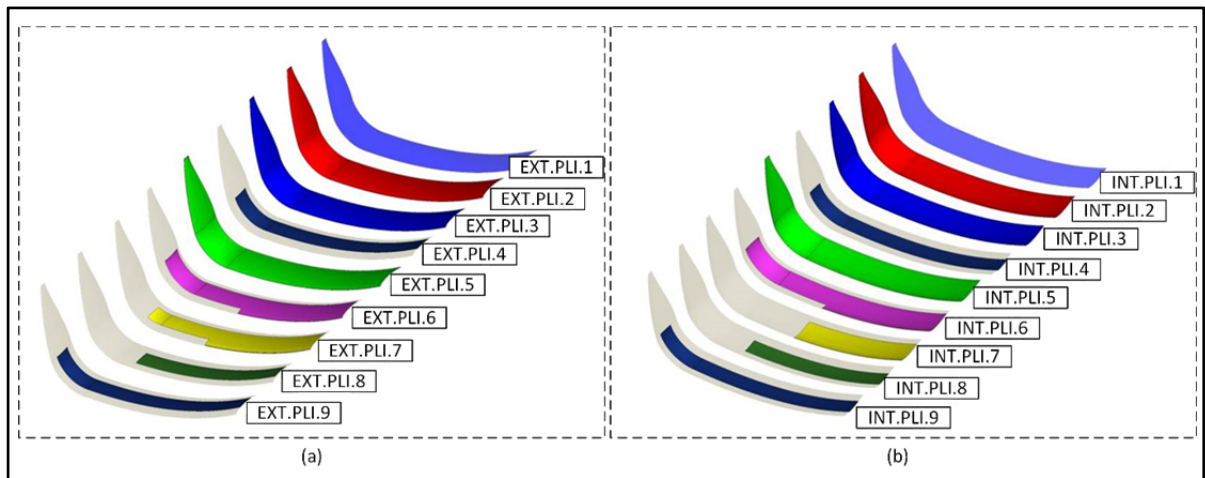


Figure 5.11 Identification des plis; (a) Extrados; (b) Intrados

5.2.8 Résultats

Suite à ces trois étapes d'optimisation, une analyse structurale permet de valider la conception :

- *Cas 1 courant (voir Figure 5.12) : 3200N verticale;*
 - La contrainte de flèche de 90 mm imposée au niveau haut du coude est respectée. La déformation étant de 86 mm;
 - Avec une flèche de 86 mm au niveau du coude, le bout de l'aile de la dérive a une flèche de 171mm. Cette flèche est acceptable au vu des dimensions de la dérive;
- *Cas 2 limite : 6 750N verticale;*
 - Le critère de rupture composite (Tsai-Wu) est vérifié. L'indice maximal est de 0,61 alors que le critère maximal était de 1 (voir Figure 5.13);
 - Le critère de flambage est également vérifié puisque l'indice de flambage est supérieur à 3,63 pour le mode 1 (voir Figure 5.14).

Suite à la validation du respect des contraintes de conception imposées pendant l'optimisation, les modifications apportées au laminé pour respecter les règles de fabrications de pièces composites sont donc validées.

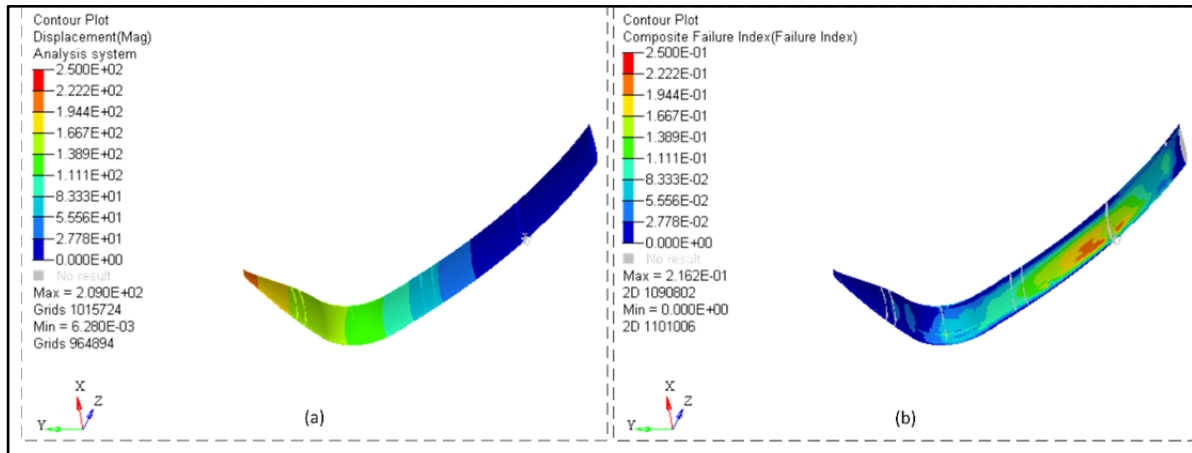


Figure 5.12 Déformation et critère de rupture composite pour le cas 1 courant;
(a) Déformation [mm]; (b) Critère de rupture composite

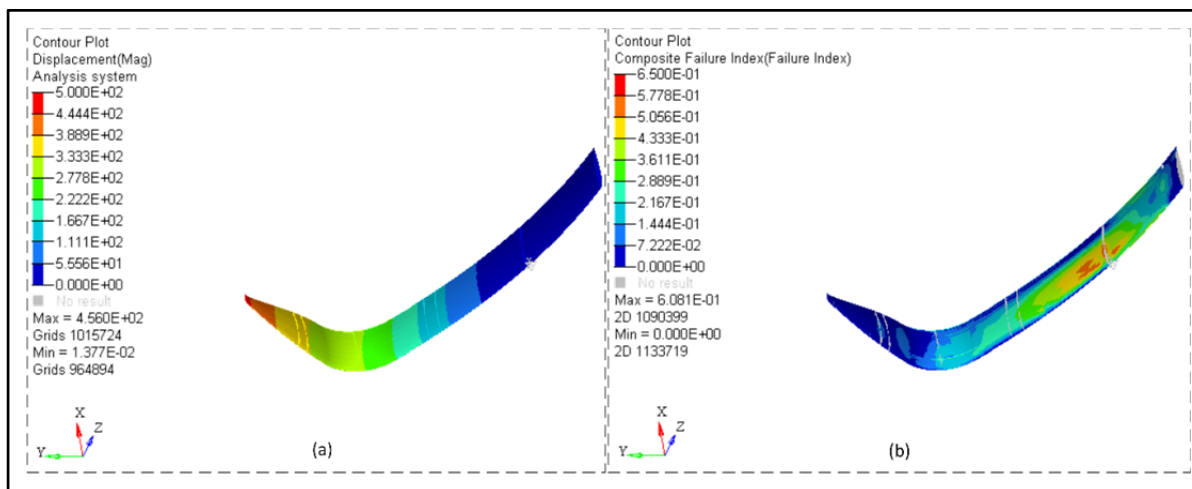


Figure 5.13 Déformation et critère de rupture composite pour le cas 2 limite;
(a) Déformation [mm]; (b) Critère de rupture composite

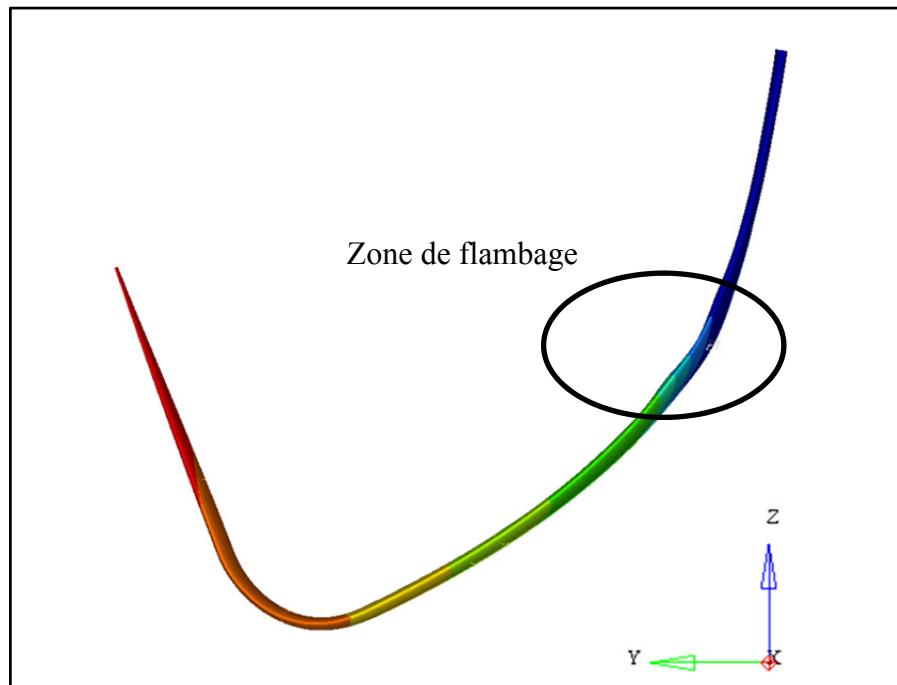


Figure 5.14 Flambage de la dérive au mode 1 – $F= 3,63$ avec une déformation multipliée par 750

5.3 Analyse des safrans porteurs

Un safran porteur est une pièce composite plus facile à fabriquer qu'une dérive portante. La méthode de fabrication en peau de carbone sans raidisseur interne est appliquée afin de respecter le cahier des charges (voir section 1.2.3). Un laminé a donc été créé selon l'expérience acquise pour la dérive portante.

Le laminé de l'aile du safran porteur, partie horizontale, n'est pas optimisé. En effet, l'épaisseur du profil étant très faible, une optimisation n'est pas nécessaire : le laminé sera composé d'un pli extérieur $\pm 45^\circ$ puis d'un pli à 0° . Au niveau de la liaison, des plis à $\pm 45^\circ$ et à 0° seront ajoutés. De plus, l'analyse ayant été effectuée sans mousse structurale, la déformation réelle sera inférieure à celle observée. L'analyse doit donc valider que le safran porteur respecte les critères de dimensionnement. Selon les charges observées dans le modèle dynamique à la section 4.3.2.6, des cas de chargements plus élevés sont testés.

5.3.1 Géométrie et maillage

Le modèle éléments finis du safran porteur est constitué des éléments (voir Figure 5.15) suivants :

- Partie 1 verticale : 43 509 éléments coques et 43482 nœuds;
- Aile du safran : 24 651 éléments coques et 24 707 nœuds;
- Liaison entre les deux parties : elle est réalisée grâce des éléments corps rigides RBE2 entre chaque élément. Un RBE2 ajoute de la rigidité (voir Figure 5.16);
- Sur la partie verticale du safran, trois zones sont à distinguer : Le bord d'attaque, le bord de fuite, et la zone centrale renforcée.

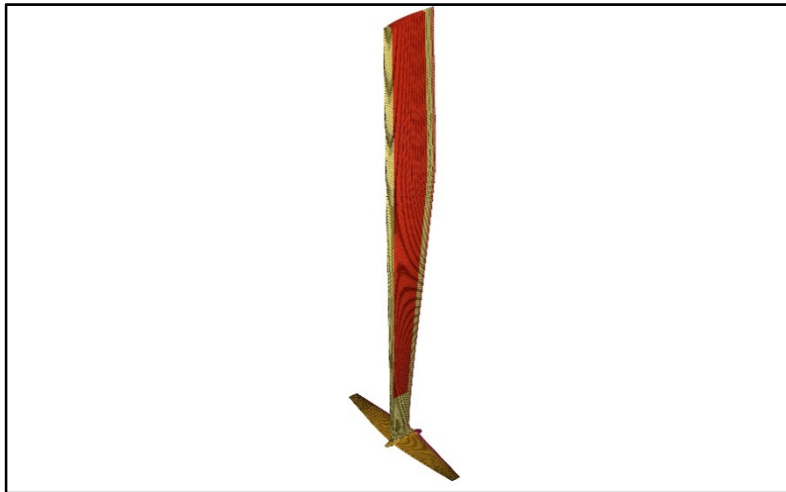


Figure 5.15 Modèle éléments finis du safran porteur

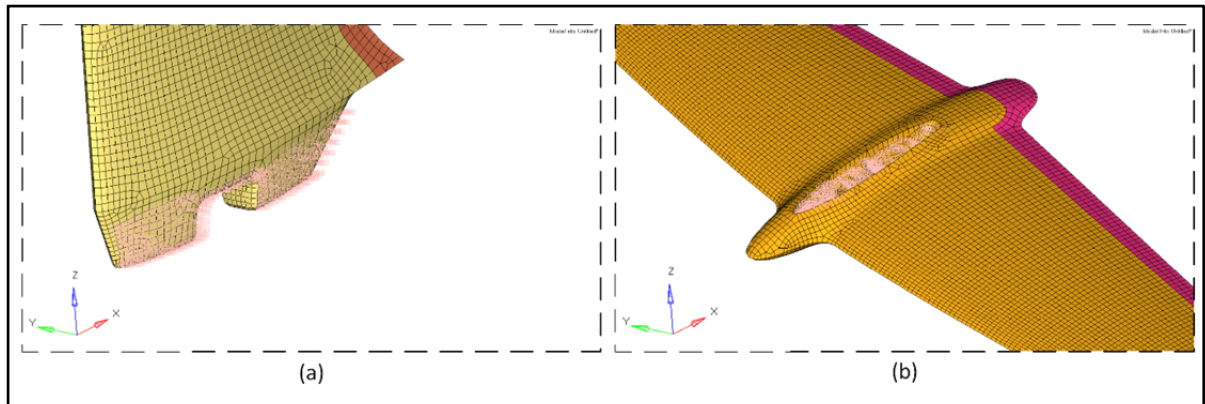


Figure 5.16 Éléments corps rigide pour la liaison entre l'aile du safran et la partie verticale

5.3.2 Conditions limites et cas de chargements

Le safran est maintenu sur la coque par un support autorisant seulement une translation verticale. Le safran est en contact avec le support dans deux zones (illustré à la Figure 5.17 b). Les nœuds de plusieurs rangés d'éléments sont alors bloqués en translation suivant les axes x et y . Afin de récupérer la charge verticale, tous les nœuds de l'extrémité de la partie 2 verticale sont immobilisés suivant l'axe z .

Selon nos hypothèses de chargement (voir section 4.3.4), les safrans porteurs doivent générer une portance égale à certains pourcentages du poids du catamaran. Selon les réglages de l'angle d'attaque des safrans, une charge verticale par safran de 550N est donc possible. Cependant, même s'il est important de prendre en compte la force verticale générée par l'aile du safran, la force la plus contraignante pour le safran est la force générée par la partie 1 et 2 verticale pour contrôler le catamaran. En effet, une force horizontale est créée en augmentant l'angle d'attaque autour de l'axe z sur les safrans (voir section 4.2.3.3). Cette force peut être supérieure à 1 000N selon la vitesse. Une charge surfacique représentative a été implémentée sur l'aile du safran et la partie 2 verticale (voir Figure 5.17 a).

La situation la plus défavorable est la phase de vol puisque la surface immergée est située proche de l'aile portante du safran et la vitesse du catamaran est élevée d'après les efforts

observés dans la section 4.3.2.6. En réalité, ces efforts devraient être moins élevés puisque la réactivité du catamaran en vol permet de limiter l'angle d'attaque sur la partie verticale des safrans porteurs. Le cas de chargement limite suivant est donc testé :

- *Forces* :
 - Force verticale de 980N;
 - Force horizontale de 1530N.
- *Critère de dimensionnement* :
 - Critère de rupture composite inférieure à 1;
 - Flèche maximale au niveau de l'aile de 160mm, soit 10% de la hauteur du safran.

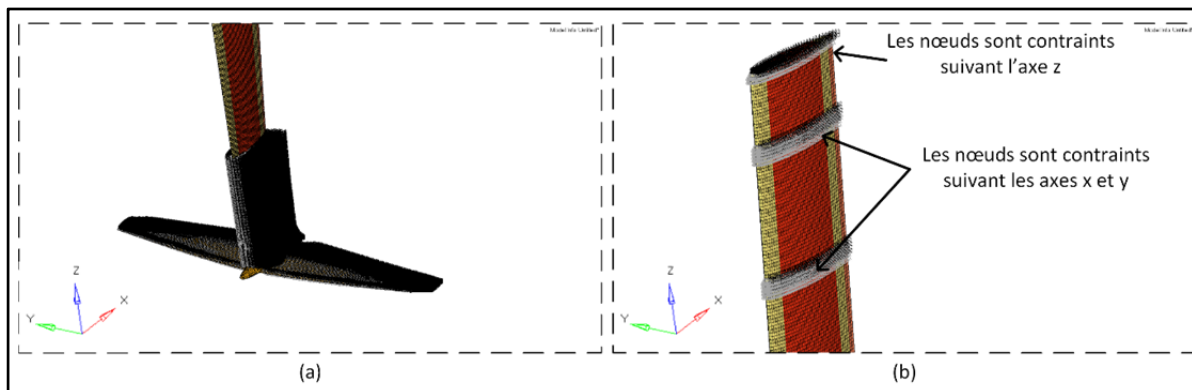


Figure 5.17 Cas de chargement et conditions aux limites du safran porteur; (a) Charge surfacique sur l'aile et la partie 2 verticale; (b) Conditions aux limites

5.3.3 Définition du laminé

Le laminé a été défini selon l'expertise acquise lors de l'optimisation de la dérive. Les points suivants ont donc été introduits directement dans le laminé :

- Éviter d'avoir plus de 4 plis identiques successifs;
- Laminé symétrique et équilibré.

Finalement, trois zones sont ainsi créées (voir Figure 5.18) dont le laminé est détaillé dans le Tableau 5.3. L'épaisseur du laminé varie entre 1,32mm (6 plis) au niveau du bord de fuite et 5,4mm (12 plis) au centre.

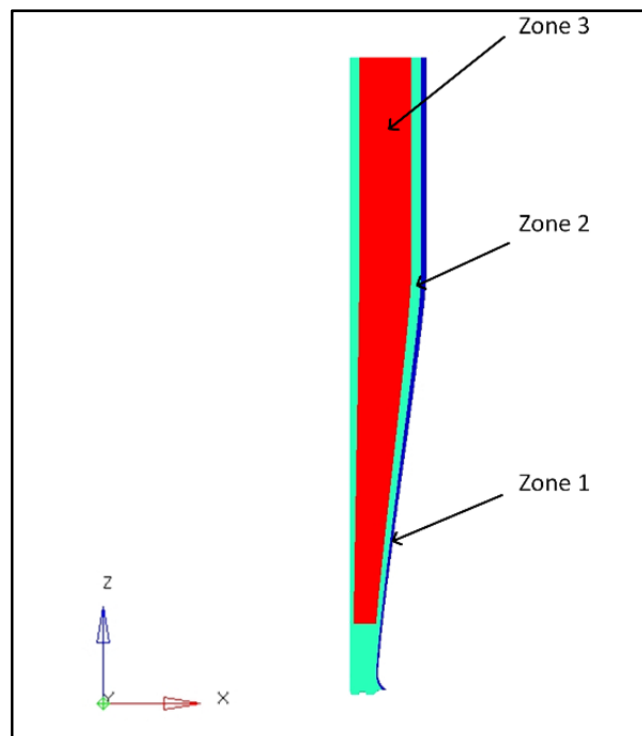


Figure 5.18 Zones du safran porteur

Tableau 5.3 Séquence d'empilement des plis pour les différentes zones du safran porteur

	ZONE ID		
PLI ID	1	2	3
1	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$
2	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
3			0°
4			0°
5	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
6		0°	0°
7		0°	0°
8	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
9			0°
10			0°
11	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
12	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$
Épaisseur [mm]	1,32	2,68	5,4

5.3.4 Analyses et validation

Pour le cas de chargement étudiée, après quelque itération afin d'optimiser le laminé de la partie verticale du safran porteur, la flèche est de 157mm (voir Figure 5.19a). Le critère de déformation est donc validé.

L'indice de rupture composite Tsai-Wu maximal est de 2,19 (voir Figure 5.19b), ce qui signifie que les plis de carbone se délaminent dans la zone rouge. Or cette zone est au niveau des conditions aux limites, c'est-à-dire que la charge sera plus répartie sur la surface en réalité. Cette zone critique n'est donc pas à considérer. L'indice de rupture maximale sur le reste du safran est seulement de 0,7, donc valide pour notre critère de dimensionnement. Pour limiter la valeur du critère de rupture pour le cas de chargement étudié, les conditions aux limites simulant la liaison avec le support auraient dû être appliquées sur un RBE3, et non directement sur les nœuds de la surface. Ainsi, la liaison aurait été moins rigide, limitant la concentration des contraintes.

