



Optimisation CFD / FSI des performances de voiles de windsurf / windfoil destinés aux hautes vitesses

Segula Technologies



Rapport de stage de 3^{ème} : année : DUPONT Ronan

Parcours : MOCA, PHYMER

Enseignant référent : M. Frederic GOLAY

Tuteur encadrant : M. Laurent LANQUETIN

Année Universitaire 2020/2021

SOMMAIRE

1	<i>Contexte scientifique et technique du projet</i>	10
2	<i>Objectifs et performances.....</i>	11
3	<i>État de l'art</i>	12
3.1	<i>Windsurf et windfoil, une géométrie particulière.....</i>	12
3.2	<i>La voile</i>	12
3.2.1	Principe physique.....	12
3.2.2	Souples.....	13
3.2.3	Rigides	14
3.3	<i>Les facteurs limitant la vitesse du windsurfer.....</i>	15
3.3.1	Le poids du windsurfer.....	15
3.3.2	Décollement de la couche limite sur la voile	15
3.4	<i>Simulation numérique, indispensable à la conception</i>	16
3.4.1	Présentation des logiciels de calculs à notre disposition	16
3.4.1.1	ADINA	16
3.4.1.2	ANSYS FLUENT	17
3.4.1.3	OpenFOAM	17
3.4.2	Conditions limites	17
3.4.2.1	Inlet : modélisation du vent	17
3.4.2.2	Outlet et autres conditions limites.....	18
3.4.3	Les simulations CFD	18
3.4.4	Simulations CFD/FSI	20
3.4.4.1	Mise en équation du problème	20
3.4.4.2	Résolution d'un problème de FSI	21
3.4.4.3	Couplage fluide-structure avec ADINA	23
3.4.4.4	Exemple d'un cas fluide-structure grande déformation	25
3.5	<i>Méthodes d'optimisation de la voilure</i>	26
3.5.1	Optimisation multidisciplinaire	26
3.5.2	Innovations provenant des compétitions nautiques	27
3.5.2.1	Voile souple de l'American's Cup	27
3.5.2.2	Voiles rigides.....	27
<i>Incertitudes et difficultés techniques</i>		28
4	<i>Présentation des travaux de R&D.....</i>	29
4.1	<i>Démarche de travail.....</i>	29
4.1.1	Simulations CFD/FSI sur ADINA.....	29
4.1.1.1	Simulations aérauliques	30
4.1.1.2	Simulations fluide-structure	30
4.1.2	Optimisation de voiles	30

4.2 Description des travaux réalisés	31
4.2.1 Cas-test de référence NACA0012 à Re=100 000 – Fluent - ADINA	31
4.2.1.1 Description du problème	31
4.2.1.2 Maillage	32
4.2.1.3 Paramètres de simulation	32
4.2.1.4 Résultats	32
4.2.1.5 Axes d'amélioration d'ADINA	33
4.2.2 Coordination Fluent, OpenFoam avec nos paramètres d'étude, Reynolds : 1 million.	35
4.2.3 Cas-test NACA0012 avec variation des nombres de Reynolds sans incidence, ajout du modèle $k - \omega - \gamma$ transition	35
4.2.4 Développement d'un modèle aérodynamique CFD sur ADINA	38
4.2.4.1 Géométrie du problème	38
4.2.4.2 Condition limite du problème	39
4.2.4.3 Maillage	39
4.2.4.4 Paramètres de la simulation	40
4.2.4.5 Résultats de la simulation.....	40
4.2.5 Développement d'un modèle 2D en modélisant le mât – ADINA / Fluent	42
4.2.5.1 Géométrie locale du problème.....	44
4.2.5.2 Géométrie globale	45
4.2.5.3 Maillage	45
4.2.5.4 Conditions limites.....	46
4.2.5.5 Paramètres de simulation	46
4.2.5.6 Résultats Adina	46
4.2.5.1 Résultats Fluent.....	47
4.2.5.2 Comparatifs ADINA – Fluent.....	47
4.2.6 Développement d'un modèle 3D en modélisant le mât	48
4.2.7 Développement d'un modèle FSI – 2D	49
4.2.7.1 Quelques conditions du problème	50
4.2.7.2 Description du modèle	50
4.2.7.3 Maillage	50
4.2.7.4 Condition limite	51
4.2.7.5 Paramètres de simulation	51
4.2.7.6 Comparaison des résultats sur différentes épaisseurs.....	51
4.2.7.7 Comparaison des résultats sur différents modules d'Young	52
4.2.8 Développement d'un modèle FSI 3D	52
4.2.8.1 Description du modèle et maillage.....	52
4.2.8.2 Condition limite	53
4.2.8.3 Paramètres de simulation	53
4.2.8.4 Comparaison des résultats différentes épaisseurs et différents modules d'Young	53
4.3 Conclusion	54
5 ProgrÈs scientifiques et/ou techniques	55
5.1 Valeur ajoutée	55
5.2 Perspectives	55
6 Références bibliographiques	56
7 Annexes.....	57
7.1 Routine python d'interpolation linéaire points par points pour les données de vent	57