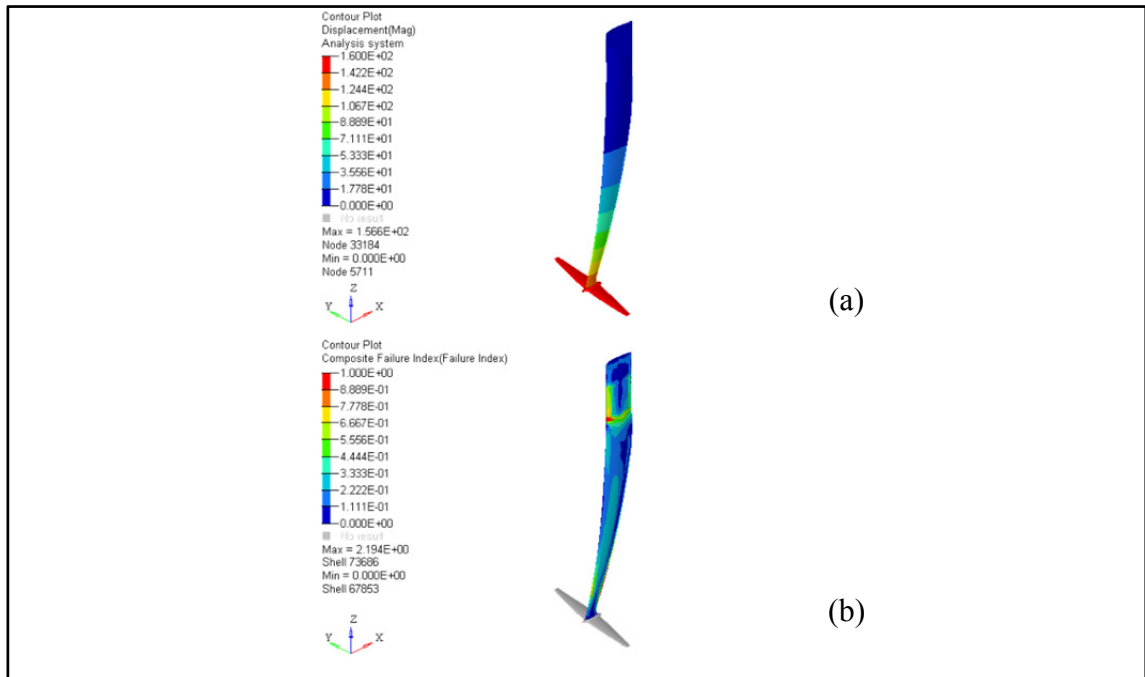


Figure 5.19 Résultats de la déformation et du critère de rupture composite safran porteur pour $F_z = 960\text{N}$ et $F_y = 1530\text{N}$; (a) Déformation [mm]; (b) Critère de rupture composite

CHAPITRE 6

FABRICATION ET ESSAIS DES HYDROFOILS

Ce dernier chapitre présente la fabrication des différents modèles et moules des *hydrofoils*. Ensuite, les observations des essais de navigation sur le catamaran ESPADON et sur le CLASS-C sont formulées.

6.1 Fabrication de pièces composites

La fabrication de pièces en composite nécessite d'avoir un ou des moules ayant une surface fonctionnelle modélisant la pièce à fabriquer. Des moules ouverts ou des moules fermés sont utilisés.

6.1.1 Types de moules

Moules ouverts

Un moule ouvert modélise la surface intérieure ou la surface extérieure de la pièce finale. Ainsi, deux catégories de moules ouverts sont à distinguer. Les moules mâles (voir Figure 6.1 a) ou les moules femelles (voir Figure 6.1 b). Ces moules ont un prix réduit comparé aux moules fermés, mais sont utilisés pour des petites productions. Ils permettent le changement d'épaisseur du laminé en tout temps, car une seule surface est fonctionnelle. Cependant, une seule surface aura donc une belle finition.

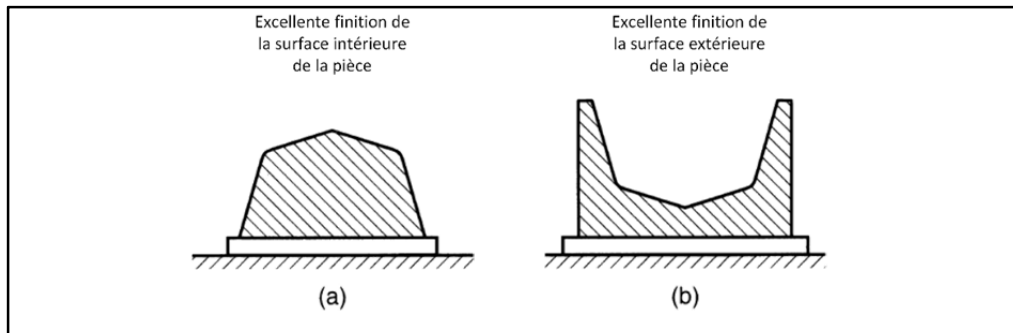


Figure 6.1 Types de moules ouverts; (a) Moule mâle; (b) Moule femelle
Adapté de Knovel et Akovalı (2001, p. 57)

Moules fermés

Un moule fermé est composé d'au minimum deux parties qui s'assemblent (voir Figure 6.5). Il est fermé hermétiquement, évitant de libérer des composés organiques volatils. En effet, l'inconvénient le plus marqué dans l'industrie est l'émission des composés organiques volatils ou de styrène (pour les composites polymériques) dans l'espace de travail (Knovel et Akovalı, 2001). Si le procédé de fabrication consiste à injecter de la résine sous pression, alors les deux parties du moule doivent être rigides (moulage par transfert de résine). Sinon, une des parties du moule peut être souple. Ces moules sont utilisés pour des séries de production moyenne, car leurs prix sont plus élevés que celui des moules ouverts.

6.1.2 Procédés de fabrication

Cette section décrit seulement les procédés de fabrication de pièces composites les plus utilisés dans le domaine nautique.

Compaction manuelle

L'imprégnation manuelle de la fibre composite par la résine est le procédé de pièce composite le plus ancien. Les premières étapes sont la préparation du moule, soit l'application d'un agent démoulant, et selon les besoins, d'une couche de gel coat (voir Figure 6.2 (1) et (2)) ensuite, elle consiste à appliquer la fibre sèche (dans ce cas, la fibre est imprégnée une fois sur le moule) ou de la fibre pré-imprégnée de résine sur le moule (voir Figure 6.2 (3)). Ensuite, pour enlever les bulles d'air et compacter le laminé, le passage d'un

rouleau est fait (voir Figure 6.2 (3)). Enfin, la résine catalysera soit sous l'effet de chaleur, soit sous l'effet du temps (voir Figure 6.2 (4)). Au final, quand la résine est catalysée, il suffit de retirer la pièce finale (Knoval et Akovali, 2001, p. 58).

Les avantages de ces méthodes sont :

- Prix réduit, car pas de consommable pour une pièce;

Les inconvénients sont :

- La compaction manuelle au rouleau ne permet pas d'avoir un rapport volumique fibre/matrice élevé (le rapport est autour de 30%);
- Long temps de fabrication, donc procédé utilisé pour des prototypes ou très faible production;
- Temps d'application limité par le temps de polymérisation.

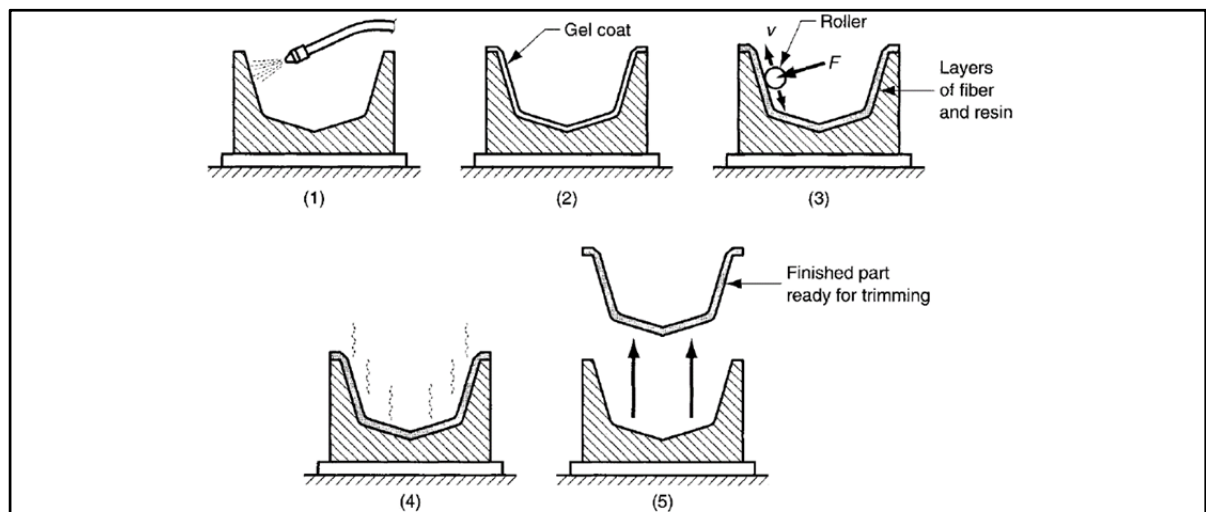


Figure 6.2 Procédé de fabrication manuel; (1) Vaporisation du démoulant; (2) Application d'un Gel coat; (3) Compaction de la fibre imprégnée; (4) Polymérisation; (5) Démoulage
Tiré de Knoval et Akovali (2001, p. 59)

Compaction sous vide

Afin d'augmenter le rapport fibre/matrice et la résistance du laminée, il est avantageux de faire une meilleure compaction. Cependant, l'augmentation du nombre de consommables utilisés rend le procédé plus coûteux (Knoval et Akovali, 2001).

Ainsi, le début du procédé reste le même que précédemment (voir Figure 6.3). Le laminé imprégné de résine est appliqué sur la surface du moule préalablement enduit d'un agent démoulant. Ensuite un tissu d'arrachage (*peel ply*) est déposé sur la fibre afin de pouvoir retirer tous les consommables facilement. Un film siliconé (*release film*) perforé est ensuite placé pour pouvoir séparer les consommables. Afin d'absorber le surplus de résine, un tissu absorbant (*bleeder fabric*) est ajouté. Au final, le sac à vide est ajouté, il est directement relié à une pompe à vide, et ses extrémités sont rendues étanches grâce à un joint. (Knovali, 2001).

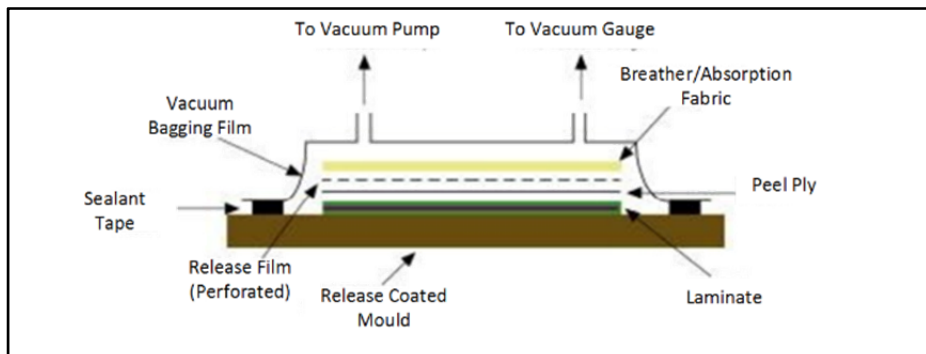


Figure 6.3 Procédé d'une compaction sous vide
Adapté de NetComposites (2015b)

Infusion

L'infusion est un procédé proche de la compaction à vide, cependant la fibre est posée sèche. La Figure 6.4 décrit les étapes principales pour faire une infusion (NetComposites, 2015a). Ainsi, la fibre sèche est déposée sur le moule, le tissu d'arrachage (*peel ply*) est placé sur la fibre, suivi du média d'infusion (*resin distribution fabric*). Pour finir, le sac à vide (*vacuum bag*) est posé sur le moule, fermé par des rubans d'étanchéité (*sealant tape*). Des tuyaux spiralés sont utilisés pour le vide et l'arrivée de la résine. Au final, la résine est aspirée vers le tuyau spiralé où le vide est contraint. Elle se diffuse donc dans la fibre grâce au média d'infusion. Le nombre de consommable rend le procédé couteux.

Les avantages de l'infusion sont les suivants (Schubel, 2010) :

- Rapport volumique fibre/matrice entre 0,4 et 0,6;
- Répétabilité;
- Temps de travail avec la fibre sèche :
- Pas d'exposition aux volatiles.

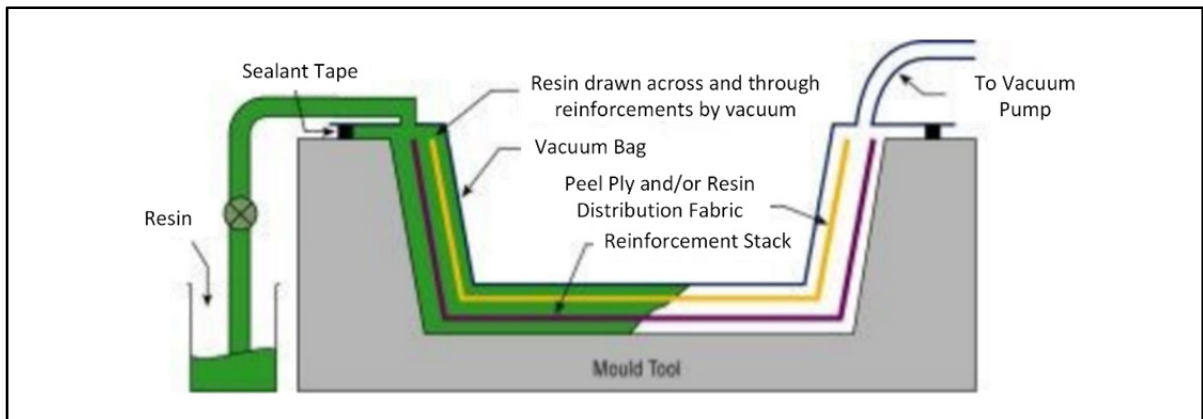


Figure 6.4 Procédé d'infusion d'une pièce en composite
Tiré de (NetComposites, 2015a)

Light resin transfer molding (LRTM)

Le procédé *LRTM* utilise un moule en deux parties. La première partie appelée base est rigide, alors que la deuxième partie est flexible (Hutchinson, Schubel et Said, 2014) (voir Figure 6.5). La différence de pression créée par le vide lie les deux parties du moule tout en aspirant la résine. La technicité des moules rend l'outillage plus coûteux que pour les simples moules ouverts, cependant le nombre de pièces réalisables avec les mêmes moules est élevé et la diminution du nombre de consommables réduit les coûts de production à long terme (Hutchinson, Schubel et Warrior, 2011). Les avantages sont les suivants (CW, 2015) :

- Haute productivité;
- Facilité de mise en œuvre;
- Améliore les conditions de sécurité;
- Les surfaces intérieures et extérieures sont de qualités.

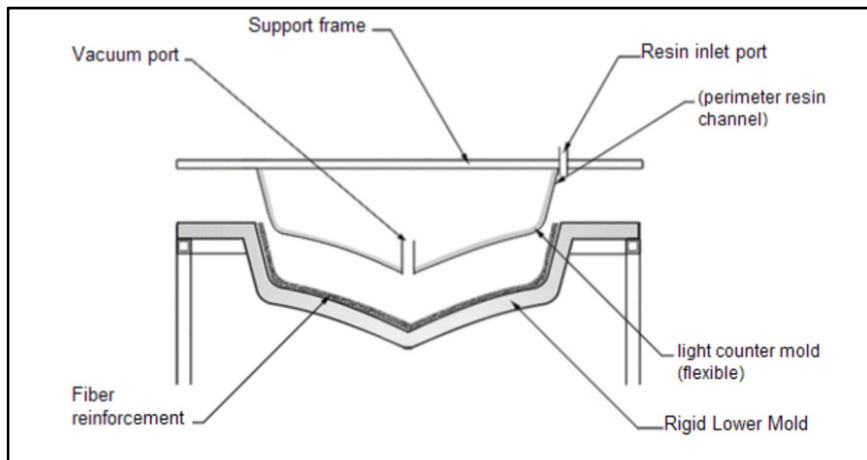


Figure 6.5 Procédé *LRTM*
Tiré de AOC (2015)

6.2 Modèles et moules de la dérive portante et des safrans porteurs

Cette section présente les étapes de la fabrication des différents modèles et moules qui ont permis de fabriquer les pièces finales.

6.2.1 Procédé de fabrication utilisé pour les *hydrofoils*

Selon le cahier des charges, les modèles mâles sont fabriqués dans l'optique de réaliser les pièces finales par *LRTM* selon les directives de MC (voir Figure 6.6). Afin de limiter les détails sur les modèles en plâtres (difficiles à réaliser), la zone du réservoir à vide et la zone pour le joint d'étanchéité-résine ne sont pas inclus aux moules. Des éléments seront ajoutés sur la surface avant de réaliser le moule femelle en fibre de verre/époxy.

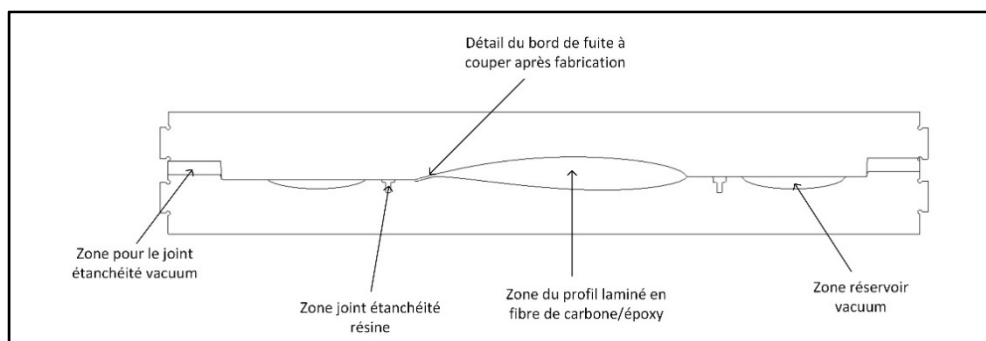


Figure 6.6 Section de l'assemblage de moules *LRTM*

6.2.2 Modèles et moules des dérives portantes

Modèles mâles en plâtre

Les structures en acier des modèles ont été conçues grâce au logiciel Catia V5 (voir Figure 6.7). Ensuite, les différentes pièces ont été soudées au *MIG* (*metal inert gas*) (voir Figure 6.8).

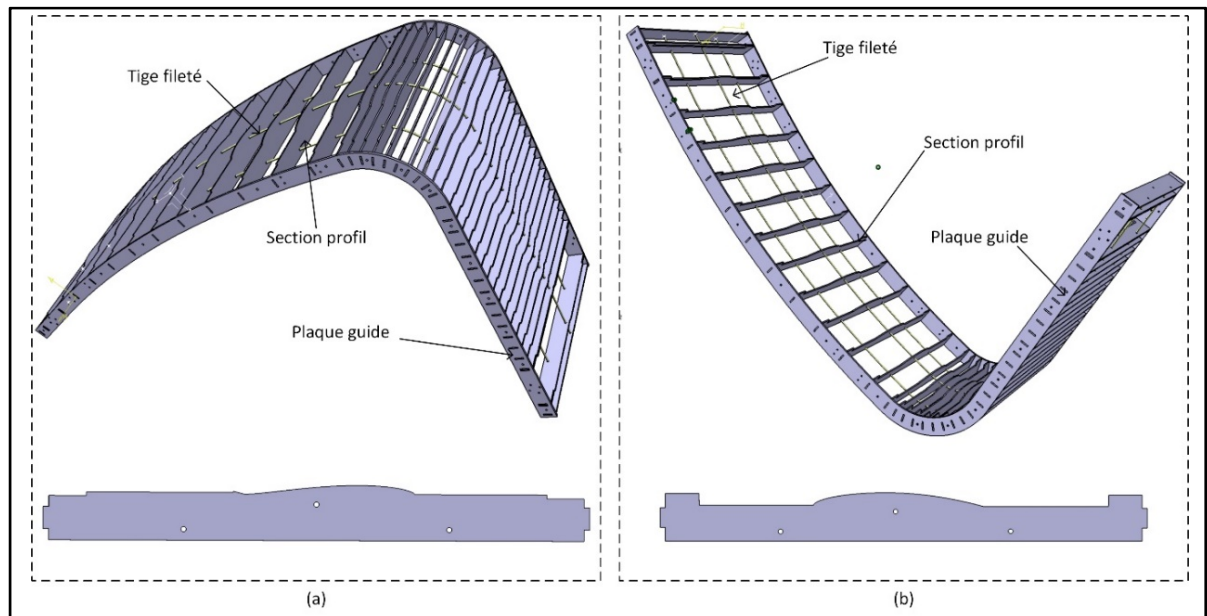


Figure 6.7 Modèles mâles en structure d'acier des dérives portantes; (a) Modèle intrados; (b) Modèle extrados



Figure 6.8 Structure en acier des modèles mâles de la dérive portante; (a) Soudage; (b) Modèle de l'extrados

Les modèles mâles en plâtre sont présentés à la Figure 6.9 (a) et (b). Ces deux modèles permettent de fabriquer les moules pour la dérive portante tribord. Une couche de résine scellante a été appliquée enfin de sceller et améliorer la finition de la surface (voir Figure 6.9 c).