7.2	Loi paroi, théorie du $y +$	57
7.3	Modèle $k - \omega$ SST – gamma transitoire.....	60
8	<i>Résumé :</i>	62
9	<i>Abstract :</i>	62

Table des figues

Figure 1: Géométrie de windsurf et windfoil.....	12
Figure 2: Principe physique d'une aile et écoulement autour de celle-ci	13
Figure 3: Vrillage du vent en fonction de l'altitude.....	13
Figure 4: Description d'une aile rigide.....	14
Figure 5: Équilibre du moment de gîte.....	15
Figure 6: Décollement de la couche limite.....	16
Figure 7: Système de camber (inducer et simple).....	16
Figure 8: Conditions de vent en fonction de l'altitude	17
Figure 9: Conditions de glissement.....	18
Figure 10: Comparaison des méthodes aérodynamiques en temps de calcul et précision ..	19
Figure 11: AC72	20
Figure 12: Schématisation du couplage fluide-structure	21
Figure 13: Méthode ALE sur le problème [12]	22
Figure 14: Maillage SAM sur une aile NACA 0012	23
Figure 15: Première méthode couplage fluide-structure	24
Figure 16: Deuxième méthode couplage fluide-structure	24
Figure 17: Split-nodes	25
Figure 18: Résultats en amplitude du cas-test [10]	26
Figure 19: Voile de l'America's Cup.....	27
Figure 20: Description problème NACA 0012.....	31
Figure 21: Maillage sur ADINA (gauche) et Fluent (droite).....	32
Figure 22: Second maillage plus régulier	36
Figure 23: Simulation FLUENT sur NACA0012 (gauche) et références (gauche).....	36
Figure 24: Intermittence autour d'une lame de turbomachine	37
Figure 25: Résultats avec le modèle gamma transitoire	37
Figure 26: Géométrie globale de la simulation CFD.....	38
Figure 27: Géométrie locale de la simulation CFD.....	38
Figure 28: Inlet de vent: gradient/vrillage vu de côté et dessus	39
Figure 29: Maillage de la simulation CDF	39
Figure 30: Inflation autour de la voile.....	40
Figure 31: Champs de vitesse en coupe à z=1m	41
Figure 32: Champs de pressions intrados/extrados et coupe en z=2m.....	41
Figure 33: Force de trainée (selon x).....	41
Figure 34: Force de portance (poussée vélique) (selon y)	42
Figure 35: Force verticale (selon z)	42
Figure 36: Coupe de la voile pour le modèle 2D	43
Figure 37: Mât - voile 2D simple	44
Figure 38: Mât - voile 2D avec camber	45
Figure 39: Mât - voile 2D façon American Cup	45

Figure 40: Maillage pour un modèle 2D avec mât.....	45
Figure 41: Tourbillon au niveau du bord d'attaque	47
Figure 42: Lines sur différentes hauteurs.....	48
Figure 43: Profils 2D sur différentes hauteurs	48
Figure 44: Quelques splines de la voile.....	49
Figure 45: Voile mince, épaisses à profils concaves et convexes.....	49
Figure 46: Maillge fluide et structure	51
Figure 47: Coefficients aérodynamiques sur différentes épaisseurs.....	51
Figure 48: Coefficients aérodynamiques sur différents modules d'Young.....	52
Figure 49: Domaine fluide de la simulation 3D FSI	52
Figure 50: Résultats en forces de trainée, portance et verticale sur une voile 3D	53

GLOSSAIRE

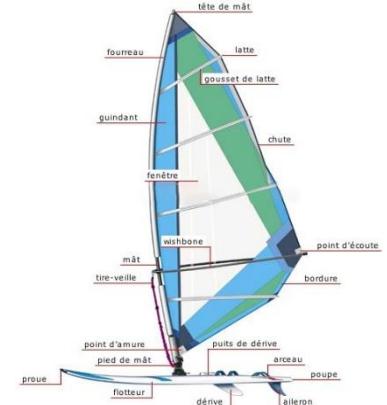
Bordure : Partie de la voile entre le point d'amure et le point d'écoute.

Chute : Partie de la voile entre la tête de mât et le point d'écoute.

Latte : Longue tige permettant de rigidifier la voile : elles permettent de donner la forme à la voile et sa courbure.

Wishbone : Partie tenue par le rider pour contrôler sa voile.

Flaps : Partie au niveau de la chute d'une voile rigide capable de pivotera afin de profiter de l'incidence du vent.



NOMENCLATURE

Cd : Coefficient de trainée

Cf : Coefficient de portance

Fx : Force de trainée

Fy : Force de portance

Fz : Force verticale

ρ : la masse volumique

S : la surface projetée du profil

Cp : Coefficient de pression

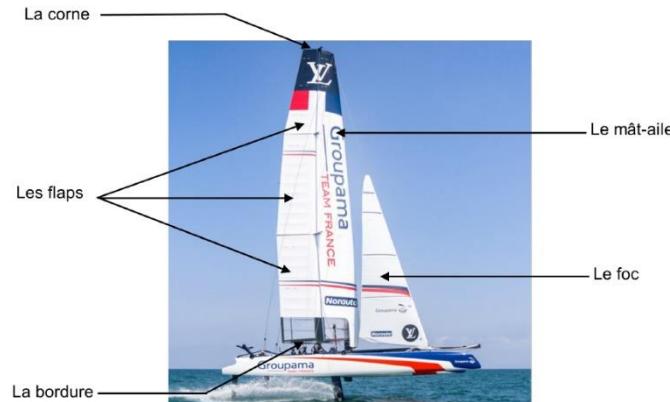
U : Vitesse du fluide

L : Longueur caractéristique

μ : viscosité dynamique

Re : Nombre de Reynolds = $\frac{\rho U L}{\mu}$

Δs : Taille de la première épaisseur de la couche limite



ACRONYMES

CFD : Computing Fluids Dynamics

FSI / IFS : Fluids-Structure Interactions / Interaction fluide-structure

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

RANS : Reynolds-averaged Navier-Stokes

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier dans un premier temps SEGULA de m'avoir accueilli dans ses locaux. Mais plus particulièrement M. Laurent LAQUENTIN et M. François-Xavier GERBEAUX de m'avoir encadré et encouragé sur mon projet. Je remercie aussi ORZALESI Mathieu de l'équipe de La Rochelle avec qui on a pu travailler.

Je remercie M. Veal du support d'ADINA pour avoir pris le temps de s'être démené afin d'essayer de trouver les meilleures solutions à mes problèmes. Ainsi que Thibaut ALLEAU de m'avoir aidé et guidé durant mes recherches sur les logiciels ADINA et FreeCad.