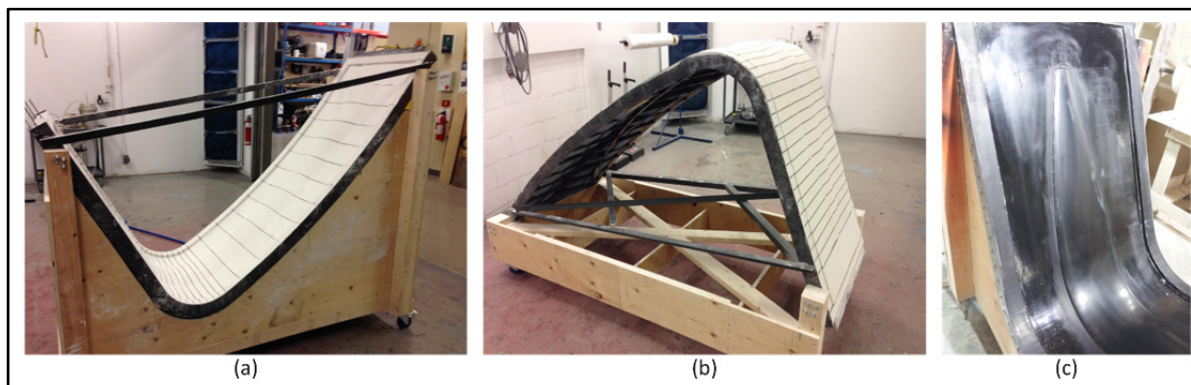


Figure 6.9 Modèles de la dérive portante tribord; (a) Extrados; (b) Intrados; (c) Modèle avec résine scellante sablée et polie

Moules de la dérive portante tribord

Les moules femelles en fibre de verre/époxy sont présentés dans la Figure 6.10.

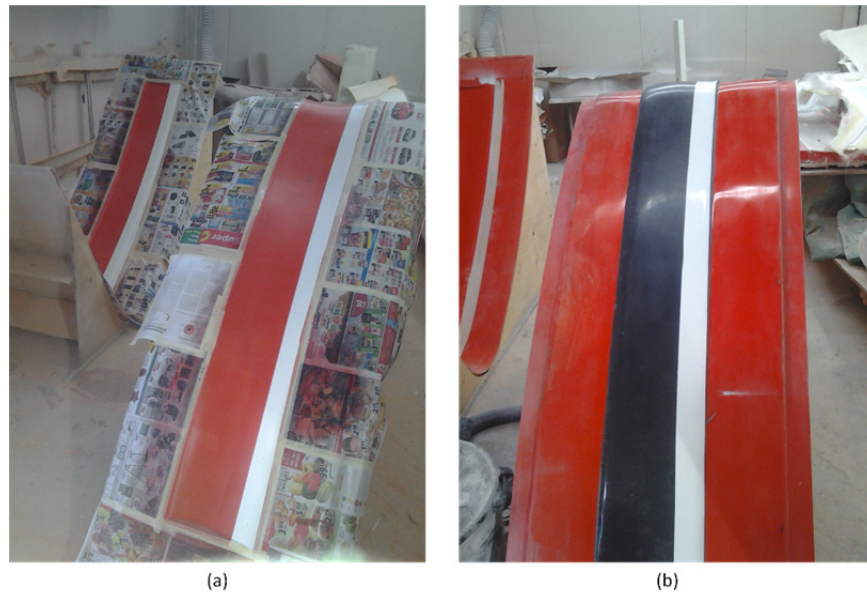


Figure 6.10 Moules femelles ; (a) Moules; (b) Dérive portante tribord dans son moule

6.2.3 Modèles et moules des safrans porteurs

Cette section présentera les modèles et les moules des safrans porteurs.

Modèle de la partie verticale

Les safrans porteurs sont constitués de deux parties. Les modèles mâles pour la partie verticale sont usinés dans deux blocs d'aluminium. La face supérieure et la face inférieure sont usinées telles que présentées sur les CAO de la Figure 6.11. Les modèles réels et les moules sont présentés respectivement dans la Figure 6.12.

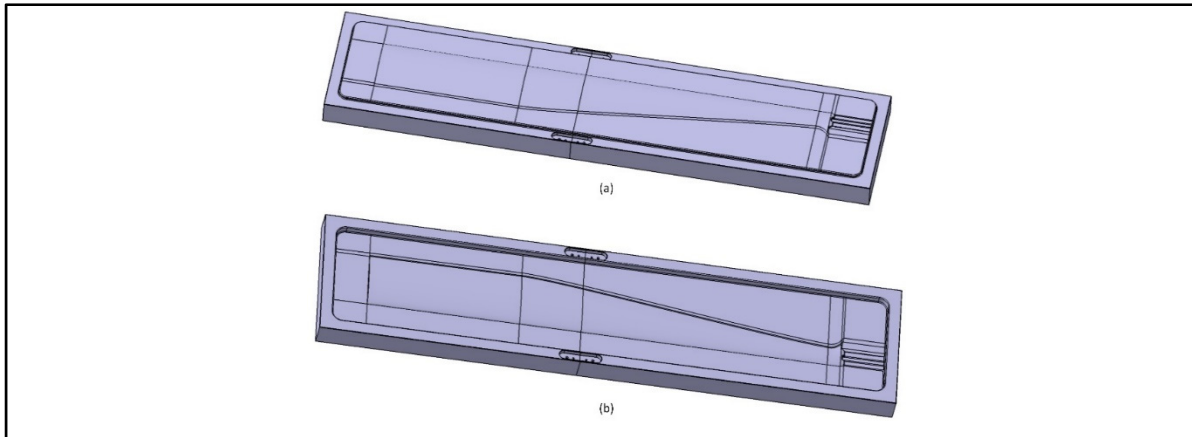


Figure 6.11 CAO des modèles mâles de la partie verticale du safran porteur; (a) Vue de dessus; (b) Vue de dessous

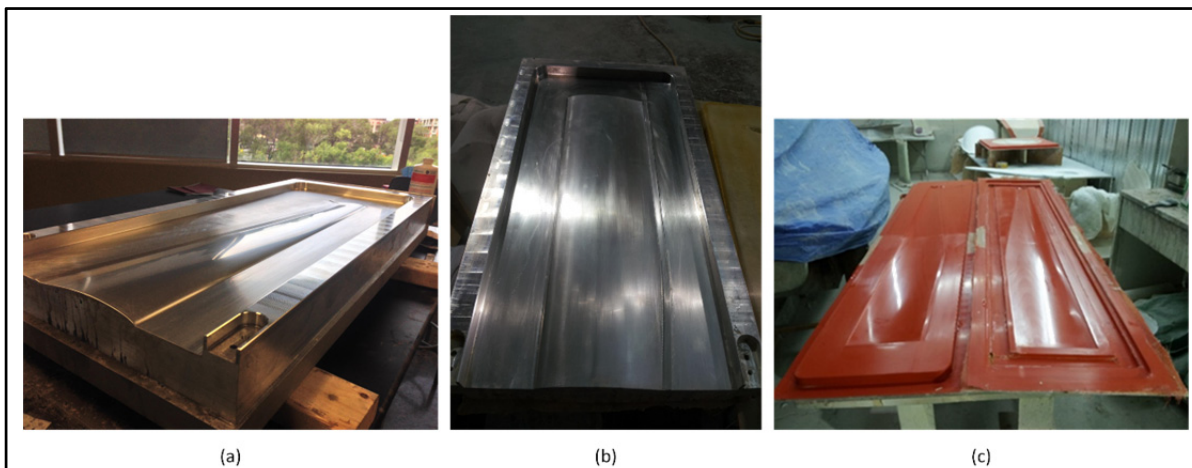


Figure 6.12 Modèles mâles en aluminium de la partie verticale du safran porteur;
(a) Partie 2; (b) Partie 1; (c) Moules finaux

Moules de l'aile du safran

Les moules femelles de l'aile du safran ont directement été usinés dans la masse. Le moule de la partie extradados (voir Figure 6.13 a) s'assemble directement avec le moule de la partie intrados (voir Figure 6.13 b). Les moules réels sont présentés dans la Figure 6.14.

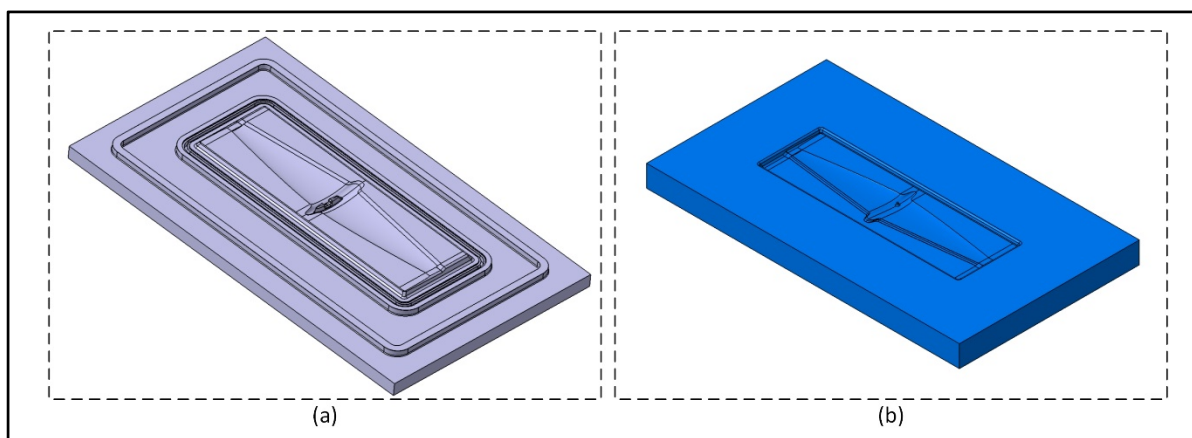


Figure 6.13 CAO des moules femelles de l'aile du safran porteur;
(a) Moule extrados; (b) Moule intrados

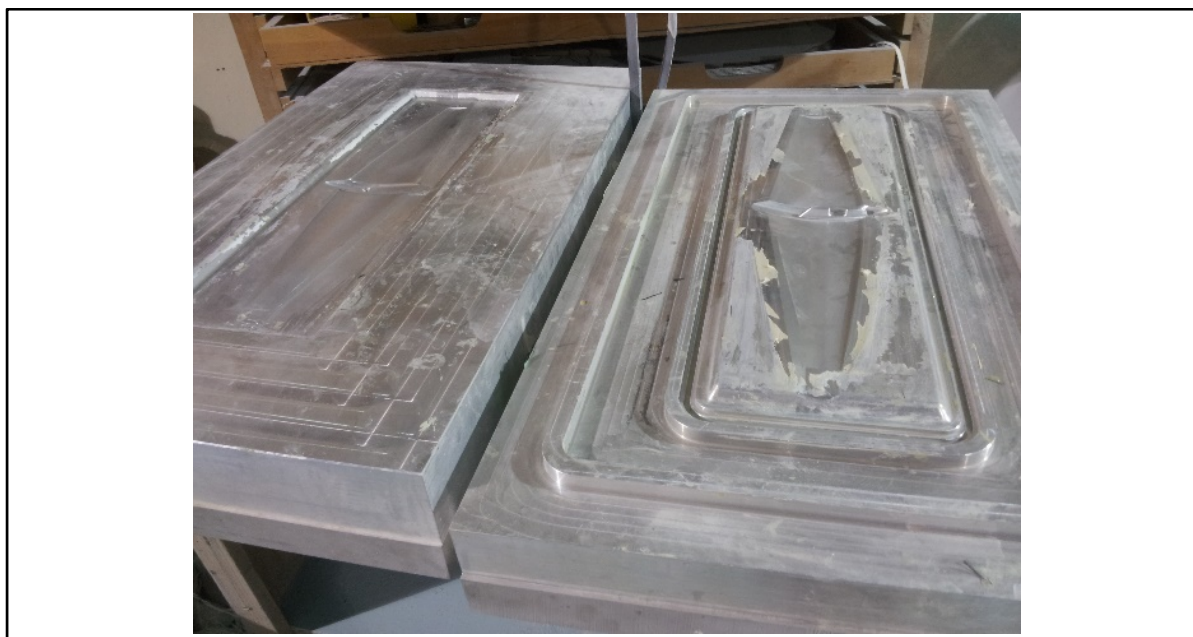


Figure 6.14 Moules femelles en aluminium de l'aile du safran porteur

6.3 Essais des *hydrofoils*

Cette section présente les essais des *hydrofoils* sur l'ESPADON 20 et sur le CLASS-C. Les observations effectuées pendant ces essais et les recommandations seront ensuite formulées.

6.3.1 Premiers essais sur l'ESPADON 20

La dérive portante tribord et une paire de safrans porteurs ont été testées en novembre 2014. L'ESPADON 20 a été modifié pour être utilisé avec des *hydrofoils* (voir Figure 6.15).

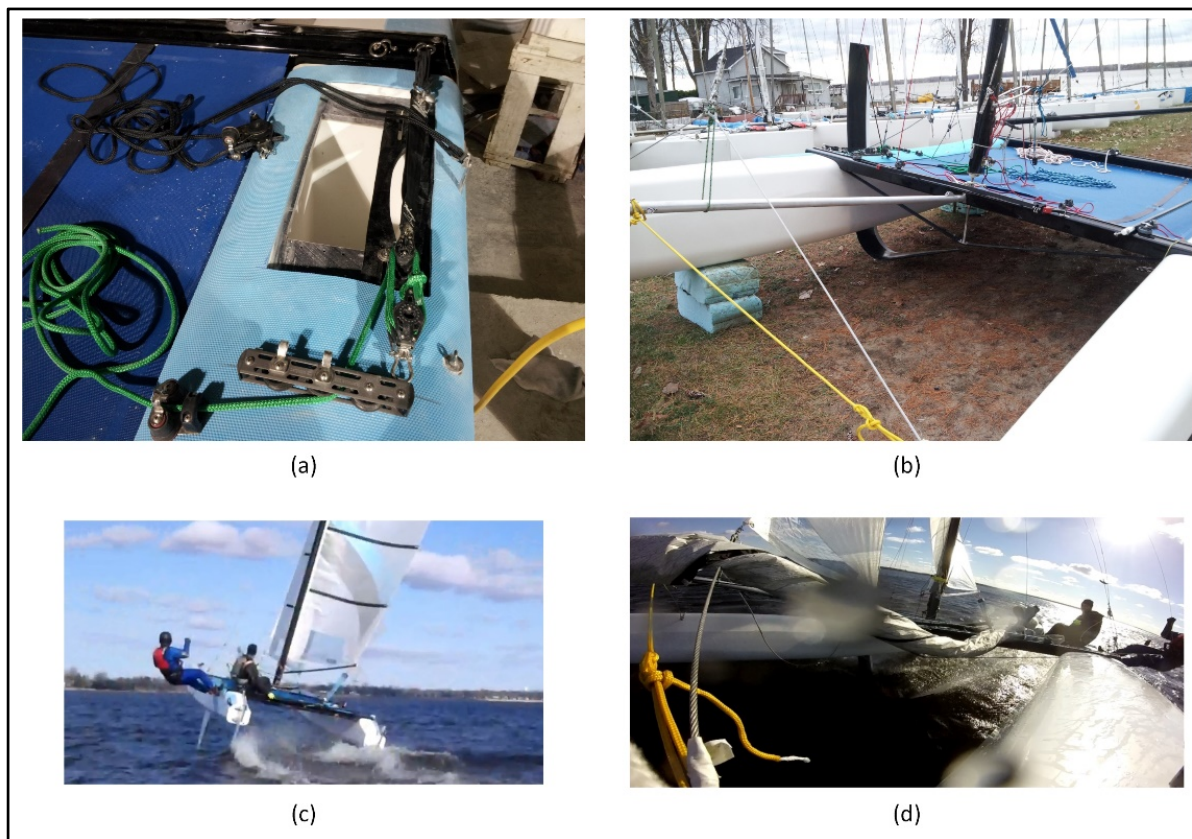


Figure 6.15 Premiers essais au Lac des Deux Montagnes (Québec) sur l'ESPADON 20; (a) Puits de dérive; (b) ESPADON préparé; (c) et (d) Premiers vols

Lors de cet essai, le catamaran a décollé aux vitesses souhaitées, c'est-à-dire lorsque la vitesse du catamaran était entre 12 et 15 nœuds. Les prédictions du modèle SM sont correctes pour l'ESPADON. De plus, la dérive portante tribord utilisée pendant l'essai n'a subi aucun dommage structural, validant ainsi le laminé.

Pendant la navigation, les safrans porteurs étaient trop souples, la déformation du safran a entraîné la séparation des deux peaux en composite au niveau du joint de collage. Ce problème a été causé par un défaut de la fabrication. De plus, pendant la dernière phase de vol, les ailes des safrans se sont arrachées des parties verticales alors que la force de l'aile du safran poussait vers le bas. Le boulon d'assemblage liant l'aile à la partie verticale avait alors arraché la partie basse de cette zone. Cependant, l'étude du dommage a montré que le boulon était visé seulement dans la résine, car la fibre de carbone n'était pas bien placée dans cette zone. Les corrections ont été apportées pour remédier à ces problèmes de fabrication.

6.3.2 Essais sur le CLASS-C

La grande différence entre le CLASS-C et l'ESPADON est au niveau de la performance. En effet, le catamaran CLASS-C est plus rapide dans des vents faibles. La première période d'essais s'est déroulée sur le Lac Saint-Louis (Québec). Le système complet, c'est-à-dire, la paire de dérives et de safrans y ont été testées. Il est à noter que le puits de dérive du catamaran CLASS-C n'a pas pu permettre de varier l'angle de *cant* θ pendant la navigation. La position réglée était un compromis entre un angle de *cant* θ faible, performant au près, et un angle de *cant* θ élevé, performant au grand large. Malgré cette limitation, le CLASS-C volait alors facilement sur la dérive tribord (voir Figure 6.16). Cependant, la dérive bâbord était flexible, rendant le décollage difficile et le vol instable pour cette dérive. Suite à une discussion avec MC, ce manque de rigidité a été expliqué par le fait qu'une mousse structurale différente a été utilisée pour la dérive tribord. La dérive bâbord est plus légère, mais sa flexibilité est contraignante. Aucune configuration précise n'a été testée par manque de temps et avec les conditions de vents limitées. Cependant, un angle d'attaque α de 2° sur

les safrans porteurs a facilité le décollage du catamaran dans des conditions de vents apparent inférieur à 10 nœuds.



Figure 6.16 Vol du catamaran CLASS-C au Lac Saint-Louis (Québec)

La deuxième période des essais s'est déroulée sur le Lac Léman, à Genève (Suisse) pendant la LC. Les deux semaines de navigation quotidienne (voir Figure 6.17) ont permis de prendre du recul sur le développement, la conception, et la fabrication des *hydrofoils*. Ainsi, suite aux essais, les analyses suivantes ont été faites :

- Effet de l'angle de *cant* θ de la dérive portante :
 - Le comportement des *hydrofoils* expliqué à la section 3.1.3 est observé pendant la navigation;
 - Au près, sans la possibilité de régler l'angle de *cant*, un angle de *cant* moyen a été utilisé. Or, cet angle fixe ne permet pas de remonter rapidement au vent, car le bateau dérive. La partie de la dérive générant la force antidérive n'est donc pas assez verticale, limitant la composante antidérive horizontale.
- Décollage :
 - Au près, il est impossible de décoller. En effet, la force antidérive étant faible due à un angle de *cant* θ moyen, le catamaran dérive beaucoup. Or, comme expliquée à la section 3.1.3.1, la dérive réduit la force de portance. Il faut donc limiter la dérive du catamaran pour espérer voler au près;
 - Au grand largue, le catamaran décolle facilement.à

- Fabrication des dérives portantes :
 - La dérive bâbord ayant une mousse structurale moins dense est trop flexible. Cette flexibilité empêche le décollage à la vitesse prévue. En effet, lorsque le catamaran est sur le point de décoller, la géométrie de la dérive se déforme, réduisant la portance;
 - La dérive tribord, rigide, permet un décollage rapide.
- Fabrication des safrans porteurs :
 - Suite à une discussion avec Martin Fisher, concepteur d'*hydrofoils* reconnu, le profil à utiliser sur l'aile du safran doit être symétrique. Le safran doit agir tels les ailerons de la queue d'un avion afin de stabiliser le vol. Ils devront alors soit générer une force verticale positive, soit une force verticale négative pour stabiliser le catamaran selon les conditions et allures. Cette force de portance n'est donc pas utilisée pour porter un pourcentage de la masse du catamaran;
 - La rigidité des safrans est essentielle pour la navigation.