Je remercie l'équipe pédagogique de MOCA qui a toujours su être au top avec nous ! Plus particulièrement M.Golay, mon tuteur, qui a toujours été très soucieux derrière nous.

Je remercie l'équipe pédagogique du master PHYMER notamment M. Ourmières, mon tuteur, qui a su nous faire découvrir et aimer les sciences de la mer.

Je remercie l'équipe de stagiaires de Segula qui a été superbe pour garder une humeur positive tout au long du stage. Tout particulièrement l'équipe de pause : Chahla et son fromage Algérien, Mahandry et ses petits fouets, Guillaume et ses casse-têtes et William mon précieux.

Je remercie les ministres avec qui j'ai passé mes meilleures années, qui même loin de moi, ont continué à me soutenir et m'accompagner dans ma vie.

Je remercie ma famille et mon chat qui ont toujours été là dans les moments importants de ma vie.

SEGULA Technologies

SEGULA technologies est un groupe d'ingénierie français créé en 1985. Cette entreprise compte 13000 collaborateurs dans 30 pays. C'est une société anonyme à directoire. Elle est spécialisée dans le secteur d'activités de l'ingénierie, des études techniques. Sur l'année 2018, elle réalise un chiffre d'affaires de 23 530 400,00 €.

Le groupe est spécialisé dans les prestations de services auprès de grands groupes industriels français (PSA, Renault...). Ainsi ses domaines d'activités sont vastes. Ses projets concernent un certain nombre de grands secteurs industriels comme l'automobile, l'aéronautique, l'énergie, le ferroviaire, le naval, la pharmacie ainsi que Oil and Gas. Présent dans 30 pays, il intervient à tous les niveaux d'élaboration des projets, depuis les études jusqu'à l'industrialisation et la production. Son siège social se situe à Nanterre. Il possède différentes filiales dans plusieurs villes comme Trappes, Nantes ou Toulouse.

De l'exploration de nouvelles pistes de recherche à la réalisation de produits, d'équipements ou d'ouvrages, SEGULA tient à développer des solutions à la fois innovantes, commercialisables et compétitives. Leur service Recherche et Innovation (R&I) tient une place majeure dans la stratégie de croissance de cette entreprise et fait structurellement partie de leur organisation. Il a permis de travailler sur des innovations technologiques, comme la voiture autonome, l'avion électrique et le stockage d'énergie sous-marine avec le projet REMORA.

Cette recherche d'innovation a engendré de multiples alliances et collaborations avec des clients et des partenaires de renom comme Zephir.



1 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU PROJET

Lancé le 3 décembre 2020, le projet Zephir est dirigé par Marc Amerigo : project leader de l' « UltraPerformance » et Antoine Albeau : 25 fois champion du monde en windsurf. L'objectif principal de ce projet vise dans un premier temps à battre le record absolu de vitesse à voile soit 65,45 noeuds (121 km/h). Ce record est détenu par un « voilier » nommé Sailrocket 2, il a été conçu exprès pour le record : il n'est pas adapté à la navigation (il ne peut pas virer de bord). Dans un second temps, à mieux comprendre les phénomènes aérodynamiques à haute vitesses. Un prototype de voiles devrait être fabriqué pour le premier semestre de 2021 puis une planche révolutionnaire pour le second.

Actuellement, les entreprises et les recherches se tournent vers un nouveau marché : le loisir et la voile de compétition, accompagnés par une fulgurante amélioration des performances des embarcations (vitesse, remontée au vent, plage d'utilisation...). Afin de limiter les essais très coûteux et parfois difficiles à réaliser, il convient de développer des modèles numériques permettant d'évaluer les composantes aérodynamiques de ces embarcations. Les performances attendues suite à ces simulations sont d'obtenir un meilleur aérodynamisme sur les voiles et le foil ou flotteur.