Figure 6.17 Vol du catamaran CLASS-C au lac Léman (Suisse)

Recommandations

Suite à toutes ces différentes analyses, et à la discussion avec Martin Fisher, les points suivants sont à prendre en compte pour améliorer la conception des *hydrofoils* :

1. La vitesse de décollage d'un catamaran sur *hydrofoils* doit être déterminée par rapport à la coque. En effet, la trainée d'une coque augmente au carré de la vitesse du catamaran. Ainsi, pour une coque, lorsque la vitesse augmente, le rapport de la poussée d'Archimède par rapport à la trainée décroît rapidement, car la poussée d'Archimède est constante. Le rapport L/D d'une dérive portante est compris entre 15 et 20 (Martin Fisher). La vitesse de décollage est donc déterminée par l'intersection des deux courbes (voir Figure 6.18). En résumé, à basse vitesse, pour une portance égale, la trainée des coques est inférieure à la trainée de la dérive portante; à vitesse élevée, la trainée de la dérive portante est moins élevée que la trainée des coques. En générale, cette vitesse de décollage est entre 10 et 20 nœuds. Une étude CFD de la coque et de la dérive est donc nécessaire pour comparer leurs trainées et déterminer la vitesse de décollage optimale. Ainsi, cette vitesse de décollage définit la surface portante nécessaire à la dérive portante pour décoller à la vitesse souhaitée;
2. Le cas de chargement à utiliser sur la dérive portant doit prendre en compte le poids total du catamaran avec équipage, et la force verticale générée par l'aile lorsque le catamaran gîte. Pour ce cas, la flèche doit être limitée au maximum en bout d'aile, et non au niveau du coude.
3. Un modèle statique complet du catamaran doit être utilisé pour étudier l'équilibre du catamaran grâce à la connaissance des efforts détaillés de chaque élément. Pour cela, la position de l'équipage doit être fixe vers le centre du catamaran et assis sur la coque. En effet, la masse de l'équipage ne doit être utilisé pour équilibrer le catamaran pendant la phase de développement puisque on veut limiter le déplacement de l'équipage sur la catamaran;

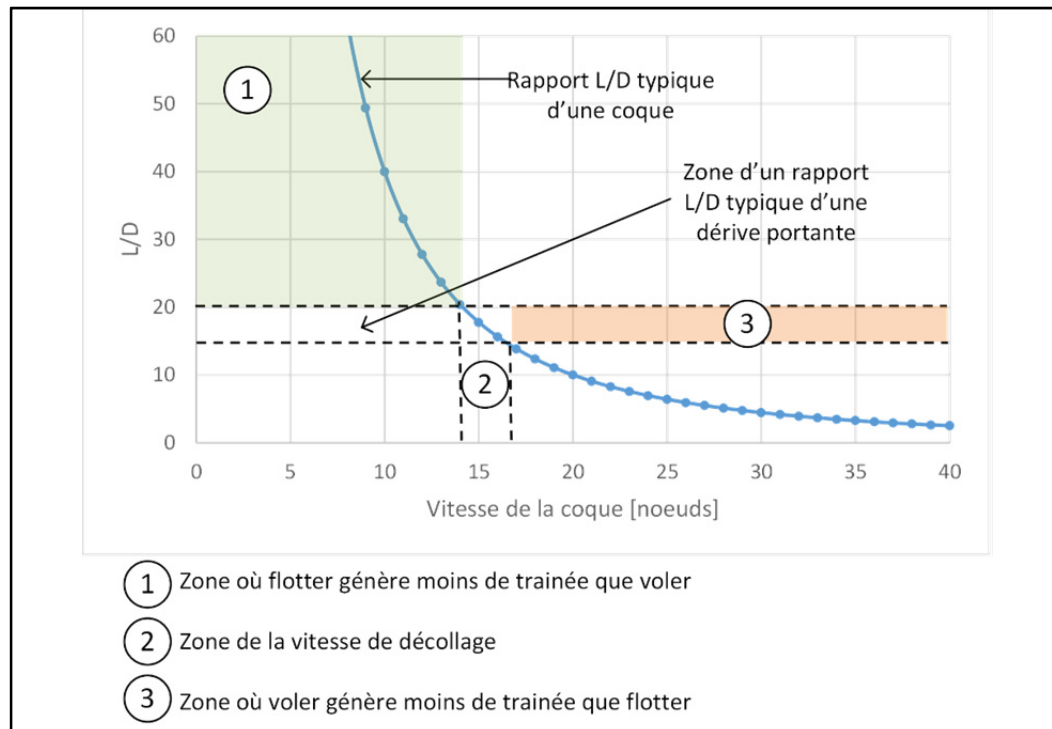


Figure 6.18 Choix de la vitesse de décollage pour une coque avec *hydrofoils*

CONCLUSION

En conclusion, les travaux de ce mémoire ont permis la conception et la fabrication d'un système d'*hydrofoils* pour faire voler un catamaran de sport de 20 pieds. L'objectif était de concevoir et fabriquer ces *hydrofoils* en développant un outil de conception simple et rapide. Une méthodologie complète est alors proposée pour développer des *hydrofoils*.

La première partie de ce mémoire a permis de sélectionner de la géométrie préliminaire de la dérive portante et des safrans porteurs grâce une étude qualitative de l'influence de la géométrie des *hydrofoils* sur la stabilité du catamaran. Les influences du déplacement latéral du catamaran en navigation, de la profondeur de la dérive et de son inclinaison de *cant* θ sont ainsi décrites. La géométrie dite en J est alors retenue pour l'étude grâce à sa stabilité et son adaptabilité aux situations de navigation.

La deuxième partie fut le développement et l'exploitation d'un modèle SimMechanics simulant le comportement dynamique du catamaran. Ce modèle permet d'évaluer simplement et rapidement la vitesse de décollage, la stabilité du catamaran et les efforts hydrodynamiques en fonction de la géométrie des *hydrofoils* et des caractéristiques du catamaran. Ainsi, l'utilisation des formules hydrodynamiques élémentaires permet un gain de temps dans la comparaison des différentes géométries par rapport aux études détaillées CFD.

Une fois la géométrie des *hydrofoils* déterminée, la troisième partie fut l'optimisation structurale des *hydrofoils* en trois étapes. L'objectif était de minimiser la masse tout en respectant des contraintes d'optimisation. Les contraintes sur la déformation maximale, l'indice de flambage et l'indice de rupture furent utilisés pour garantir l'intégrité de la structure des *hydrofoils*. La première étape fut l'optimisation dimensionnelle libre permettant d'obtenir la répartition de l'épaisseur du laminé et les zones les plus sollicitées pour les cas de chargement de vol courant et limite. Ensuite, l'optimisation dimensionnelle détermina précisément les épaisseurs de plis dans les différentes zones de conception. Finalement, la

forme des plis fût simplifiée et leur empilement fut optimisé afin de respecter les règles de fabrication de pièces composites.

La dernière étape consista à fabriquer et tester les *hydrofoils* sur un catamaran de sport québécois (ESPADON 20) fabriqué par Mystere Composites et sur un catamaran CLASS-C fabriqué par les étudiants de l'ÉTS. Ces essais permirent de valider le comportement et la structure des *hydrofoils*.

Finalement, le modèle SimMechanics développé et la méthode d'optimisation réalisée au cours de ce projet de recherche ont contribué à la vulgarisation du comportement d'un catamaran sur *hydrofoils* et à l'avancement de la méthodologie de conception rapide d'*hydrofoils*. Les résultats ont également démontrés que le modèle SimMechanics est en mesure de prédire globalement le comportement sur hydrofoils. La prochaine section présentera les recommandations qui pourraient améliorer les performances du modèle SM, la structure et la fabrication des *hydrofoils*.

RECOMMANDATIONS

Pour la suite des travaux, il serait souhaitable que les *hydrofoils* fabriqués soient testés structurellement sur un banc d'essai pour des cas de chargement dynamique fournis par une étude CFD de la géométrie finale. Ainsi, les résultats obtenus par le modèle SimMechanics (SM) et par l'étude CFD pourraient être validés par les résultats expérimentaux.

Dans un premier temps, étant donné qu'il y a que peu de littérature scientifique traitant des *hydrofoils*, il serait intéressant de :

1. Réaliser une étude hydrodynamique CFD de différentes géométries d'*hydrofoils* afin de quantifier l'influence et la dépendance entre les différentes variables de conception;
2. Comparer les performances d'un *hydrofoil* possédant des profils 2D différents entre la partie verticale de l'*hydrofoil* et son aile afin d'optimiser la force antidérive par rapport à la force de portance;
3. Comparer les performances d'un *hydrofoil* possédant des profils 2D différents le long de son aile, avec l'ajout d'une ailerette à sa terminaison afin de limiter la trainée de cette partie;
4. Réaliser l'étude hydrodynamique d'un *hydrofoil* ayant une rugosité en surface différente afin de déterminer le sablage optimale.

Du point de vue de modèle SM, l'évolution du module SimMechanics de MATLAB permet d'acquérir toujours plus de données. Il est alors possible de dimensionner tous les éléments du catamaran grâce aux efforts acquis par le modèle. Il serait donc intéressant de :

1. Améliorer le comportement du catamaran grâce à l'implémentation d'efforts détaillés engendrés par l'aile rigide afin d'atteindre un équilibre statique permanent;
2. Améliorer le comportement du catamaran grâce à l'implémentation de la trainée réelle des coques utilisées afin de déterminer la vitesse exacte de décollage ciblée;

3. Définir de façon approfondie toutes les caractéristiques du catamaran afin de pouvoir simuler la dérive du catamaran et ainsi l'influence de la dérive sur les performances;
4. Réaliser l'étude des efforts statiques dans toutes les liaisons du catamaran afin d'utiliser le modèle SM pour dimensionner toutes les liaisons du catamaran;
5. Implémenter la déformation de l'*hydrofoil* causée par les efforts hydrodynamiques dans le modèle SM afin de prendre en compte la variation du comportement hydrodynamique de la dérive portante déformée;

De plus, du point de vue de l'optimisation structurale d'un *hydrofoil*, il serait avantageux d'étudier le gain de l'ajout d'un raidisseur (plusieurs sections à tester) sur la rigidité de l'*hydrofoil* et sa masse.

Ces recommandations proposées ont pour objectifs d'améliorer les outils de conceptions d'*hydrofoils* et leurs conceptions.

ANNEXE I

DÉFINITION DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE SUR UN PROFIL ET UNE AILE FINIE

Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds Re est un des indicateurs principaux en mécanique des fluides. Il distingue les écoulements laminaires des écoulements turbulents. Généralement, un faible Re , représente un écoulement laminaire (forces visqueuses prédominantes et forces d'inertie négligeables), alors qu'un Re élevé décrit un écoulement turbulent (forces d'inertie prédominantes et forces visqueuses négligeables) (Munson, Young et Okiishi, 1998). Un Re est considéré bas quand il est inférieur à 10^6 . Re dépend de la masse volumique du fluide ρ , sa vitesse d'écoulement U_∞ , la longueur caractéristique L_c du corps et de la viscosité dynamique du fluide μ (voir équation (A-I.1))

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_c}{\mu} \quad (A-I.1)$$

Nombre de Froude

Le nombre de Froude Fr est un autre indicateur important en mécanique des fluides. Il caractérise le rapport entre l'énergie cinétique des particules du fluide et l'énergie potentielle gravitationnelle, c'est-à-dire l'agitation des particules d'un fluide créée par le déplacement d'un objet dans ce fluide. Cet indicateur est principalement utilisé pour comparer et étudier la trainée de vagues générée par une coque (voir section 2.3.2.2). Fr dépend de la vitesse de l'écoulement du fluide U_∞ , la longueur caractéristique L_c du corps dans le fluide et l'accélération gravitationnelle g (voir équation (A-I.2))(Munson, Young et Okiishi, 1998).

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{g * L_c}} \quad (A-I.2)$$

Caractérisation d'un profil à deux dimensions (2D)

La première étape dans la conception d'un élément en mouvement dans un fluide est de définir son ou ses profils. De manière générale, un profil génère de la portance L et de la trainée D . Les profils sont caractérisés par leur corde c (distance linéaire entre le bord d'attaque et le bord de fuite) et par son épaisseur maximale t (généralement défini en pourcentage de la corde). Pour un profil asymétrique, sa cambrure h_c (distance entre la ligne de corde et la ligne neutre du profil appelée ligne de cambrure) et la position de sa cambrure maximale sont définies (voir Figure-A I-1). Il existe des regroupements de profils tels que les profils NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), Eppler et d'autres selon la forme et la plage du nombre Reynolds. La portance L du profil augmente quand l'angle d'attaque α (ou l'angle d'incidence) augmente. Afin de maintenir l'écoulement du fluide le long du profil, il faut respecter une certaine plage d'angles d'attaque. En effet, à hauts angles d'attaque, le fluide ne peut pas suivre la forme du profil, c'est le phénomène de décrochage. L'angle d'attaque maximale dépend alors du profil.

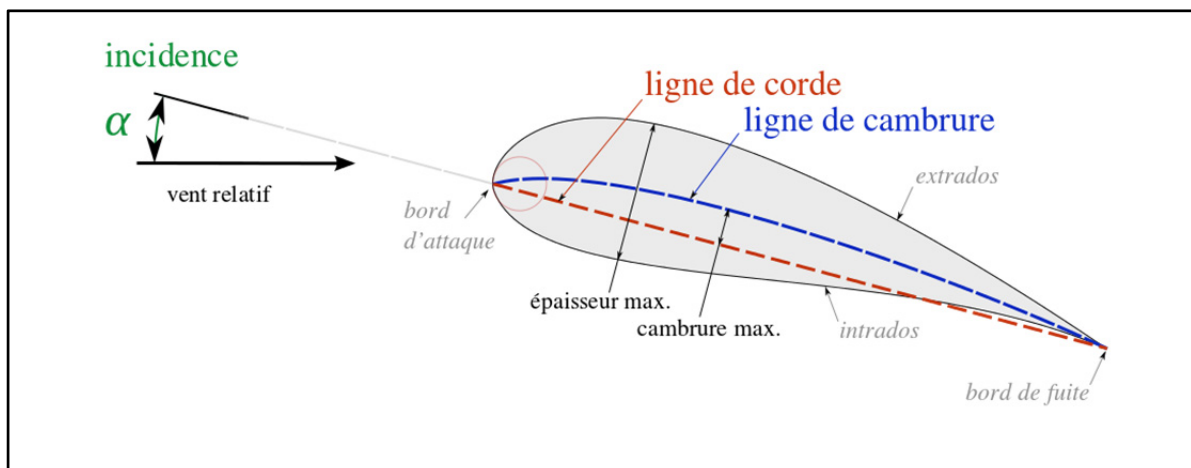


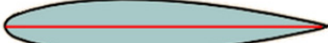




Figure-A I-1 Caractérisation d'un profil 2D
Tiré de Cleyen (2011)

Un profil est conçu selon son utilisation. En effet, si l'objectif est d'atteindre des vitesses élevées, il faut limiter au maximum la trainée, alors que si l'objectif est d'avoir une forte portance à faible vitesse, la trainée est moins contraignante. Pour l'application traitée dans ce mémoire, une revue approfondie des différents profils (Jones, 1990; Knovel et Von Mises,

1959), les profils ont été classés selon les catégories décrites dans le Tableau-A I-1. Ce tableau permet ainsi de comparer la portance, la trainée, la stabilité avec la variation du centre de poussée, la facilité de fabrication et de qualifier si le profil est porteur à incidence négative. Afin de faciliter la compréhension du tableau, X signifie mauvais, X X moyen, X X X bon et X X X X excellent.

Tableau-A I-1 Comparaison des différents types de profils

Nom du profil	Schéma	Portance	Trainée	Stabilité	Porteur à incidence négative ?	Fabrication
Plat	 Extrados convexe et intrados relativement plat	X X	X X	XX	NON	X X X
Biconvexe Dissymétrique	 Extrados légèrement plus convexe que l'extrados	X X	X X	XXX	OUI	X X
Biconvexe symétrique	 Extrados et intrados symétrique	X	X X	X XX	NON	X X X
Creux	 Extrados et intrados très cambré ou intrados concave	X X X X	X	X	OUI	X
Autosable	 Extrados et intrados conçus pour que le profil soit stable par rapport à l'angle d'attaque	X X	X X	X X XX	-	X

Répartition de la pression sur un profil 2D

La répartition de la pression sur un profil est importante à connaître. En effet, la pression exerce à l'échelle microscopique une force normale à la surface. Les efforts proviennent majoritairement de l'extrados où une dépression est créée par la différence de vitesse d'écoulement entre l'extrados et l'intrados (Kundu et al., 2012) alors qu'une légère surpression est présente sur l'intrados (voir Figure-A I-2 a et b). Historiquement, un point particulier Q nommé foyer du profil est placé sur la ligne de corde à un quart de la corde (0.25 c) par rapport au bord d'attaque. L'inégalité de la répartition de la pression telle qu'illustrée dans la Figure 2.8 peut créer un moment piqueur (M) autour du point Q où par convention la portance L et la trainée D seront appliquées (voir Figure-A I-3). La portance L est perpendiculaire à la direction d'écoulement du fluide et la trainée D est parallèle à cette direction. La répartition de la pression varie d'un profil à l'autre, créant plus au moins de portance L, de trainée D, ou de moment M. Selon la forme, la répartition de la pression peut varier afin de limiter l'instabilité du profil, réduire la cavitation à haute vitesse, etc...

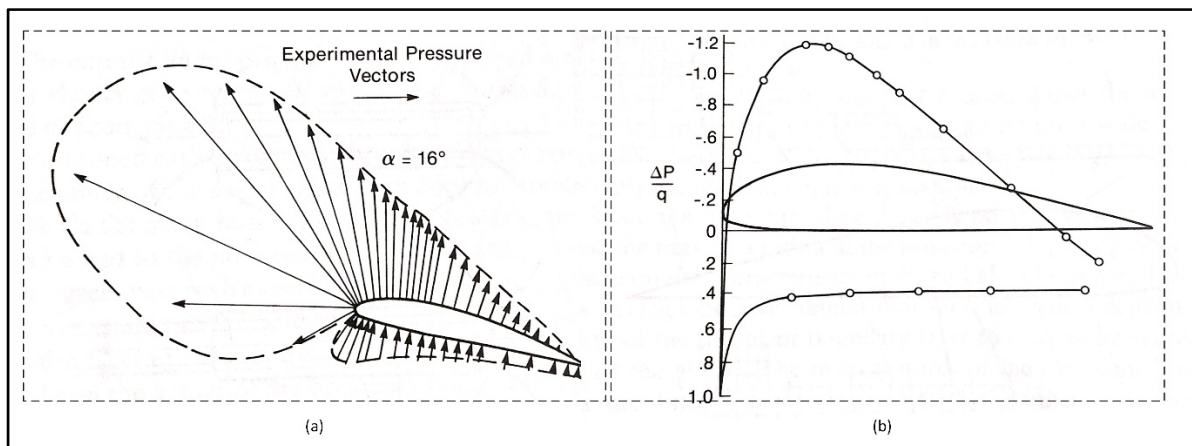


Figure-A I-2 Répartition de la pression sur un profil; (a) Diagramme des vecteurs pressions pour un profil NACA 4412 à 16° d'angle d'attaque ;
(b) Répartition de la pression sur un profil G-387

Adapté de Jones (1990, p. 8; 36)

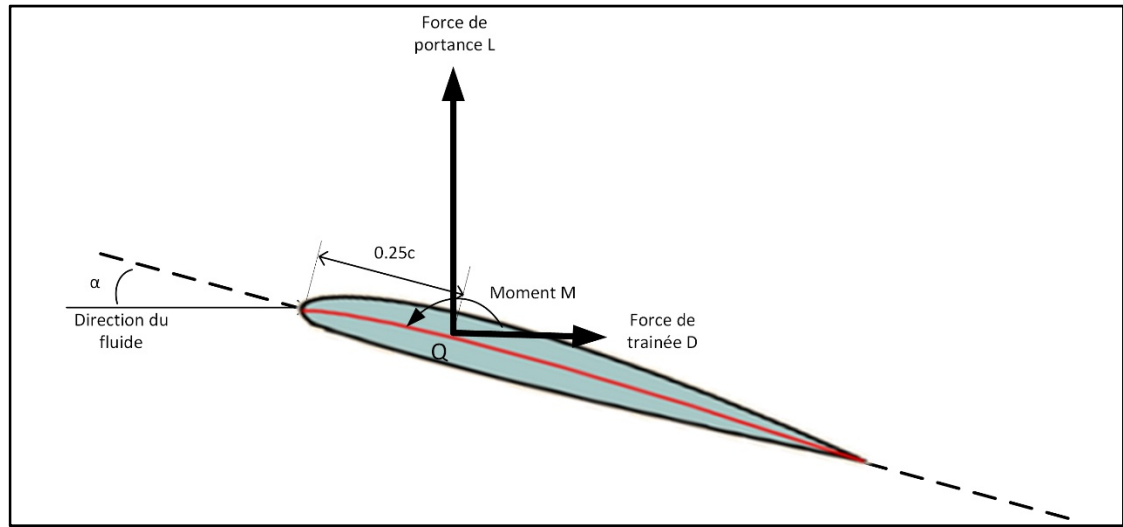


Figure-A I-3 Convention des forces et moments sur un profil asymétrique

Efforts sur une aile d'envergure finie

Les efforts présents sont donc L , D et M définis par rapport au foyer Q . Pour une aile d'envergure finie, la portance L (voir équation (A-I.3)) dépend des caractéristiques du fluide ρ , du coefficient de portance C_L du profil dans la configuration étudiée, du carré de la vitesse d'écoulement du fluide U_∞ et de la surface de référence S . La trainée D dépend des mêmes paramètres et de son coefficient de trainée C_D (voir équation (A-I.4)). Le moment M dépend également des mêmes paramètres, de son coefficient de moment C_M et de la corde c de l'aile (voir équation (A-I.5)) (Kundu et al., 2012). Ces efforts sont donc tous dépendants de la vitesse. Cependant, ces formules ne prennent pas en compte la perte de portance en bout d'aile causé par la déflexion des filets du fluide (*downwash*) créant un tourbillon. Un nouveau coefficient de portance C_{L-AR} (voir équation (A-I.6)) est calculé en fonction du rapport des longueurs AR (voir équation (A-I.7)) de l'aile (Jones, 1990), soit le rapport du carré de l'envergure b de l'aile sur la surface de référence S . En effet, plus l'envergure de l'aile est grande par rapport à sa corde, moins l'effet dû à la déflexion des filets du fluide sera important.

$$L = 0.5 C_L \rho U_\infty^2 S \quad (\text{A-I.3})$$

$$D = 0.5 C_D \rho U_\infty^2 S \quad (\text{A-I.4})$$

$$M = 0.5 C_M \rho U_\infty^2 S c \quad (\text{A-I.5})$$

$$C_{L-AR} = \frac{C_L}{1 - \frac{C_L}{\pi AR}} \quad (\text{A-I.6})$$

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (\text{A-I.7})$$

En mécanique des fluides, la pression dynamique q donnée dans l'équation (A-I.8) simplifie les équations précédentes (Kundu et al., 2012). Elle représente la pression exercée par l'écoulement du fluide en mouvement. Elle est à différencier à la pression statique. La somme de ces deux pressions donne la pression totale. Ces équations simplifiées sont présentées en (A-I.9), (A-I.10) et (A-I.11).

$$q = 0.5 \rho U_\infty^2 \quad (\text{A-I.8})$$

$$L = q C_L S \quad (\text{A-I.9})$$

$$D = q C_D S \quad (\text{A-I.10})$$

$$M = q C_M S c \quad (\text{A-I.11})$$

ANNEXE II

COORDONNÉES DES POINTS DU PROFIL H105 DE T. SPEER

Tableau-A II-1 Coordonnées des points du profil H105

X	Y	X (suite 1)	Y (suite 1)	X (suite 2)	Y (suite 2)
0,99645	0	0,00928	0,01141	0,13649	-0,04177
0,98649	0,00265	0,00627	0,00875	0,14822	-0,04317
0,97108	0,00674	0,00384	0,00626	0,17286	-0,0457
0,95055	0,01183	0,00213	0,00425	0,2125	-0,04874
0,92523	0,01779	0,00118	0,00293	0,25506	-0,0508
0,89558	0,02442	0,00078	0,00212	0,30016	-0,05182
0,86207	0,03148	0,00062	0,00157	0,34739	-0,05179
0,82513	0,03869	0,00045	0,00106	0,39634	-0,0507
0,7852	0,04579	0,00027	0,00054	0,44656	-0,04861
0,74269	0,05252	0,00012	0,00005	0,49761	-0,04558
0,69802	0,05867	0,00003	-0,00042	0,549	-0,04172
0,65161	0,06404	0	-0,00087	0,60026	-0,03716
0,60385	0,06846	0,00004	-0,00132	0,65088	-0,03207
0,55516	0,07182	0,00014	-0,00178	0,70036	-0,02666
0,50595	0,07405	0,00028	-0,00222	0,74816	-0,02113
0,45662	0,07512	0,00045	-0,00263	0,79374	-0,01574
0,40764	0,07507	0,00064	-0,003	0,83655	-0,01075
0,35947	0,07396	0,0009	-0,00343	0,87598	-0,00647
0,31259	0,07184	0,0013	-0,00401	0,91136	-0,00315
0,26752	0,06878	0,00192	-0,00484	0,9419	-0,00105
0,22471	0,06482	0,00299	-0,00598	0,95913	-0,00035
0,18462	0,06005	0,00476	-0,00747	0,9667	-0,00017
0,14766	0,05452	0,00741	-0,00932	0,97355	-0,00009
0,12494	0,05045	0,01085	-0,0114	0,97965	-0,0001
0,11421	0,04832	0,01492	-0,01356	0,98498	-0,00018
0,1039	0,04612	0,0195	-0,01567	0,98953	-0,00031
0,09402	0,04386	0,02458	-0,01772	0,99621	-0,00063
0,0846	0,04154	0,0302	-0,01976	1	-0,00088
0,07563	0,03917	0,03637	-0,02181		
0,06712	0,03675	0,04308	-0,02385		
0,05909	0,03429	0,0503	-0,02587		
0,05154	0,0318	0,05802	-0,02785		
0,04448	0,02927	0,06622	-0,02979		
0,03792	0,02672	0,07491	-0,03169		
0,03185	0,02414	0,08406	-0,03354		
0,02629	0,02156	0,09368	-0,03532		
0,02126	0,01901	0,10374	-0,03705		
0,01676	0,0165	0,11423	-0,0387		
0,01278	0,01399	0,12515	-0,04028		

ANNEXE III

**TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER POUR $Re = 5,0 \times 10^5$
ET $Re = 1,0 \times 10^6$**

xfl5 v6 10,01

Calculated polar for : H105_Ref

11 Reynolds numbers fixed

Mach number fixed

xtrf= 1,000(top) 1,000(bottom)

Mach = 0 Re = 0,500 e6 Ncr it = 30

alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top Xtr	Bot Xtr	Cpmin	Chinge	XCp
-10	-0,746	0,021	0,015	-0,077	0,956	0,002	-9,530	0,000	0,136
-9,5	-0,703	0,019	0,013	-0,076	0,948	0,002	-8,780	0,000	0,131
-9	-0,659	0,017	0,011	-0,076	0,939	0,003	-8,026	0,000	0,124
-8,5	-0,611	0,016	0,010	-0,076	0,931	0,003	-7,266	0,000	0,116
-8	-0,563	0,015	0,008	-0,076	0,923	0,003	-6,498	0,000	0,106
-7,5	-0,514	0,014	0,007	-0,075	0,914	0,004	-5,730	0,000	0,094
-7	-0,464	0,013	0,006	-0,075	0,905	0,006	-4,992	0,000	0,079
-6,5	-0,412	0,012	0,006	-0,075	0,897	0,008	-4,292	0,000	0,059
-6	-0,359	0,012	0,005	-0,075	0,889	0,013	-3,607	0,000	0,032
-5,5	-0,306	0,011	0,004	-0,075	0,880	0,021	-2,963	0,000	-0,005
-5	-0,253	0,011	0,004	-0,075	0,870	0,042	-2,360	0,000	-0,057
-4,5	-0,201	0,010	0,003	-0,076	0,861	0,102	-1,805	0,000	-0,137
-4	-0,149	0,009	0,002	-0,076	0,851	0,211	-1,312	0,000	-0,271
-3,5	-0,097	0,008	0,002	-0,076	0,842	0,360	-0,913	0,000	-0,548
-3	-0,042	0,008	0,002	-0,077	0,832	0,422	-0,658	0,000	-1,595
-2,5	0,014	0,007	0,002	-0,077	0,822	0,463	-0,482	0,000	5,914
-2	0,070	0,007	0,001	-0,077	0,811	0,499	-0,417	0,000	1,367
-1,5	0,126	0,007	0,001	-0,078	0,800	0,530	-0,406	0,000	0,870
-1	0,182	0,007	0,001	-0,078	0,788	0,558	-0,429	0,000	0,680
-0,5	0,238	0,007	0,001	-0,078	0,774	0,583	-0,455	0,000	0,579
0,5	0,349	0,007	0,001	-0,079	0,736	0,630	-0,517	0,000	0,474
1	0,404	0,007	0,001	-0,079	0,706	0,651	-0,565	0,000	0,443
1,5	0,456	0,007	0,002	-0,078	0,665	0,671	-0,630	0,000	0,419
2	0,507	0,008	0,002	-0,077	0,610	0,690	-0,711	0,000	0,399
2,5	0,555	0,008	0,002	-0,076	0,530	0,708	-0,814	0,000	0,384
3	0,600	0,009	0,003	-0,074	0,424	0,726	-0,949	0,000	0,370
3,5	0,645	0,010	0,003	-0,073	0,316	0,744	-1,149	0,000	0,359
4	0,690	0,011	0,004	-0,071	0,222	0,760	-1,390	0,000	0,349
4,5	0,737	0,012	0,004	-0,070	0,148	0,776	-1,704	0,000	0,340
5	0,783	0,013	0,005	-0,069	0,090	0,792	-2,196	0,000	0,333
5,5	0,830	0,013	0,006	-0,068	0,053	0,808	-2,729	0,000	0,326
6	0,877	0,014	0,006	-0,067	0,035	0,823	-3,303	0,000	0,320
6,5	0,923	0,015	0,007	-0,065	0,023	0,838	-3,944	0,000	0,314
7	0,968	0,016	0,008	-0,064	0,016	0,853	-4,651	0,000	0,309
7,5	1,011	0,017	0,009	-0,062	0,011	0,868	-5,392	0,000	0,303
8	1,052	0,017	0,010	-0,060	0,007	0,884	-6,156	0,000	0,298
8,5	1,090	0,018	0,011	-0,057	0,005	0,901	-6,925	0,000	0,293
9	1,124	0,020	0,013	-0,054	0,004	0,920	-7,692	0,000	0,288
9,5	1,154	0,021	0,014	-0,050	0,003	0,950	-8,442	0,000	0,283
10	1,184	0,022	0,015	-0,046	0,003	1,000	-9,225	0,000	0,278
10,5	1,217	0,024	0,017	-0,044	0,002	1,000	-10,056 1	0,0000	0,274
11	1,247	0,026	0,019	-0,041	0,002	1,000	-10,902 3	0,0000	0,270
11,5	1,273	0,028	0,022	-0,038	0,002	1,000	-11,738 4	0,0000	0,267
12	1,294	0,030	0,025	-0,035	0,001	1,000	-12,507 6	0,0000	0,263
12,5	1,312	0,033	0,028	-0,032	0,001	1,000	-13,253 2	0,0000	0,259
13	1,325	0,037	0,031	-0,028	0,001	1,000	-13,945 4	0,0000	0,256
13,5	1,332	0,041	0,036	-0,026	0,001	1,000	-14,568 0	0,0000	0,253
14	1,333	0,045	0,041	-0,023	0,001	1,000	-15,104 0	0,0000	0,250
14,5	1,327	0,051	0,047	-0,022	0,001	1,000	-15,533 4	0,0000	0,248
15	1,314	0,059	0,055	-0,022	0,001	1,000	-15,830 0	0,0000	0,247
15,5	1,293	0,069	0,065	-0,024	0,001	1,000	-15,960 2	0,0000	0,248
16	1,261	0,081	0,078	-0,029	0,001	1,000	-15,854 3	0,0000	0,251
16,5	1,217	0,099	0,096	-0,038	0,001	1,000	-15,376 6	0,0000	0,259
17	1,154	0,123	0,121	-0,052	0,001	1,000	-14,239 2	0,0000	0,271
17,5	1,058	0,158	0,156	-0,071	0,001	1,000	-11,717 0	0,0000	0,294
18	0,968	0,199	0,197	-0,094	0,001	1,000	-7,773	0,000	0,325

xl5 v6,10,01

Calculated polar for : H105_B

11 Reynolds number fixed Mach number fixed

x1rf= 1,000(top) 1,000(bottom)

Mach = 0 Re = 1,000e6 Ncrit =30

alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top X1r	Bot X1r	Cpmin	Chinge	XCp
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-10,000	-0,760	0,016	0,011	-0,077	0,933	0,002	-10,266	0,000	0,138
-9,500	-0,715	0,015	0,009	-0,076	0,923	0,002	-9,369	0,000	0,133
-9,000	-0,667	0,014	0,008	-0,076	0,913	0,002	-8,477	0,000	0,126
-8,500	-0,618	0,013	0,007	-0,076	0,904	0,002	-7,626	0,000	0,118
-8,000	-0,568	0,012	0,006	-0,075	0,895	0,002	-6,771	0,000	0,108
-7,500	-0,517	0,011	0,005	-0,075	0,886	0,003	-5,946	0,000	0,095
-7,000	-0,464	0,011	0,005	-0,075	0,877	0,003	-5,158	0,000	0,079
-6,500	-0,411	0,010	0,004	-0,076	0,868	0,005	-4,400	0,000	0,058
-6,000	-0,358	0,010	0,004	-0,076	0,858	0,008	-3,682	0,000	0,030
-5,500	-0,304	0,009	0,003	-0,076	0,849	0,014	-3,008	0,000	-0,009
-5,000	-0,250	0,009	0,003	-0,076	0,839	0,022	-2,382	0,000	-0,064
-4,500	-0,196	0,008	0,002	-0,076	0,829	0,050	-1,807	0,000	-0,150
-4,000	-0,142	0,008	0,002	-0,077	0,819	0,106	-1,286	0,000	-0,302
-3,500	-0,089	0,007	0,002	-0,077	0,808	0,206	-0,891	0,000	-0,632
-2,500	0,020	0,006	0,001	-0,078	0,786	0,386	-0,477	0,000	4,179
-2,000	0,076	0,006	0,001	-0,078	0,774	0,424	-0,412	0,000	1,287
-1,500	0,132	0,006	0,001	-0,079	0,760	0,460	-0,409	0,000	0,848
-1,000	0,188	0,006	0,001	-0,079	0,744	0,491	-0,432	0,000	0,671
-0,500	0,244	0,006	0,001	-0,079	0,724	0,519	-0,457	0,000	0,575
0,000	0,298	0,006	0,001	-0,079	0,694	0,545	-0,484	0,000	0,515
0,500	0,352	0,006	0,001	-0,079	0,655	0,569	-0,518	0,000	0,473
1,000	0,404	0,006	0,001	-0,079	0,600	0,592	-0,565	0,000	0,443
1,500	0,455	0,007	0,001	-0,078	0,525	0,614	-0,628	0,000	0,419
2,000	0,504	0,007	0,002	-0,077	0,433	0,634	-0,707	0,000	0,400
2,500	0,554	0,008	0,002	-0,076	0,341	0,653	-0,812	0,000	0,385
3,000	0,603	0,009	0,002	-0,076	0,257	0,672	-0,953	0,000	0,372
3,500	0,653	0,009	0,003	-0,075	0,184	0,690	-1,170	0,000	0,361
4,000	0,703	0,010	0,003	-0,075	0,126	0,709	-1,424	0,000	0,352
4,500	0,752	0,011	0,004	-0,074	0,073	0,726	-1,783	0,000	0,343
5,000	0,803	0,011	0,004	-0,073	0,048	0,743	-2,308	0,000	0,336
5,500	0,854	0,012	0,005	-0,073	0,030	0,759	-2,874	0,000	0,330
6,000	0,904	0,012	0,005	-0,072	0,020	0,775	-3,508	0,000	0,324
6,500	0,952	0,013	0,006	-0,071	0,012	0,790	-4,230	0,000	0,318
7,000	1,001	0,014	0,007	-0,071	0,008	0,805	-4,998	0,000	0,313
7,500	1,048	0,014	0,007	-0,069	0,005	0,820	-5,806	0,000	0,308
8,000	1,093	0,015	0,008	-0,068	0,003	0,834	-6,646	0,000	0,304
8,500	1,137	0,016	0,009	-0,067	0,002	0,848	-7,519	0,000	0,299
9,000	1,179	0,017	0,010	-0,065	0,002	0,863	-8,413	0,000	0,295
9,500	1,217	0,018	0,012	-0,062	0,001	0,879	-9,311	0,000	0,290
10,000	1,253	0,019	0,013	-0,059	0,001	0,895	-10,232	0,000	0,286
10,500	1,287	0,020	0,014	-0,056	0,001	0,913	-11,157	0,000	0,282
11,000	1,316	0,021	0,016	-0,052	0,001	0,937	-12,067	0,000	0,277
11,500	1,339	0,023	0,017	-0,048	0,001	1,000	-12,940	0,000	0,272
12,000	1,367	0,025	0,019	-0,045	0,001	1,000	-13,890	0,000	0,268
12,500	1,392	0,027	0,021	-0,041	0,001	1,000	-14,816	0,000	0,265
13,000	1,412	0,029	0,024	-0,038	0,001	1,000	-15,695	0,000	0,261
13,500	1,428	0,032	0,027	-0,035	0,001	1,000	-16,526	0,000	0,258
14,000	1,442	0,035	0,030	-0,032	0,001	1,000	-17,360	0,000	0,254
14,500	1,450	0,039	0,034	-0,029	0,001	1,000	-18,130	0,000	0,251
15,000	1,453	0,043	0,039	-0,026	0,001	1,000	-18,820	0,000	0,249
15,500	1,450	0,049	0,045	-0,025	0,001	1,000	-19,407	0,000	0,247
16,000	1,441	0,056	0,052	-0,024	0,001	1,000	-19,868	0,000	0,245
16,500	1,424	0,064	0,061	-0,026	0,001	1,000	-20,168	0,000	0,245
17,000	1,397	0,075	0,072	-0,029	0,001	1,000	-20,237	0,000	0,247
17,500	1,358	0,090	0,088	-0,036	0,001	1,000	-19,948	0,000	0,251
18,000	1,297	0,111	0,109	-0,047	0,001	1,000	-19,009	0,000	0,260

ANNEXE IV

TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER POUR $Re = 3,0 \times 10^6$ ET $Re = 6,0 \times 10^6$

xlf5 v6,10,01

Calculated polar for : H105_R

11 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf= 1,000(top) 1,000(bottom)

Mach = 0 Re = 3,000e6 Ncrit = 30

alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top Xtr	Bot Xtr	Cpmin	Chinge	XCp
-10,000	-0,787	0,012	0,007	-0,074	0,882	0,001	-10,935	0,000	0,145
-9,500	-0,737	0,011	0,006	-0,074	0,873	0,001	-9,958	0,000	0,140
-9,000	-0,685	0,010	0,006	-0,074	0,863	0,001	-8,993	0,000	0,132
-8,500	-0,633	0,010	0,005	-0,074	0,854	0,001	-8,036	0,000	0,124
-8,000	-0,580	0,009	0,004	-0,074	0,844	0,001	-7,099	0,000	0,113
-7,500	-0,526	0,009	0,004	-0,074	0,834	0,002	-6,201	0,000	0,100
-7,000	-0,472	0,009	0,003	-0,075	0,824	0,002	-5,349	0,000	0,083
-6,500	-0,418	0,008	0,003	-0,075	0,814	0,002	-4,547	0,000	0,062
-6,000	-0,363	0,008	0,003	-0,075	0,803	0,003	-3,791	0,000	0,034
-5,500	-0,307	0,008	0,002	-0,076	0,792	0,005	-3,087	0,000	-0,005
-5,000	-0,252	0,007	0,002	-0,076	0,781	0,008	-2,437	0,000	-0,061
-4,500	-0,197	0,007	0,002	-0,077	0,769	0,019	-1,841	0,000	-0,149
-4,000	-0,141	0,007	0,001	-0,077	0,758	0,033	-1,299	0,000	-0,307
-3,500	-0,086	0,006	0,001	-0,077	0,745	0,070	-0,883	0,000	-0,669
-3,000	-0,031	0,006	0,001	-0,078	0,730	0,133	-0,636	0,000	-2,333
-2,500	0,024	0,005	0,001	-0,078	0,713	0,242	-0,472	0,000	3,583
-2,000	0,079	0,005	0,001	-0,079	0,689	0,299	-0,409	0,000	1,252
-1,500	0,134	0,005	0,001	-0,079	0,656	0,338	-0,409	0,000	0,841
-1,000	0,189	0,005	0,001	-0,079	0,612	0,372	-0,432	0,000	0,670
-0,500	0,242	0,005	0,001	-0,079	0,550	0,404	-0,455	0,000	0,576
0,000	0,295	0,006	0,001	-0,079	0,479	0,434	-0,486	0,000	0,516
0,500	0,347	0,006	0,001	-0,079	0,403	0,461	-0,517	0,000	0,475
1,000	0,400	0,006	0,001	-0,078	0,333	0,487	-0,561	0,000	0,444
1,500	0,454	0,007	0,001	-0,078	0,271	0,510	-0,625	0,000	0,420
2,000	0,507	0,007	0,001	-0,078	0,215	0,533	-0,708	0,000	0,402
3,000	0,615	0,008	0,002	-0,078	0,122	0,579	-0,970	0,000	0,374
3,500	0,667	0,008	0,002	-0,078	0,073	0,599	-1,203	0,000	0,363
4,000	0,721	0,009	0,003	-0,078	0,049	0,618	-1,477	0,000	0,354
4,500	0,774	0,009	0,003	-0,078	0,033	0,636	-1,890	0,000	0,346
5,000	0,828	0,009	0,003	-0,078	0,022	0,655	-2,440	0,000	0,339
5,500	0,880	0,010	0,004	-0,078	0,011	0,674	-3,051	0,000	0,333
6,000	0,932	0,010	0,004	-0,078	0,006	0,692	-3,772	0,000	0,327
6,500	0,983	0,011	0,005	-0,077	0,003	0,709	-4,544	0,000	0,322
7,000	1,034	0,011	0,005	-0,077	0,002	0,725	-5,371	0,000	0,317
7,500	1,085	0,012	0,006	-0,076	0,001	0,741	-6,250	0,000	0,313
8,000	1,134	0,012	0,006	-0,076	0,001	0,757	-7,175	0,000	0,308
8,500	1,183	0,013	0,007	-0,075	0,001	0,772	-8,140	0,000	0,304
9,000	1,231	0,014	0,008	-0,074	0,001	0,787	-9,151	0,000	0,300
9,500	1,277	0,014	0,009	-0,073	0,001	0,802	-10,204	0,000	0,297
10,000	1,322	0,015	0,009	-0,071	0,001	0,817	-11,290	0,000	0,293
10,500	1,364	0,016	0,010	-0,070	0,001	0,831	-12,400	0,000	0,289
11,000	1,402	0,017	0,011	-0,067	0,000	0,845	-13,501	0,000	0,285
11,500	1,438	0,018	0,012	-0,064	0,000	0,860	-14,622	0,000	0,281
12,000	1,472	0,019	0,014	-0,061	0,000	0,877	-15,748	0,000	0,277
12,500	1,503	0,020	0,015	-0,058	0,000	0,894	-16,875	0,000	0,274
13,000	1,531	0,022	0,017	-0,055	0,000	0,913	-17,998	0,000	0,270
13,500	1,556	0,023	0,018	-0,051	0,000	0,938	-19,092	0,000	0,266
14,000	1,573	0,025	0,020	-0,046	0,000	1,000	-20,098	0,000	0,262
14,500	1,593	0,027	0,023	-0,042	0,000	1,000	-21,147	0,000	0,258
15,000	1,609	0,030	0,025	-0,039	0,000	1,000	-22,137	0,000	0,255
15,500	1,620	0,033	0,029	-0,035	0,000	1,000	-23,048	0,000	0,251
16,000	1,628	0,036	0,032	-0,032	0,000	1,000	-23,938	0,000	0,248
16,500	1,632	0,040	0,037	-0,030	0,000	1,000	-24,786	0,000	0,246
17,000	1,630	0,045	0,042	-0,028	0,000	1,000	-25,541	0,000	0,243
17,500	1,624	0,052	0,048	-0,027	0,000	1,000	-26,186	0,000	0,241
18,000	1,611	0,059	0,056	-0,027	0,000	1,000	-26,688	0,000	0,241

xlf5 v6,10,01

Calculated polar for : H105_F

11 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf= 1,000(top) 1,000(bottom)