Concernant la voile légère, le manque de vent était un problème pour s'adonner pleinement à ce loisir. L'ajout d'hydrofoil a été développé dans le but de diminuer la vitesse minimale de vent pour son utilisation. A contrario, trop de vent ou une mer agitée semblent incompatibles avec la maîtrise et l'exploitation du windfoil. En parallèle, la quête d'un nouveau record de vitesse est constamment présente chez les compétiteurs.

SEGULA Technologies s'intéresse à l'étude de problématiques technologiques complexes et à leur résolution, tant pour le compte de ses clients actuels que potentiels. Un projet de recherche et développement a été lancé en 2019 sur les méthodes d'optimisation des windfoils (principalement partie foil) et un second, complémentaire, a été lancé en 2021 sur la compréhension et l'optimisation des voiles de windfoils/windsurf.



2 OBJECTIFS ET PERFORMANCES

L'objectif du projet est de construire une méthodologie d'aide à la conception des voiles de windsurfs et windfoils, permettant de dépasser les limites actuelles de leur plage haute de vitesse. Il en découle une méthodologie permettant la simulation CFD d'une voile en 3D sous l'action du vent ainsi qu'une bonne compréhension du comportement de celle-ci selon les différents paramètres pouvant influencer ses performances. Comprendre ces paramètres et anticiper des phénomènes tels que le décollement de la couche limite qui donne naissance à une trainée conséquente, pourrait donner naissance à des méthodes permettant d'optimiser les performances de la voile.

Numériquement, les codes de calculs utilisés dans le domaine maritime en fluide et fluide-structure sont les « codes à panneaux » prenant en compte l'hypothèse d'écoulement potentiel : irrotationnel et non visqueux. Ces hypothèses étant très fortes à haute vitesses, il convient donc de développer des modèles de simulation RANS 3D/2D permettant de simuler un écoulement autour d'une voile considérée comme un solide déformable ou non. Les performances évaluées à l'issue de ces simulations seront les composantes aérodynamiques et principalement la finesse qui est le rapport de la portance sur la trainée.

Il y ensuite nécessité de développer un outil d'optimisation de la voilure d'un windsurf/windfoil permettant de limiter les phénomènes tels que le décollement de la couche limite et maximiser les forces de portances et trainées. Pour ce faire, il est possible de jouer sur la géométrie de la voile en changeant l'épaisseur, la courbure ou même les propriétés matériau de celle-ci. Pour aller plus loin, il serait judicieux de construire en CAO un prototype de voile destiné à la navigation des vitesses élevées (supérieures à 30 nœuds) et à terme permettre de battre les records actuels de windsurf et de windfoils respectivement 65.45 et 43.04 nœuds.

À terme, il s'agit de développer une méthode de conception optimale d'une voile pour windsurf et windfoil dans des conditions comme la haute vitesse.

3 ÉTAT DE L'ART

3.1 Windsurf et windfoil, une géométrie particulière

La géométrie des windsurfs et windfoils ainsi que le vocabulaire associé est représenté Figure 1 ci-dessous. Elles sont principalement constituées de matériaux en polymères ce qui permet de gagner en légèreté.