Mach = 0 Re = 6,000e6 Ncrit = 30

alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top Xtr	Bot Xtr	Cpmin	Change	XCp
-10,000	-0.800	0.010	0.006	-0.072	0.846	0.001	-11,399	0.000	0.149
-9,500	-0.747	0.010	0.005	-0.073	0.836	0.001	-10,274	0.000	0.142
-9,000	-0.694	0.009	0.005	-0.073	0.826	0.001	-9,193	0.000	0.135
-8,500	-0.640	0.009	0.004	-0.073	0.816	0.001	-8,171	0.000	0.126
-8,000	-0.586	0.008	0.004	-0.074	0.805	0.001	-7,202	0.000	0.115
-7,500	-0.531	0.008	0.003	-0.074	0.794	0.001	-6,302	0.000	0.102
-7,000	-0.476	0.008	0.003	-0.074	0.783	0.001	-5,435	0.000	0.085
-6,500	-0.421	0.007	0.003	-0.075	0.771	0.002	-4,611	0.000	0.064
-5,500	-0.309	0.007	0.002	-0.076	0.748	0.003	-3,123	0.000	-0.004
-5,000	-0.254	0.007	0.002	-0.076	0.735	0.005	-2,462	0.000	-0.060
-4,500	-0.197	0.006	0.002	-0.077	0.722	0.009	-1,857	0.000	-0.149
-4,000	-0.142	0.006	0.001	-0.077	0.705	0.020	-1,310	0.000	-0.307
-3,500	-0.086	0.006	0.001	-0.078	0.684	0.039	-0,885	0.000	-0.668
-3,000	-0.031	0.006	0.001	-0.078	0.657	0.074	-0,636	0.000	-2.307
-2,500	0.023	0.006	0.001	-0.078	0.618	0.131	-0,471	0.000	3.622
-2,000	0.077	0.005	0.001	-0.078	0.567	0.211	-0,410	0.000	1.275
-1,500	0.131	0.005	0.001	-0.078	0.509	0.259	-0,414	0.000	0.852
-1,000	0.184	0.006	0.001	-0.078	0.437	0.294	-0,436	0.000	0.676
-0,500	0.238	0.006	0.001	-0.078	0.380	0.325	-0,459	0.000	0.579
0,000	0.293	0.006	0.001	-0.079	0.321	0.355	-0,485	0.000	0.517
0,500	0.347	0.006	0.001	-0.079	0.269	0.386	-0,521	0.000	0.475
1,000	0.402	0.006	0.001	-0.079	0.222	0.413	-0,561	0.000	0.444
1,500	0.457	0.007	0.001	-0.079	0.180	0.438	-0,627	0.000	0.421
2,000	0.513	0.007	0.001	-0.080	0.142	0.462	-0,712	0.000	0.402
2,500	0.567	0.007	0.002	-0.080	0.105	0.485	-0,825	0.000	0.387
3,000	0.622	0.007	0.002	-0.080	0.072	0.508	-0,982	0.000	0.375
3,500	0.676	0.008	0.002	-0.080	0.046	0.532	-1,224	0.000	0.364
4,000	0.731	0.008	0.002	-0.080	0.032	0.553	-1,508	0.000	0.355
4,500	0.785	0.008	0.003	-0.080	0.020	0.573	-1,943	0.000	0.347
5,000	0.839	0.009	0.003	-0.080	0.009	0.592	-2,500	0.000	0.340
5,500	0.892	0.009	0.003	-0.080	0.004	0.610	-3,157	0.000	0.334
6,000	0.946	0.009	0.004	-0.080	0.002	0.630	-3,897	0.000	0.329
6,500	0.998	0.010	0.004	-0.080	0.001	0.649	-4,696	0.000	0.323
7,000	1.051	0.010	0.004	-0.080	0.001	0.666	-5,550	0.000	0.319
7,500	1.103	0.010	0.005	-0.080	0.001	0.684	-6,460	0.000	0.314
8,500	1.204	0.011	0.006	-0.079	0.001	0.717	-8,434	0.000	0.306
9,000	1.254	0.012	0.007	-0.078	0.000	0.733	-9,493	0.000	0.302
9,500	1.302	0.013	0.007	-0.077	0.000	0.749	-10,595	0.000	0.299
10,000	1.349	0.013	0.008	-0.076	0.000	0.764	-11,735	0.000	0.295
10,500	1.395	0.014	0.009	-0.075	0.000	0.779	-12,907	0.000	0.292
11,000	1.439	0.015	0.010	-0.074	0.000	0.794	-14,102	0.000	0.288
11,500	1.480	0.016	0.010	-0.072	0.000	0.809	-15,311	0.000	0.285
12,000	1.517	0.016	0.011	-0.069	0.000	0.824	-16,514	0.000	0.281
12,500	1.552	0.017	0.013	-0.066	0.000	0.839	-17,731	0.000	0.277
13,000	1.584	0.019	0.014	-0.063	0.000	0.854	-18,950	0.000	0.274
13,500	1.614	0.020	0.015	-0.059	0.000	0.871	-20,173	0.000	0.270
14,000	1.642	0.021	0.017	-0.056	0.000	0.889	-21,393	0.000	0.266
14,500	1.667	0.023	0.018	-0.052	0.000	0.909	-22,603	0.000	0.263
15,000	1.689	0.024	0.020	-0.048	0.000	0.934	-23,793	0.000	0.259
15,500	1.704	0.026	0.022	-0.044	0.000	1.000	-24,889	0.000	0.255
16,000	1.720	0.029	0.025	-0.040	0.000	1.000	-26,024	0.000	0.252
16,500	1.733	0.032	0.028	-0.037	0.000	1.000	-27,111	0.000	0.249
17,000	1.741	0.035	0.031	-0.034	0.000	1.000	-28,141	0.000	0.246
17,500	1.746	0.039	0.035	-0.031	0.000	1.000	-29,098	0.000	0.243
18,000	1.746	0.044	0.040	-0.029	0.000	1.000	-29,969	0.000	0.241
18,500	1.741	0.049	0.046	-0.028	0.000	1.000	-30,741	0.000	0.239
19,000	1.731	0.056	0.053	-0.028	0.000	1.000	-31,381	0.000	0.237
19,500	1.714	0.065	0.062	-0.029	0.000	1.000	-31,834	0.000	0.237
20,000	1.687	0.075	0.072	-0.031	0.000	1.000	-32,043	0.000	0.237

ANNEXE V

TABLEAU CARACTÉRISANT LE PROFIL H105 DE T. SPEER

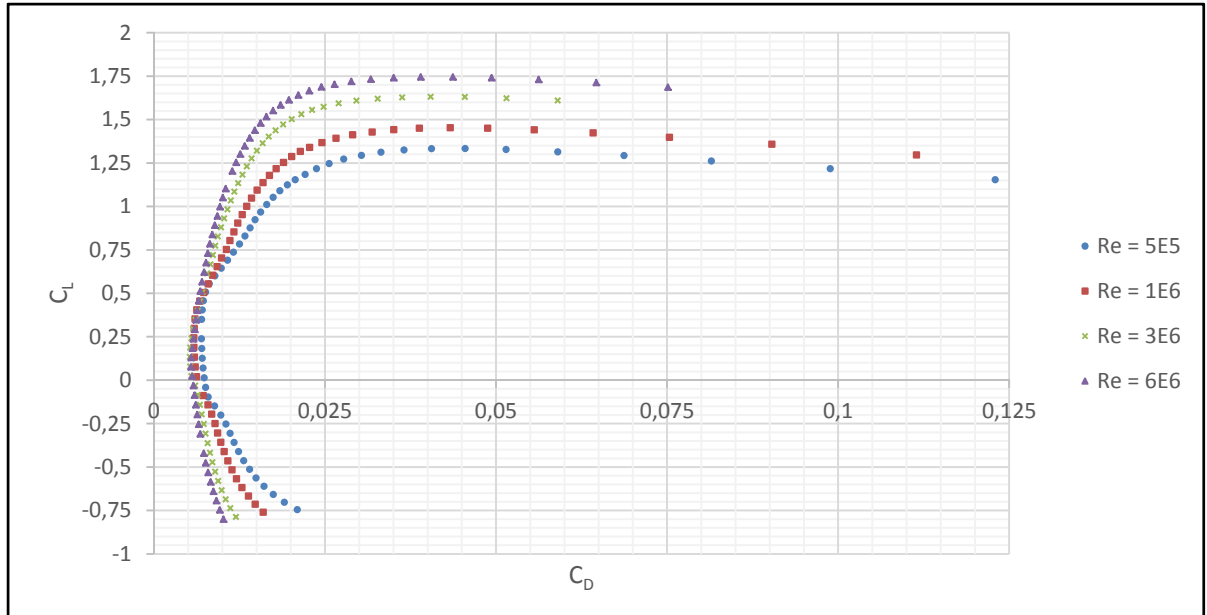


Figure-A V-1 Polaire du profil H105 pour $Re = 5,0 \times 10^5$, $1,0 \times 10^6$, $3,0 \times 10^6$ et $6,0 \times 10^6$

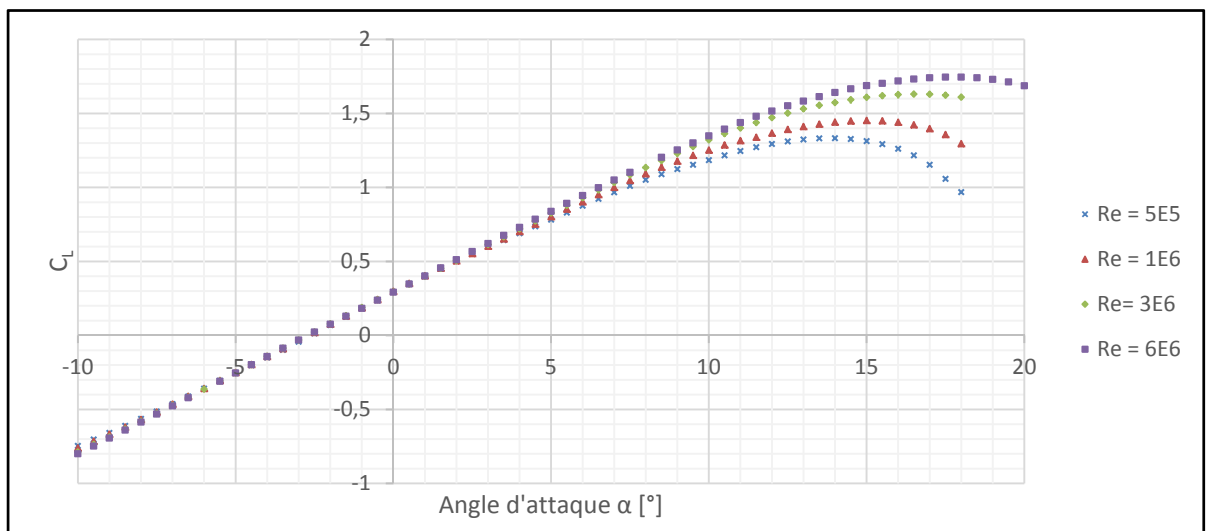


Figure-A V-2 Évolution de coefficient de portance C_L en fonction de l'angle α d'attaque pour $Re = 5,0 \times 10^5$, $1,0 \times 10^6$, $3,0 \times 10^6$ et $6,0 \times 10^6$

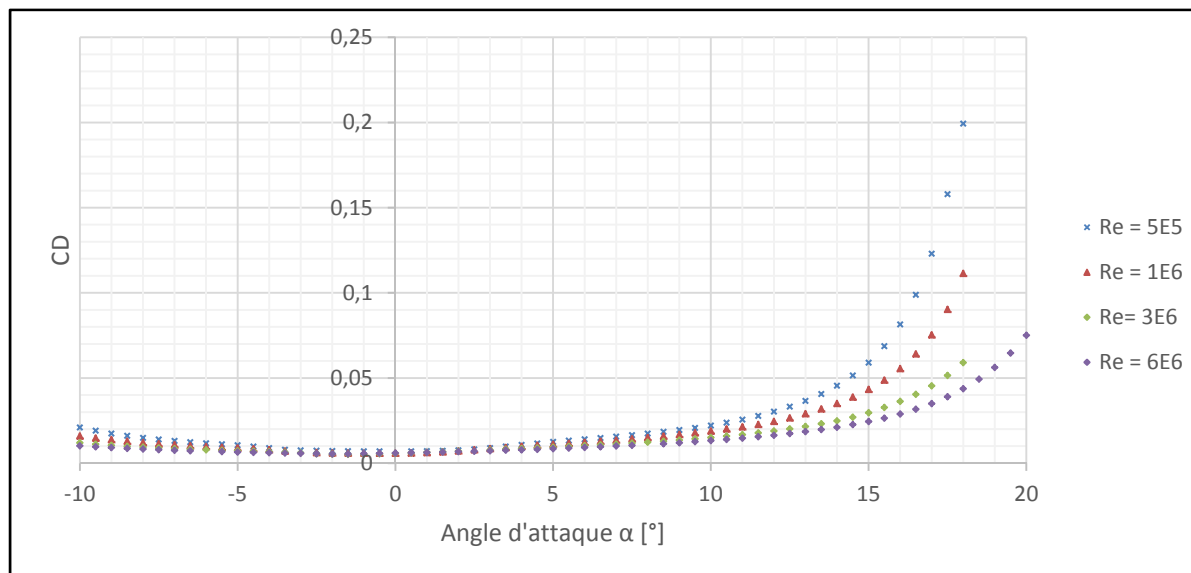


Figure-A V-3 Évolution de coefficient de trainée C_D en fonction de l'angle α d'attaque pour $Re = 5,0 \times 10^5$, $1,0 \times 10^6$, $3,0 \times 10^6$ et $6,0 \times 10^6$

ANNEXE VI

CONFIGURATIONS TESTÉES

Tableau-A VI-1 Configurations testées

Cas	Derive (Rayon) [m]	Derive (Profondeur) [m]	Derive coude (Rayon) [m]	Derive Aile (Envergure) [m]	Derive (corde) [m]	Derive (Angle CANT) [°]	Safran Aile (Envergure) [m]	Safran Aile (Corde) [m]	Safran (Angle attaque) [°]	Derive (Angle attaque) [°]
1 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	6
1 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
1 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	0
2 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	-2	3
2 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
2 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	3	3
3 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	6
3 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
3 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	0
4 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	-2	3
4 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
4 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	3	3
5 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	6
5 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
5 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	0
6 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	0	0,4	0,08	0	6
6 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	0	0,4	0,08	0	3
6 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	0	0,4	0,08	0	0
7 . 1	3	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	6
7 . 2	3	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
7 . 3	3	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	0
8 . 1	5	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	6
8 . 2	5	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
8 . 3	5	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	0
9 . 1	4	1,3	0,25	0,8	0,25	10	0,4	0,08	0	6
9 . 2	4	1,3	0,25	0,8	0,25	10	0,4	0,08	0	3
9 . 3	4	1,3	0,25	0,8	0,25	10	0,4	0,08	0	0
10 . 1	4	1,3	0,25	0,5	0,25	10	0,4	0,08	0	6
10 . 2	4	1,3	0,25	0,5	0,25	10	0,4	0,08	0	3
10 . 3	4	1,3	0,25	0,5	0,25	10	0,4	0,08	0	0
11 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,2	10	0,4	0,08	0	3
11 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,2	10	0,4	0,08	0	6
11 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,28	10	0,4	0,08	0	3
11 . 4	4	1,3	0,25	0,7	0,28	10	0,4	0,08	0	6
12 . 1	4	1,3	0,15	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
12 . 2	4	1,3	0,3	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
13 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
13 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
13 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
13 . 4	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
14 . 1	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	6
14 . 2	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
14 . 3	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	0
15 . 1	4	1	0,25	0,7	0,25	20	0,4	0,08	0	3
15 . 2	4	1	0,25	0,7	0,25	0	0,4	0,08	0	3
16 . 1	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	6
16 . 2	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	3
16 . 3	4	1	0,25	0,7	0,25	10	0,4	0,08	0	0
17 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,08	0	6
17 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,08	0	3
17 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,08	0	0
18 . 1	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,1	0	6
18 . 2	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,1	0	3
18 . 3	4	1,3	0,25	0,7	0,25	10	0,45	0,1	0	0

Tableau-A VI-2 Résultats des simulations du modèle SM

Cas	Vitesse maximale [nœuds]	Vitesse décollage [nœuds]	Force de trainée [N]	Force Antidérive [N]	Force de portance [N]
1 . 1	31,7	11,9	119,1	963,8	1906,3
1 . 2	40,3	14,0	81,6	1062,1	1352,0
1 . 3	44,8	19,0	57,7	1162,6	780,3
2 . 1	40,7	14,0	82,5	1059,5	1368,9
2 . 2	40,3	14,0	81,6	1062,1	1352,0
2 . 3	39,2	14,0	80,2	1066,3	1326,1
3 . 1	32,0	12,0	120,9	960,4	1929,5
3 . 2	41,4	14,0	82,8	1058,6	1375,0
3 . 3	45,8	18,8	58,3	1159,2	801,6
4 . 1	42,3	14,1	83,7	1056,0	1391,7
4 . 2	41,4	14,0	82,8	1058,6	1375,0
4 . 3	39,8	14,0	81,4	1062,8	1348,7
5 . 1	29,1	11,7	103,0	1210,0	1883,0
5 . 2	39,1	14,1	72,0	1232,0	1351,0
5 . 3	42,2	20,5	52,0	1252,0	790,0
6 . 1	20,2	12,5	118,9	1370,8	2076,5
6 . 2	25,8	15,6	82,2	1342,3	1481,5
6 . 3	30,8	26,6	58,0	1311,1	855,4
7 . 1	28,7	11,2	117,3	1025,0	2013,2
7 . 2	38,8	13,5	81,4	1105,6	1453,3
7 . 3	43,6	19,5	58,0	1188,1	863,6
8 . 1	26,5	11,3	117,2	1240,0	1955,0
8 . 2	35,5	13,7	81,1	1252,0	1388,8
8 . 3	43,2	21,0	57,7	1262,4	792,6
9 . 1	28,7	11,2	98,8	1147,6	2009,7
9 . 2	37,8	13,5	70,0	1188,0	1434,0
9 . 3	43,6	20,3	51,0	1229,0	830,0
10 . 1	33,8	12,6	57,0	1337,0	1616,0
10 . 2	41,0	15,2	42,0	1318,0	1156,0
10 . 3	44,2	22,1	33,0	1298,0	678,0
11 . 1	43,9	15,8	43,0	988,0	1105,0
11 . 2	34,1	13,0	59,0	973,0	1555,0
11 . 3	37,6	13,2	71,0	1376,0	1479,0
11 . 4	28,5	11,0	100,0	1351,0	2070,0
12 . 1	40,1	16,8	57,0	1120,0	1159,0
12 . 2	36,2	13,2	62,0	1286,0	1430,0
13 . 1	37,0	13,9	60,0	1300,0	1274,0
13 . 2	40,3	14,0	81,6	1062,1	1352,0
13 . 3	40,2	14,5	60,0	1160,0	1408,0
13 . 4	40,4	14,8	60,4	1084,0	1470,0
14 . 1	52,0	11,8	79,0	950,0	1820,0
14 . 2	60,0	14,4	55,0	935,0	1281,0
14 . 3	45,9	23,1	39,0	918,0	716,0
15 . 1	60,0	15,0	65,0	810,0	1228,0
15 . 2	47,4	16,4	66,0	1071,0	1327,0
16 . 1	27,4	11,3	117,1	1159,2	1978,9
16 . 2	36,8	13,6	81,2	1196,5	1414,2
16 . 3	43,3	20,5	57,7	1233,5	819,4
17 . 1	29,2	11,7	103,0	1210,0	1885,0
17 . 2	39,2	14,1	72,0	1232,0	1353,0
17 . 3	42,1	20,4	51,8	1252,0	792,5
18 . 1	29,1	11,7	103,0	1210,0	1883,0
18 . 2	39,1	14,1	71,0	1232,0	1351,0
18 . 3	42,2	20,5	52,0	1252,0	790,0