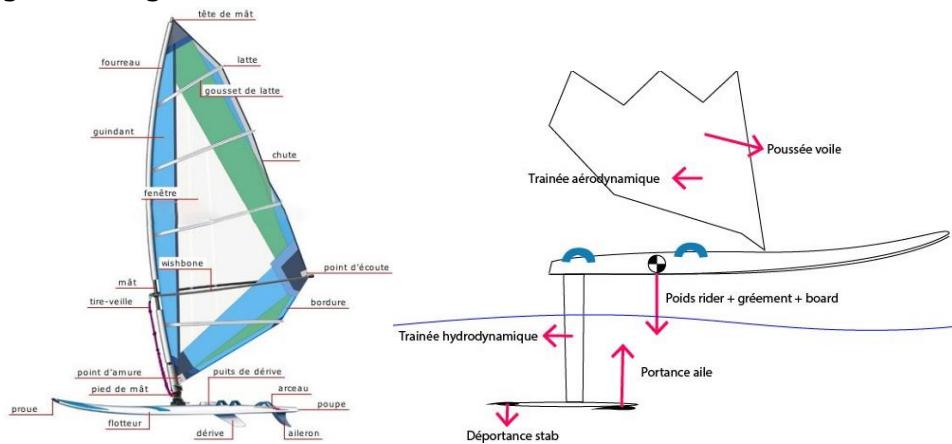


Figure 1: Géométrie de windsurf et windfoil

Comme pour un voilier classique, le vocabulaire de la voile est toujours assez universel avec les termes définissant chaque bord de la voile : *chute*, *bordure*, *mât* ; d'autres les points particuliers : *point d'écoute*, *point d'amure*, *pied de mât* et d'autres l'ossature de la voile : *fourreaux*, *lattes*, *wishbone*, *gousset de latte*.

3.2 La voile

Les voiles de windsurf et windfoil sont très similaires : elles ont toutes les deux la même architecture. C'est une architecture très analogue aux voiles classiques des voiliers. Le principal changement par rapport à un voilier classique est que le mât n'est pas fixé verticalement. Il y a donc des degrés de liberté supplémentaires ce qui complexifie son étude.

3.2.1 Principe physique

Le principe physique d'une voile repose sur le même que celui d'une aile d'avion. La différence étant qu'on ne cherche pas à créer une portance verticale mais horizontale. Il existe différents types de profils d'ailes mais le principe reste le même. La partie supérieure se nomme l'extrados et la partie inférieure l'intrados comme le montre la Figure 2.

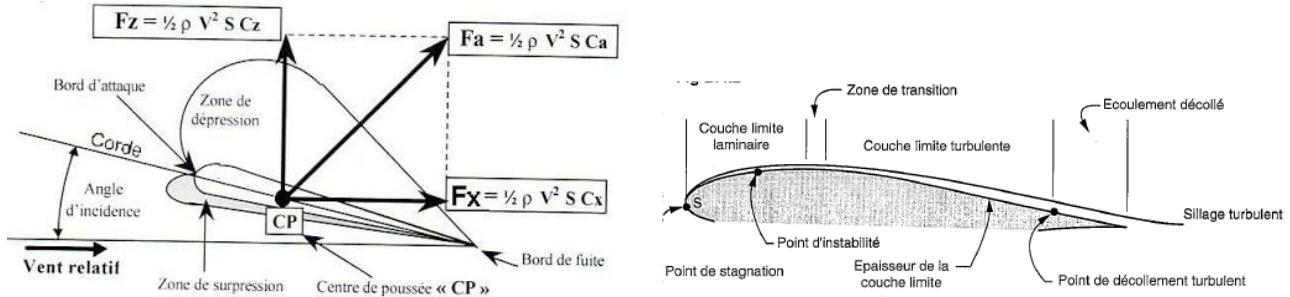


Figure 2: Principe physique d'une aile et écoulement autour de celle-ci

Lorsque l'écoulement fluide arrive sur le bord d'attaque jusqu'au bord de fuite, il y a création de force de portance et force de trainée définies respectivement par les formules suivantes :

$F_y = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_l$ et $F_x = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_d$ avec ρ : la masse volumique, S : la surface projetée du profil (dans le plan $(0,x,y)$) : surface perpendiculaire à la direction du fluide arrivant selon x (et donc z la portance), V : la vitesse du fluide relatif et C_l et C_d les coefficients de portance et trainée. F_y étant la force propulsive, on cherche à la maximiser et F_x la force de trainée que l'on cherche à minimiser. Pour optimiser les coefficients, on peut jouer sur la géométrie du profil ainsi que son incidence. Il existe de nombreuses études donnant les polaires de différents profils d'ailes 2D (Naca, Jedelsky, Clark Y, double courbure,...). Cependant, les polaires des voiles de voiliers / windsurfs sont gardés par les constructeurs.

3.2.2 Souples

L'ensemble des windsurf et windfoil sont équipés de voiles souples. L'avantage de celles-ci est qu'elles peuvent profiter de cette souplesse pour vriller facilement : ce qui est indispensable pour pouvoir profiter du vrillage du vent qu'on peut voir Figure 3 ci-dessous avec un voilier du Vendée Globe. En effet, le réglage d'une voile souple est beaucoup plus simple qu'une voile rigide. Cependant, elle a plusieurs inconvénients. En effet, il est difficile de lui donner la forme exacte que l'on souhaite. Une voile souple se déforme sous l'action du vent. Ainsi, même en réglant au maximum, on aura toujours une part de non-contrôle de la voile.



Figure 3: Vrillage du vent en fonction de l'altitude

3.2.3 Rigides

Une aile rigide comme ci-dessous Figure 4 fonctionne à la manière d'une aile d'avion avec les éléments suivants :

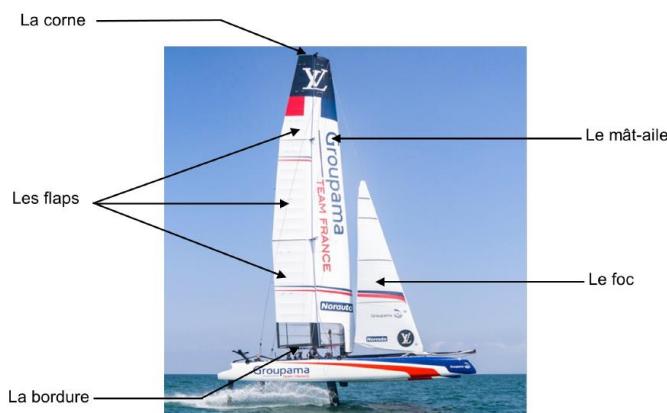


Figure 4: Description d'une aile rigide

Le camber : l'aile rigide a un fonctionnement similaire à l'aile d'avion. Il y a un angle réglable entre le mât-aile et les flaps appelé camber qui va permettre aux skippers d'adapter la force de portance induite selon la direction et la force du vent. Comme une voile basique, on peut choquer ou border l'aile rigide, c'est-à-dire donner de l'angle aux flaps ou les aligner avec le mât-aile pour gérer la force de portance. Cet angle peut varier de 0 à 45° en fonction des voiliers.

Le twister : comme la puissance n'est pas uniforme sur la voile rigide selon les conditions de vent, il est nécessaire de régler le haut de cette aile par rapport au bas. Pour cela l'aile rigide peut « twister » (vriller) sur elle-même grâce aux trois flaps pouvant effectuer une rotation maximum de 11°. Ainsi les skippers peuvent centrer puissance où ils le veulent sur l'aile et réduire le couple de gîte.

Les flaps : ils sont réglables et sont présents pour accompagner les lignes de courant le long de l'extrados du profil de l'aile rigide et limiter les décollements possibles des couches limites. Ils permettent d'optimiser la force de traînée.

En windsurf et en windfoil, il n'existe pas de voiles rigides. En effet, c'est une nouvelle technologie peu utilisée dans l'industrie navale. De plus, le vrillage du vent étant très fort au niveau de la hauteur d'une voile de windsurf, il est nécessaire de pouvoir profiter de cet avantage. Une voile rigide induirait un poids supérieur ce qui augmenterait la trainée sur le foil ou flotteur.

Le principal avantage de ces voiles est de produire beaucoup moins de traînées. Ainsi, pour une portance égale, la traînée est diminuée ce qui permet dans les faits de réduire la surface de voilure, tout en gardant une portance équivalente. La vitesse de pointe se trouve par conséquent augmentée. En contrepartie, ces voiles, souvent moins creuses ont une relance qui sera moins bonne.

3.3 Les facteurs limitant la vitesse du windsurfer

Dans cette étude, seulement les facteurs limitants sur la voile seront étudiés. En effet, les autres facteurs concernant le foil comme la ventilation, cavitation, stabilisation sont en étude sur le site d'Aytré [1].