ANNEXE VII

PROGRAMME MATLAB POUR CALCULER LA POUSSEE D'ARCHIMEDE

```

function
[F_archi,Mx,My]=P_archi_stl(fileName,ZLevel,thetax,th
etay)
%Calcul de la pousse d'archimede (et moments) sur un
volume partiellement ou
%complètement immergé

%%Lecture du fichier STL
% ZLevel = 0; % Hauteur d'eau par rapport au centre de
gravité (mm)
% thetax = 90 * pi/180; %Angle de roulis
% thetay = 0 * pi/180; %Angle de tangage
% fileName = 'cylindre.stl'; % Fichier STL de la
géométrie
%empêche les warning dans la triangulation de Delaunay
id='MATLAB:delaunayTriangulation:DupPtsConsUpdat
edWarnId';
warning('off',id)

fid = fopen(fileName, 'rb'); % Lecture fichier binaire
fread(fid, 80, '*char'); % Lecture du titre du fichier STL
(conversion du binaire)
NoTri = fread(fid, 1, 'uint32'); % Nombre de facettes
triangulaires
vertex = zeros(NoTri*3, 3); % matrice des points
thetax=thetax*pi/180;
thetay=thetay*pi/180;

% Lecture des triangles
for i = 1:NoTri

% vecteur normal
vector(i,:) = fread(fid, 3, 'single'); %

% coordonnées des points du triangle
triVertex = fread(fid, 3*3, 'single'); %
triVertex = reshape(triVertex, [3,3]); %
vertex((i-1)*3+[1:3], :) = triVertex; %

fread(fid, 1, 'uint16'); % Attribute byte count, usually not
used

end
fclose(fid);
%%% CALCUL DU VOLUME ET DE LA POSITION
DU CENTRE DE GRAVITÉ DE LA COQUE
Volume_total = 0;

iprob2=0;
X_CG = 0;
Y_CG = 0;

Z_CG = 0;
volumetest = 0;
for i=1:NoTri

    index = (i-1)*3;
    Volume_triangle =
(vertex(index+1,1)*vertex(index+2,2)*vertex(index+3,3)
...
-
vertex(index+1,1)*vertex(index+3,2)*vertex(index+2,3)
...
-
vertex(index+2,1)*vertex(index+1,2)*vertex(index+3,3)
...
+
vertex(index+2,1)*vertex(index+3,2)*vertex(index+1,3)
...
+
vertex(index+3,1)*vertex(index+1,2)*vertex(index+2,3)
...
-
vertex(index+3,1)*vertex(index+2,2)*vertex(index+1,3))
/ 6;
    Volume_total = Volume_total + Volume_triangle;
    X_CG = X_CG + ((vertex(index+1,1) +
vertex(index+2,1) + vertex(index+3,1)) / 4) *
Volume_triangle;
    Y_CG = Y_CG + ((vertex(index+1,2) +
vertex(index+2,2) + vertex(index+3,2)) / 4) *
Volume_triangle;
    Z_CG = Z_CG + ((vertex(index+1,3) +
vertex(index+2,3) + vertex(index+3,3)) / 4) *
Volume_triangle;

end

Volume_total;
X_CG = X_CG/Volume_total;
Y_CG = Y_CG/Volume_total;
Z_CG = Z_CG/Volume_total;
fprintf('LE VOLUME TOTAL: %10.2e
mm^3\n',Volume_total)
fprintf('LE CENTRE DE GRAVITÉ EST POSITIONNÉ
EN: X_CG= %10.2e; Y_CG= %10.2e; Z_CG= %10.2e
[mm] \n',X_CG,Y_CG,Z_CG);
fprintf('LE NIVEAU D"EAU PAR RAPPORT AU CG
EST À: ZLEVEL= %10.2e [mm] \n',ZLevel);
ZLevel = ZLevel + Z_CG;

%% ROTATION TANGAGE (Y) ET ROULIS (X) axe
liés au bateau

```

```

cx=cos(thetax);
sx=sin(thetax);
mat_rotx = [1 0 0 ; 0 cx -sx ; 0 sx cx]; %roulis

cy=cos(thetay);
sy=sin(thetay);
ux = 0;
uy = cos(thetax);
uz = sin(thetax);
mat_roty = [ux^2+(1-ux^2)*cy    ux*uy*(1-cy)-uz*sy
            ux*uz*(1-cy)+uy*sy ;
            ux*uy*(1-cy)+uz*sy    uy^2+(1-uy^2)*cy    uy*uz*(1-
            cy)-ux*sy;...
            ux*uz*(1-cy)-uy*sy    uy*uz*(1-cy)+ux*sy    uz^2+(1-
            uz^2)*cy];%tangage

for i=1:length(vertex)

    point = vertex(i,:);
    point = point - [X_CG Y_CG Z_CG];%translation
    vers le CG
    point = (mat_rotx*point)';%rotation selon x
    point = (mat_rotx*point)';%rotation selon y
    point = point + [X_CG Y_CG Z_CG];
    vertex(i,:) = point;
end

%% Découpe de la triangulation de la coque au niveau
de l'eau Zlevel
%Calcul le max et le min en z de chaque triangle pour
facilité le découpage
if max(vertex(:,3))>ZLevel % SI LE NIVEAU D'EAU
EST AU-DESSUS DE LA COQUE, NE PAS FAIRE
LES CALCULS DE DÉCOUPAGE

MaxMinTriZ = zeros(NoTri,2);
MinZIndex = zeros(NoTri,1);
MinZValue = zeros(NoTri,1);
MaxZIndex = zeros(NoTri,1);
MaxZValue = zeros(NoTri,1);

i=1;
for k=1:3:length(vertex)
    MaxMinTriZ(i,1) = min(vertex(k:k+2,3));
    MaxMinTriZ(i,2) = max(vertex(k:k+2,3));
    i=i+1;
end

%Sélection des triangle à conserver pour la géométrie
submergée
%Accepter tous les triangles dont le niveau min est au-
dessous de Zlevel
Trikeep = MaxMinTriZ(:,1)<ZLevel;
%Accepter tel quel les triangle dont le zmax et <= Zlevel
Trikeep0 = MaxMinTriZ(:,2)<=ZLevel;
keep0index = find(Trikeep);%indice des triangle à
conserver tel quel
%Les triangles qui doivent être coupé sont
Trislice = Trikeep &~ Trikeep0;
sliceindex = find(Trislice);%indice des triangle à couper

```

```

%Si aucun triangle en dessous Zlevel,alors la coque est
hors de l'eau, il
%n'y a aucune force qui s'exerce dessus
if nnz(Trislice) ==0
    F_archi = 0;
    Mx = 0;
    My = 0;
else

```

```

% trois cas de triangles à couper
% 1) un point au dessus de Zlevel
% 2) deux points au dessus de Zlevel
% 3) un point au dessus de Zlevel et un point à Zlevel

```

```

icas1=0;
icas2=0;
icas3=0;
%segment est un vecteur de tous les segments sur le
contour à ZLevel
segment=[];
for i=1:nnz(Trislice)
    index = (sliceindex(i)-1)*3;
    point = vertex(index+1:index+3,:);
    [Y,I]=sort(point(:,3));% ordonne les points en fonction
de leur coordonnée en z
    point = point(I,:);
    thiscase = nnz(point(:,3)>ZLevel) +
2*nnz(point(:,3)==ZLevel);

```

```

switch thiscase %un point au-dessus de ZLevel

```

```

case 1
    icas1=icas1+1;
    point4(1) = point(1,1) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,1)-
point(1,1));
    point4(2) = point(1,2) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,2)-
point(1,2));
    point4(3) = ZLevel;

    point5(1) = point(2,1) + (ZLevel -
point(2,3))/(point(3,3)- point(2,3)) * (point(3,1)-
point(2,1));
    point5(2) = point(2,2) + (ZLevel -
point(2,3))/(point(3,3)- point(2,3)) * (point(3,2)-
point(2,2));
    point5(3) = ZLevel;

```

```

% test pour les vecteurs normaux

```

```

A = point(2,:) - point(1,:);
B = point4 - point(1,:);
C = cross(A,B);
C = C/norm(C);
D = vector(sliceindex(i,:));
E = sign(dot(C,D));

```



```

if E~=1
    %réordonne le triangle
    point(3,:) = point(2,:);
    point(2,:) = point4;
    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    vertex(index+1:index+3,:)=point;
    %ajoute un triangle à la fin de vertex et update
Trikeep0
    vertex(end+1:end+3,:) =
[point(3,:);point4;point5];
    Trikeep0 = [Trikeep0;1];
else
    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    point(3,:) = point4;
    vertex(index+1:index+3,:)=point;
    %ajoute un triangle à la fin de vertex et update
Trikeep0
    vertex(end+1:end+3,:) =
[point(2,:);point5;point4];
    Trikeep0 = [Trikeep0;1];
end

```

```

case 2 %2 points au-dessus de ZLevel
    icas2=icas2+1;
    point4(1) = point(1,1) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(2,3)- point(1,3)) * (point(2,1)-
point(1,1));
    point4(2) = point(1,2) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(2,3)- point(1,3)) * (point(2,2)-
point(1,2));
    point4(3) = ZLevel;

    point5(1) = point(1,1) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,1)-
point(1,1));
    point5(2) = point(1,2) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,2)-
point(1,2));
    point5(3) = ZLevel;

```

% test pour les vecteurs normaux

```

A = point4-point(1,:);
B = point5-point(1,:);
C = cross(A,B);
C = C/norm(C);
D = vector(sliceindex(i,:));
E = sign(dot(C,D));
if E~=1
    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    point(2,:) = point5;
    point(3,:) = point4;
    vertex(index+1:index+3,:)=point;

else

```

```

    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    point(2,:) = point4;
    point(3,:) = point5;
    vertex(index+1:index+3,:)=point;
end

```

```

case 3 %un point au-dessus de ZLevel et un point à
ZLevel
    icas3=icas3+1;
    point4(1) = point(1,1) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,1)-
point(1,1));
    point4(2) = point(1,2) + (ZLevel -
point(1,3))/(point(3,3)- point(1,3)) * (point(3,2)-
point(1,2));
    point4(3) = ZLevel;

```

% test pour les vecteurs normaux

```

A = point(2,:) - point(1,:);
B = point4 - point(1,:);
C = cross(A,B);
C = C/norm(C);
D = vector(sliceindex(i,:));
E = sign(dot(C,D));
if E~=1
    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    point(3,:) = point(2,:);
    point(2,:) = point4;

    vertex(index+1:index+3,:)=point;

else
    %modifie le triangle en court et remplace dans
vertex
    point(3,:) = point4;
    vertex(index+1:index+3,:)=point;
end

end

```

end

```

%%création d'une matrice de point regroupant tous les
triangle compris dans
%la géométrie immergée
vertexn=[];
icount=1;
for i=1:length(Trikeep)
    index = (i-1)*3;
    if Trikeep(i)==1
        vertexn = [vertexn;vertex(index+1:index+3,:)];
    end
    icount=icount+1;
end
vertexn = [vertexn;vertex(NoTri*3+1:length(vertex),:)];

```

```

% Découpe de la surface plane à ZLevel
Contour = vertexn(:,3)==ZLevel;
for i=1:length(vertexn)/3
    Contourindex(i) = sum(Contour((i-1)*3+1:(i-1)*3+3));
end
Contourindex = Contourindex==2;
Ncontour = nnz(Contourindex);
Contourindex = find(Contourindex);%indice des
segments constituant le contour de la surface à Zlevel
icontour=1;
%réordonne les points selon leur z dans chaque triangle
de vertexn sur le contour
for i=1:Ncontour
    index = Contourindex(i);
    point = vertexn((index-1)*3+1:(index-1)*3+3,:);
    [Y,I]=sort(point(:,3));% ordonne les points en fonction
de leur coordonnée en z
    point = point(I,:);
    vertexcontour((i-1)*2+1:(i-1)*2+2,:) = point(2:3,1:2);
end

vertexcontour2
=unique(vertexcontour,'rows','stable');%vertexcontour
sans les doublons

ipoint = 1;
point=vertexcontour(ipoint,:);
listesegment(1) = ipoint;
for j=1:length(vertexcontour)/2
    indexpoint = abs(vertexcontour(:,1)-point(1))<1E-12
    & abs(vertexcontour(:,2)-point(2))<1E-12;
    % d'erreur de calcul oblige de limiter la precision de la
comparaison
    nextpointindex = find(indexpoint);

    if nextpointindex(1)~=ipoint
        if mod(nextpointindex(1),2) == 0
            %index pair
            ipoint = nextpointindex(1)-1;
            listesegment(j+1)=ipoint;
            point=vertexcontour(ipoint,:);
        else
            ipoint = nextpointindex(1)+1;
            listesegment(j+1)=ipoint;
            point=vertexcontour(ipoint,:);
        end
    else
        if mod(nextpointindex(2),2) == 0
            %index pair
            ipoint = nextpointindex(2)-1;
            listesegment(j+1)=ipoint;
            point=vertexcontour(ipoint,:);
        else
            ipoint = nextpointindex(2)+1;
            listesegment(j+1)=ipoint;
            point=vertexcontour(ipoint,:);
        end
    end
end

```

```

end

end

%%matrice sans doublon et ordonnees des coordonnées
du contour coupé à
%ZLevel
vertexcontour2=vertexcontour(listesegment(1:end-1),:);
%création des triangles de la surface de dessus à partir
des points de
%contours
% C Contraintes pour éviter que la triangulation de
dépasse le contour

C=[];
for i=1:length(vertexcontour2)-1
    C=[C; i i+1];
end
C=[C;i+1 1];
figure(1);
DT = delaunayTriangulation(vertexcontour2,C);
triplot(DT);
axis equal;
Calcul du volume de la surface du dessus
VOL_IMMERGE = 0;

X_CGi = 0;
Y_CGi = 0;
Z_CGi = 0;

for i=1:length(DT.ConnectivityList)

    index1 = DT.ConnectivityList(i,1);
    index2 = DT.ConnectivityList(i,2);
    index3 = DT.ConnectivityList(i,3);

    Volume_triangle =
(DT.Points(index1,1)*DT.Points(index2,2)*ZLevel ...
-
DT.Points(index1,1)*DT.Points(index3,2)*ZLevel ...
-
DT.Points(index2,1)*DT.Points(index1,2)*ZLevel ...
+
DT.Points(index2,1)*DT.Points(index3,2)*ZLevel ...
+
DT.Points(index3,1)*DT.Points(index1,2)*ZLevel ...
-
DT.Points(index3,1)*DT.Points(index2,2)*ZLevel) / 6;
    if Volume_triangle<0
        fprintf('problème')
    end
    VOL_IMMERGE = VOL_IMMERGE +
(Volume_triangle);
    X_CGi = X_CGi + ((DT.Points(index1,1) +
DT.Points(index2,1) + DT.Points(index3,1)) / 4) *
Volume_triangle;
    Y_CGi = Y_CGi + ((DT.Points(index1,2) +
DT.Points(index2,2) + DT.Points(index3,2)) / 4) *
Volume_triangle;
end

```

```

        Z_CGi = Z_CGi + ((3*ZLevel) / 4) *
Volume_triangle;
end

for i=1:length(vertexn)/3

    index = (i-1)*3;

    Volume_triangle =
(vertexn(index+1,1)*vertexn(index+2,2)*vertexn(index+
3,3) ...
-
vertexn(index+1,1)*vertexn(index+3,2)*vertexn(index+2
,3) ...
-
vertexn(index+2,1)*vertexn(index+1,2)*vertexn(index+3
,3) ...
+
vertexn(index+2,1)*vertexn(index+3,2)*vertexn(index+1
,3) ...
+
vertexn(index+3,1)*vertexn(index+1,2)*vertexn(index+2
,3) ...
-
vertexn(index+3,1)*vertexn(index+2,2)*vertexn(index+1
,3)) / 6;
    VOL_IMMERGE = VOL_IMMERGE +
Volume_triangle;
    X_CGi = X_CGi + ((vertexn(index+1,1) +
vertexn(index+2,1) + vertexn(index+3,1)) / 4) *
Volume_triangle;
    Y_CGi = Y_CGi + ((vertexn(index+1,2) +
vertexn(index+2,2) + vertexn(index+3,2)) / 4) *
Volume_triangle;
    Z_CGi = Z_CGi + ((vertexn(index+1,3) +
vertexn(index+2,3) + vertexn(index+3,3)) / 4) *
Volume_triangle;
end
X_CGi = X_CGi/VOL_IMMERGE;
Y_CGi = Y_CGi/VOL_IMMERGE;
Z_CGi = Z_CGi/VOL_IMMERGE;
fprintf('LE VOLUME IMMERGÉ EST DE: %10.5e
mm^3\n',VOL_IMMERGE);
fprintf('LE CENTRE DE POUSSÉE D"ARCHIMÈDE
EST POSITIONNÉ EN: X_CGi= %10.2e; Y_CGi=
%10.2e; Z_CGi= %10.2e [mm]
\n',X_CGi,Y_CGi,Z_CGi);
F_archi = 1000 * 9.81 * VOL_IMMERGE*1E-9;%[N]

Mx = F_archi * (Y_CGi-Y_CG)/1000;%[N·m]

My = F_archi * (X_CGi-X_CG)/1000;%[N·m]

end

fprintf('LA POUSSÉE D"ARCHIMÈDE EST DE:
F_ARCHI= %10.2e; [N] \n',F_ARCHI);

```

```

fprintf('LES MOMENTS CRÉES PAR LA POUSSÉE
D"ARCHIMÈDE AUTOUR DU CG SONT DE: Mx=
%10.2e [N·m] et My= %10.2e; [N·m] \n',Mx,My);
% affichage
%coque complète
if nnz(Trislice) > 0
    for i=1:length(vertex)/3
        tri(i,1) = (i-1)*3+1;
        tri(i,2) = (i-1)*3+2;
        tri(i,3) = (i-1)*3+3;
    end
    figure(2);

    trisurf(tri,vertex(:,1),vertex(:,2),vertex(:,3),ones(length(v
ertex(:,1)),1));
    axis equal;

%coque immergé
hold on;

for i=1:length(vertexn)/3
    tri2(i,1) = (i-1)*3+1;
    tri2(i,2) = (i-1)*3+2;
    tri2(i,3) = (i-1)*3+3;
end

    trisurf(tri2,vertexn(:,1),vertexn(:,2),vertexn(:,3),2*ones(l
ength(vertexn(:,1)),1));
    hold off;

end
else

    fprintf('LE VOLUME EST TOTALEMENT
IMMERGÉ EST DE: %5.2e mm^3\n',Volume_total)
    F_archi = 1000 * 9.81 * Volume_total*1E-9;%[N]
    Mx = 0;%[N·m]
    My = 0;%[N·m]
    fprintf('LA POUSSÉE D"ARCHIMÈDE EST DE:
F_ARCHI= %10.2e; [N] \n',F_ARCHI);
    fprintf('LES MOMENTS CRÉES PAR LA POUSSÉE
D"ARCHIMÈDE AUTOUR DU CG SONT DE: Mx=
%10.2e [N·m] et My= %10.2e; [N·m] \n',Mx,My);

    % affichage
    for i=1:length(vertex) /3
        tri(i,1) = (i-1)*3+1;
        tri(i,2) = (i-1)*3+2;
        tri(i,3) = (i-1)*3+3;
    end
    figure(1);

    trisurf(tri,vertex(:,1),vertex(:,2),vertex(:,3),ones(length(v
ertex(:,1)),1));
    axis equal;
end

```


ANNEXE VIII

LECTURE D'UN FICHIER AU FORMAT .STL

Dans le domaine de la modélisation 3D, des formats neutres permettent de passer d'un logiciel à un autre facilement. Les plus connus et utilisés sont les fichiers dits surfaciques tels que IGES (*initial Graphics Exchange Specification*) ou STL (*Stereolithography Interface Specification*) ou volumique tel que le STEP (*Standard for The Exchange of Product model data*). Actuellement, l'avancée des domaines du prototypage rapide et de la fabrication assistée par ordinateur mettent le format .STL sur le devant de la scène.

Ce fichier est de format binaire ou ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Les surfaces sont modélisées par de multiples triangles, dont la structure ASCII est décrite ci-dessous (Wu et Cheung, 2006). Cependant, le format ASCII (voir Algorithme-A VIII-1) occupe beaucoup d'espace, le format binaire (voir Algorithme-A VIII-2) est donc plus économe en terme d'espace facilitant également l'extraction des données.

```
solid solid_name
  <facet list>
    facet normal NxNyNz
      outer loop
        vertex X1Y1Z1
        vertex X2Y2Z2
        vertex X3Y3Z3
      endloop
    endfacet
  ...
endsolid
```

où (N_x, N_y, N_z) est le vecteur normal à la surface du triangle et (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) et (X_3, Y_3, Z_3) sont les coordonnées des sommets du triangle.

Algorithme-A VIII-1 Traduction d'un fichier .STL écrit en format ASCII

```
UINT8[80] – Titre du fichier
UINT32 – Nombre de triangles
Pour chaque triangle
REAL32[3] – Coordonnée du vecteur normal à la surface du triangle
REAL32[3] – Sommet 1
REAL32[3] – Sommet 2
REAL32[3] – Sommet 3
UINT16 – Attribute byte count
end
```

Algorithme-A VIII-2 Traduction d'un fichier .STL écrit en format binaire

Il est ainsi facile de lire les caractéristiques des triangles les uns à la suite des autres grâce à une boucle *for* dans le programme tel que MATLAB.

ANNEXE IX

CARACTERISTIQUE HYDRODYNAMIQUE DE LA FORCE DE GOUVERNE DES SAFRANS PORTEURS

Xflr5 a été utilisé pour déterminer les coefficients de portance des parties immergées du safran porteur à deux vitesses différentes. Ces coefficients de portance sont utilisés dans le calcul des forces sur le safran pour l'analyse structurale du CHAPITRE 5.

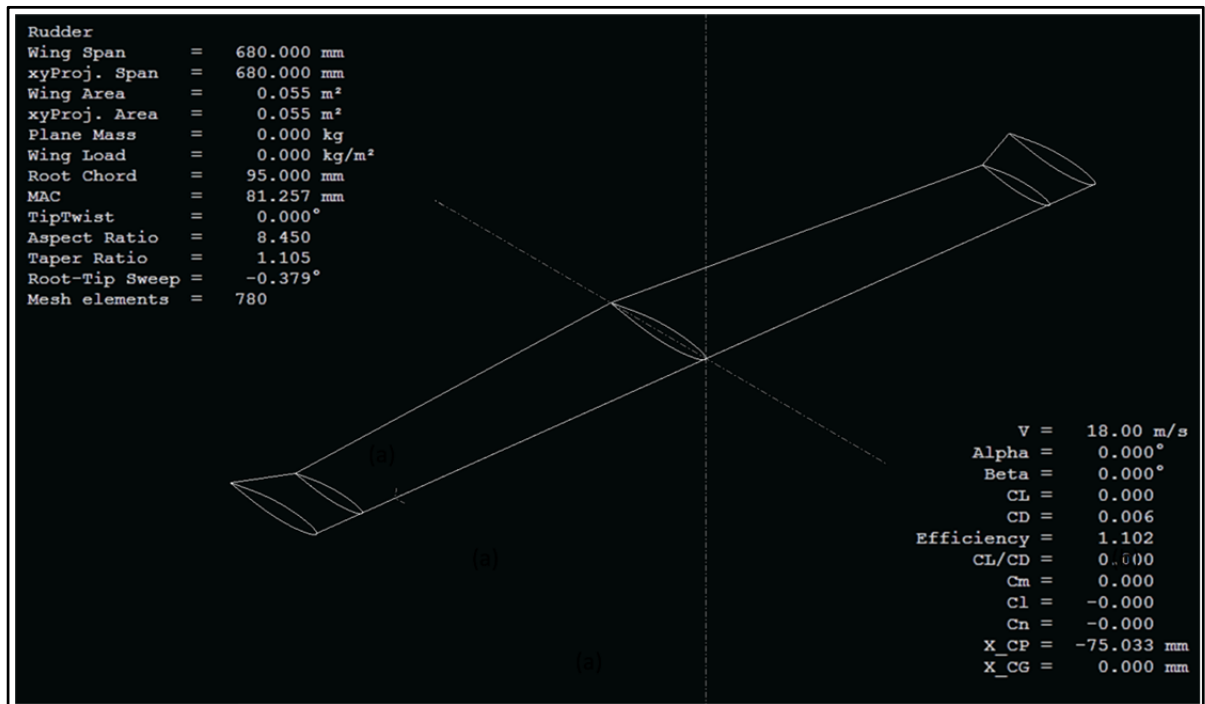


Figure-A IX-1 Partie verticale du safran porteur sous Xflr5 pour une vitesse de 35 nœuds

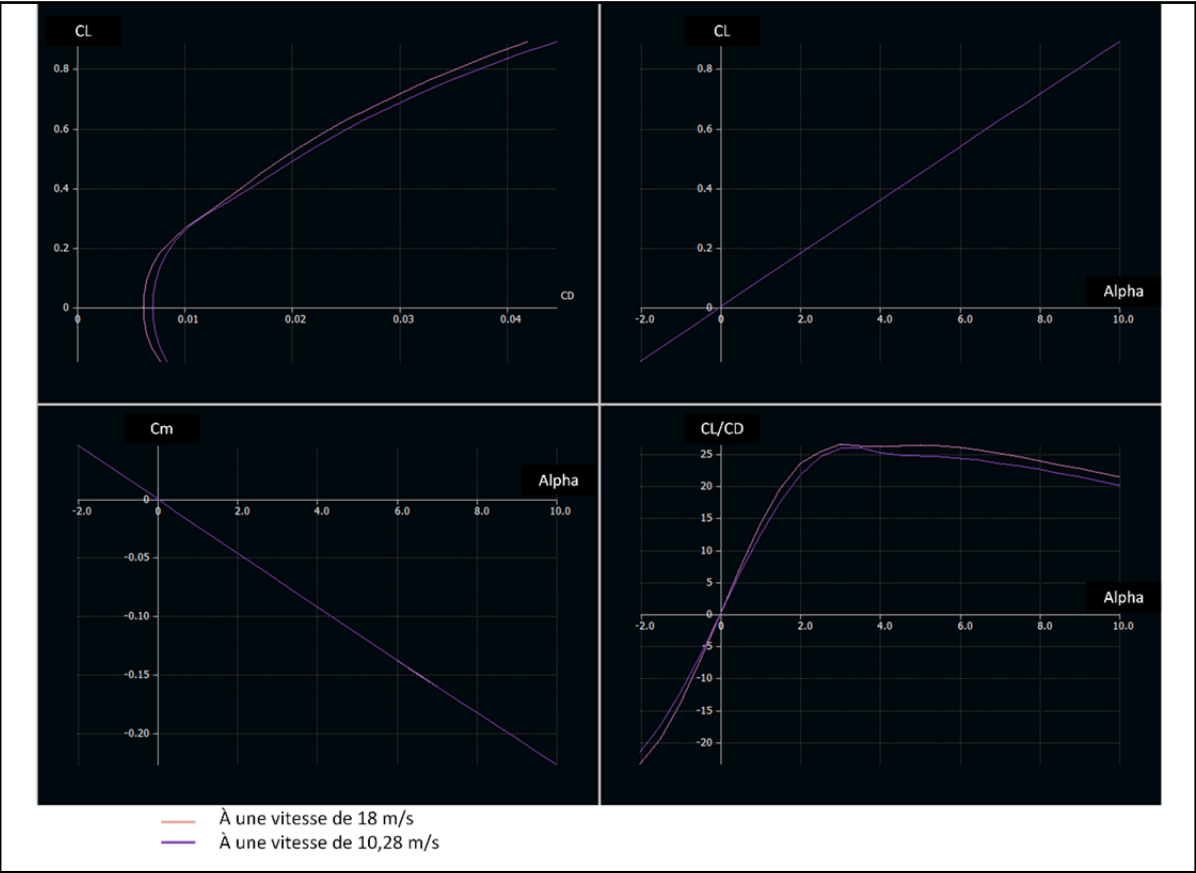


Figure-A IX-2 Études hydrodynamique de la partie verticale du safran porteur sous Xflr5 pour une vitesse de 35 nœuds

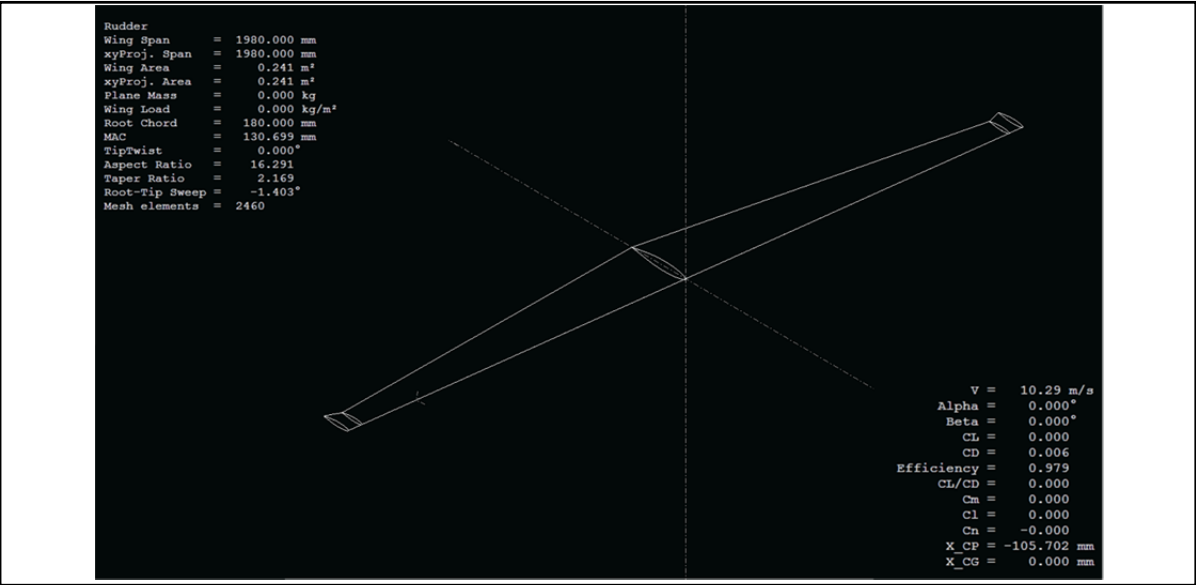


Figure-A IX-3 Partie verticale du safran porteur sous Xflr5 pour une vitesse de 20 nœuds

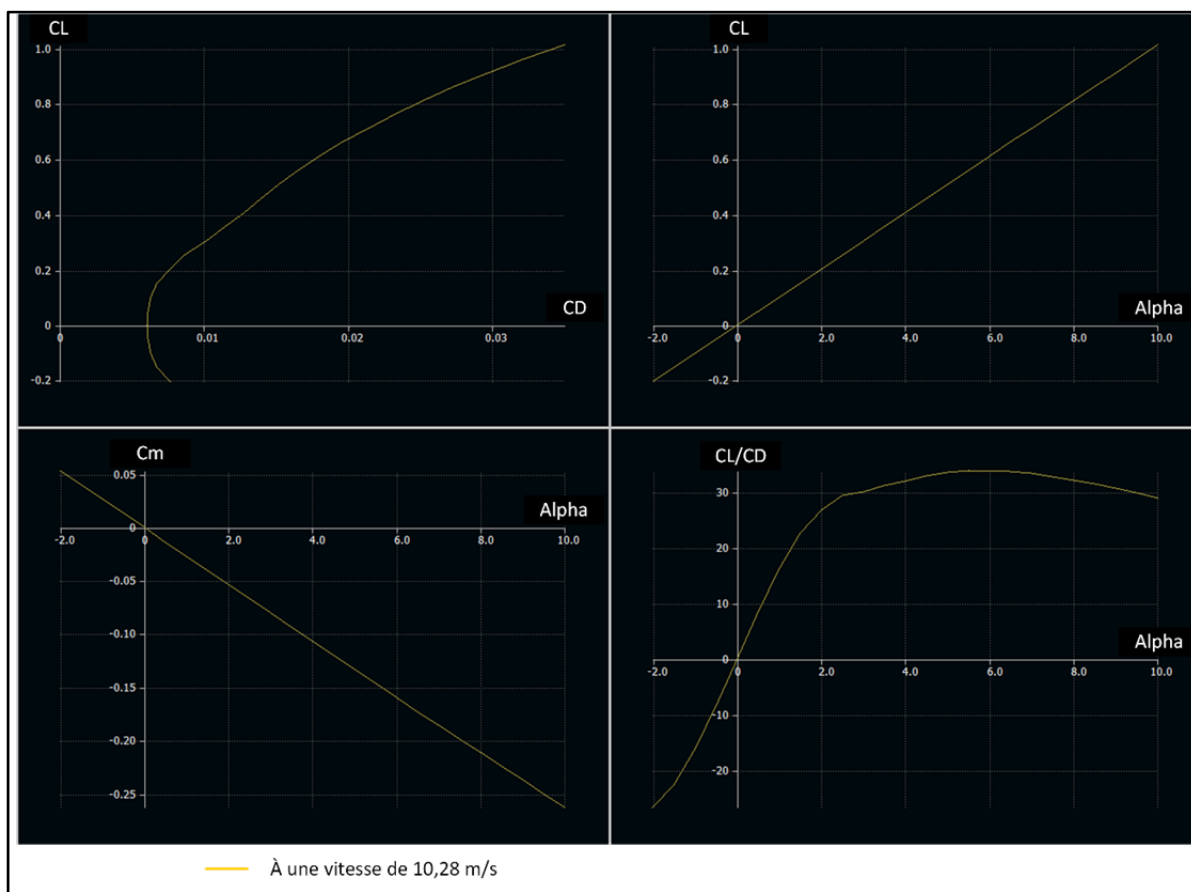


Figure-A IX-4 Études hydrodynamique de la partie verticale du safran porteur sous Xflr5 pour une vitesse de 20 nœuds

ANNEXE X

CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR L'OPTIMISATION

Fibre de carbone/époxy

La fibre de carbone est employée comme renforts et de l'époxy comme matrice. Les fibres de carbones utilisées pour l'optimisation du CHAPITRE 5 sont les suivantes :

- TC-09-U : fibre unidirectionnelle, épaisseur infusée de 0,68 mm ($\approx 0,028$ po);
- TC-06-T (2x2 twill) : fibre biaxiale, épaisseur infusée de 0,22 mm ($\approx 0,009$ po).

Les deux matériaux sont disponibles en rouleau allant jusqu'à 110 verges pour une largeur de rouleau de 50 po. Les caractéristiques de ces matériaux proviennent d'une base de données interne. Elles sont résumées dans le Tableau-A X-1.

Mousse structurale

La mousse est la matière utilisée pour remplir le volume vide entre les deux laminés de la dérive. Un module d'élasticité E de 44MPa, un module de cisaillement G_{12} de 20MPa un coefficient de poisson ν_{12} de 0,3 ont été utilisés (voir Tableau-A X-1).

Tableau-A X-1 Caractéristiques des matériaux utilisés

	Époxy/TC-09-U	Époxy/TC-06-T	Mousse
E_1 [MPa]	89 700	54 000	44
E_2 [MPa]	6 800	50 000	44
ν_{12} [MPa]	0,27	0,0031	0,3
G_{12} [MPa]	2 360	4 000	20
G_{1z} [MPa]	2 360	4 000	-
G_{2z} [MPa]	2 360	4 000	-
ρ [kg/m ³]	1 600	1 600	250
X_t [MPa]	1213	600	
X_c [MPa]	535	400	
Y_t [MPa]	20,5	600	
Y_c [MPa]	100	400	
S [MPa]	30	50	

BIBLIOGRAPHIE

- Altair. 2014. *Practical Aspects of Structural Optimization : A Study Guide*. Coll. « Altair University », 284 p.
- AOC. [s.d.]. *AOC Resins : RTM Light*. En ligne. < http://www.aoc-resins.com/web/site/pages-prod/RTM_Light >. Consulté le 10 novembre 2015.
- Aussedat, A., A. de Castel et L. Tissot. [s.d.]. *Les hydrofoils : Historique*. En ligne. < <http://leshydrofoils.weebly/historique.html> >. Consulté le 20 août 2015.
- Baker, A. A., S. Dutton et D. Kelly. 2004. *Composite materials for aircraft structures*, 2e éd. Reston, Virg.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 597 p.
- Beaver, B., et J. Zselezky. 2009. « Full scale measurements on a hydrofoil International Moth ». In *19th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, CSYS*. (Annapolis, MD, United states, March 20-21 2009), p. 177-196. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Bendsøe, M. P., et O. Sigmund. 2003. *Topology optimization : theory, methods, and applications*, 2e éd. corr. Berlin; New York: Springer, 370 p.
- Bruyneel, M., P. Duysinx et C. Fleury. 2002. « A family of MMA approximations for structural optimization ». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 24, no 4, p. 263-276.
- Chevalier, F.. 2015. *La grande histoire de la PETITE COUPE*. Paris : Éditions de La Martinière, 207 p.
- Cleynen, O.. 2011. « Wing profile nomenclature (fr) ». In *Commons Wikimedia*. En ligne. < [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_profile_nomenclature_\(fr\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_profile_nomenclature_(fr).svg) >. Consulté le 10 février 2014.
- CW Composites World. 2015. « Light Resin Transfer Molding ». In *CompositesWorld*. En ligne. < <http://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/Closed-Mold-Process/Resin-Transfer-Molding> >. Consulté le 23 novembre 2015.
- Drela, M.. 2007. *A User's Guide to MSES 3.05*. MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 46 p.
- DutchTreat. 2013. « AC72 New Zealand Aotearoa San Francisco 01 ». In *Wikimedia Commons*. En ligne. < https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AC72_New_Zealand_Aotearoa_San_Francisco_01.jpg >. Consulté le 20 octobre 2015.

- Forcier, L.-C.. 2010. « Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de technologie supérieure, 181 p.
- Fossati, F. 2009. *Aero-hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts: The Science Behind Sailing Yachts and Their Design*. London : A&C Black Publishers Ltd. 354 p.
- Grassi, C., M. Foresta, G. Lombardi et J. Katz. 2013. « Study of rigid sail aerodynamics ». *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part B: International Journal of Small Craft Technology*, vol. 155, no PART B1, p. B13-B24.
- Guglielmetti, P., et F. Monsonnec. 2015. *Foilers ! : le blog des bateaux volants* . En ligne. < <https://foils.wordpress.com> >. Consulté le 2 octobre 2015.
- Haack, N.. 2011. « C-CLASS catamaran wing performance optimisation ». Thesis of master of philosophy in the faculty of engineering and physical sciences, University of Manchester, 103 p.
- Hutchinson, J. R., P. J. Schubel et R. Said. 2014. « A coupled structural and flow approach for numerical simulation of the light resin transfer moulding process. I: Model outline ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no 14, p. 1332-1338.
- Hutchinson, J. R., P. J. Schubel et N. A. Warrior. 2011. « A cost and performance comparison of LRTM and VI for the manufacture of large scale wind turbine blades ». *Renewable Energy*, vol. 36, no 2, p. 866-871.
- Hydroptère. 2014. « Le Rêve ». In *Hydroptère*. En ligne. < <http://hydroptere.com/fr/le-reve/l-histoire/> >. Consulté le 18 août 2015
- Jones, R. T. 1990. *Wing theory*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 216 p.
- Kassapoglou, C.. 2013. *Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures*, 2e éd. John Wiley & Sons, Ltd, 410 p.
- Khayyat, M., et M. Rad. 2009. « Comparison final velocity for land yacht with a rigid wing and cloth sail ». *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 22, no 1, p. 59-68.
- Knovel, et G. Akozalı. 2001. *Handbook of composite fabrication*. Shawbury, U.K.: Rapra Technology Limited, 196 p.
- Knovel, et C. Niu. 2010. *Composite airframe structures practical design information and data*, 3e éd. Hong Kong: Conmilit Press, 688 p.
- Knovel, et R. Von Mises. 1959. *Theory of flight*. New York : Dover Publications, 629 p.

- Kundu, P. K., I. M. Cohen, D. R. Dowling, P. S. Ayyaswamy et H. H. Hu. 2012. *Fluid mechanics*, 5e éd. Coll. « Multimedia fluid mechanics ». Amsterdam, U.K. ; Waltham, Mass.: Elsevier , 891 p.
- MacLane, D. T. 2000. « The Cogito project: Design and development of an international C-Class Catamaran and her successful challenge to regain the little America's cup ». *Marine Technology*, vol. 37, no 4, p. 163-184.
- Michaud, F.. 2014. « Conception et optimisation d'une peau en composite pour une aile adaptative ».Mémoire de maîtrise en génie aérospacial, Montréal, École de technologie supérieure, 216 p.
- Munson, B. R., D. F. Young et T. H. Okiishi. 1998. *Fundamentals of fluid mechanics: student solutions manual*. vol. 2. Wiley, 208 p.
- Navy, U.S. 1963. « The experimental U.S. Navy hydrofoil USS High Point (PCH-1) underway ». In *Commons Wikimedia*. En ligne. < [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USS_High_Point_\(PCH-1\)_underway_c1963.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USS_High_Point_(PCH-1)_underway_c1963.jpg) >. Consulté le 10 octobre 2015.
- NetComposites. 2015a. « Infusion Processes ». In *NetComposites*. En ligne. < <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/infusion-processes/> >. Consulté le 29 août 2015.
- NetComposites. 2015b. « Vacuum Bagging ». In *NetComposites*. En ligne. < <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/vacuum-bagging/> >. Consulté le 25 août 2015.
- Pline. 2006. « Schéma allures (marine). ». In *Commons Wikimedia*. En ligne. < <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema-allures.jpg> >. Consulté le 25 octobre 2015.
- Rose, S., et A. Abrams. 2012. « The History of Hydrofoils ». In *Dark Roasted Blend*. En ligne. < <http://www.darkroastedblend.com/2012/07/history-of-hydrofoils.html?m=1> >. Consulté le 30 septembre 2015.
- Rozvani, G. 2001. « Aims, Scope, Methods, History and Unified Terminology of Computeraided Topology Optimization in StructuralMechanics ». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, p. 90–108.
- Schubel, P. J. 2010. « Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade producedby vacuum infusion (VI) ». *Renewable Energy*, vol. 35, no 1, p. 183-189.

- Speer, T.. 2004. « Appendix B: Generic hydrofoil tradestudy ». In *Tom Speer's Home page*. En ligne. < <http://www.tspeer.com/Hydrofoils/generic.pdf> >. Consulté le 20 janvier 2014.
- Speer, T. 1999. « Low Reynolds Number Hydrofoils ». In *Tom Speer's Home page*. En ligne < <http://www.tspeer.com/Hydrofoils/h105/h105.htm> >. Consulté le 10 février 2014.
- Svanberg, K.. 1987. « Method of moving asymptotes - a new method for structural optimization ». *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, no 2, p. 359-373.
- Thomas, H., M. Zhou et U. Schramm. 2002. « Issues of commercial optimization software development ». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 23, no 2, p. 97-110.
- Vanderplaats, G. N.. 1984. *Numerical optimization techniques for engineering design : with applications*. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 333 p.
- Venkataraman, P. 2002. *Applied optimization with MATLAB programming*. New York : J. Wiley, 398 p.
- Viollet, P. L.. 2002. *Mécanique des fluides appliquée : écoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour des structures et dans l'environnement*, 2e éd. revue et corr. Paris: Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 367 p.
- Wikipedia. 2015. « Record de vitesse à la voile ». In *Wikipedia*. En ligne. < https://fr.wikipedia.org/wiki/Record_de_vitesse_%C3%A0_la_voile >. Consulté le 15 octobre 2015.
- Wu, T., et E. H. M. Cheung. 2006. « Enhanced STL ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, no 11-12, p. 1143-1150.
- Zhou, M., N. Pagaldipti, H. L. Thomas et Y. K. Shyy. 2004. « An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization ». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no 5, p. 308-317.