3.3.1 Le poids du windsurfer

Une étude mécanique élémentaire sur le moment de gîte [2] (contrebalancé par le poids du rider) montre que la force de portance (Figure 5) est limitée à environ 0.4 fois le poids du rider.

Cette force est donc limitée dans l'absolu indépendamment de la forme du vent et des conditions.

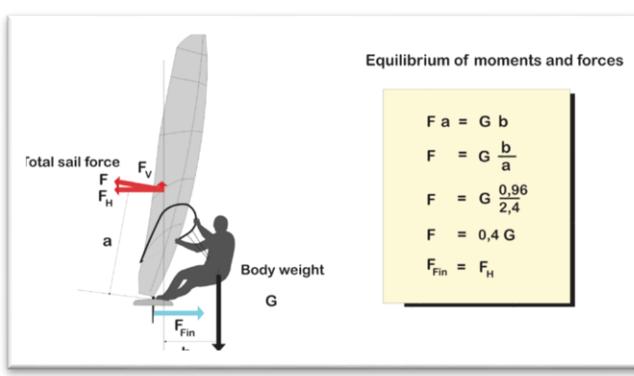


Figure 5: Équilibre du moment de gîte

Il convient de travailler directement sur les composantes aérodynamiques de la voile et de la planche afin d'optimiser la vitesse de l'embarcation. Des études entre le poids du wind-surfeur et la trainée induite sur le flotteur devront donc être menées afin d'avoir le meilleur compromis.

3.3.2 Décollement de la couche limite sur la voile

La couche limite est une zone d'interface entre un corps et le fluide. Elle apparaît à cause du phénomène de **viscosité** qui est l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement fluide. Lorsqu'un corps est en mouvement à une forte vitesse, il y a la possibilité qu'il y ait un décollement de la couche limite (Figure 2 et Figure 6): le fluide ne suit plus les contours du corps. Dans notre cas, la couche limite est soumise à un gradient de pression suffisamment important. Ceci induit une transition vers la turbulence et donc des tourbillons impactant directement la valeur de la force de trainée. Il est donc intéressant de comprendre à quel moment ce décollement va arriver. Un indicateur facilitant l'étude de la distribution des pressions autour de corps placé dans un écoulement fluide est le coefficient aérodynamique adimensionnel de pression : $C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$ où p est la pression statique au point considéré, p_∞ la pression statique de l'écoulement, U_∞ la vitesse de l'écoulement en entrée.

Avec celui-ci, on peut avec [3] estimer le moment où il y aura séparation de la couche limite.

Pour aller plus loin dans l'analyse, on pourrait artificiellement augmenter le poids du rider mais on arriverait rapidement à un poids requis aberrant pour battre des records de vitesses car la trainée de la planche augmenterait de même. Diminuer la hauteur de la voile pourrait être une solution mais il est nécessaire de garder les caractéristiques aérodynamiques.

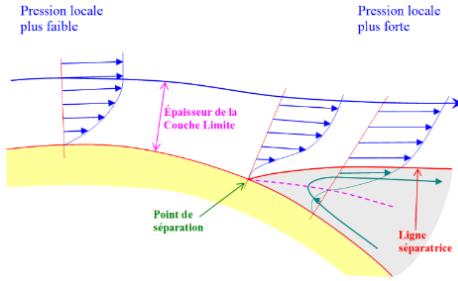


Figure 6: Décollement de la couche limite

Les tourbillons de ce décollement sont localisés au niveau du bord de fuite soit l'extrémité de notre voile : la chute. Il est donc intéressant de travailler la courbure du profil de la voile afin de limiter ce décollement. En effet, une courbure plus aérodynamique limitera le décollement des lignes de courant sur le profil.

Les voiles de vitesses ont souvent un dispositif appelé **camber simple** ou **camber inducer** (Figure 7) qui permet de changer la cambrure du profil pour pallier au problème de décollement.

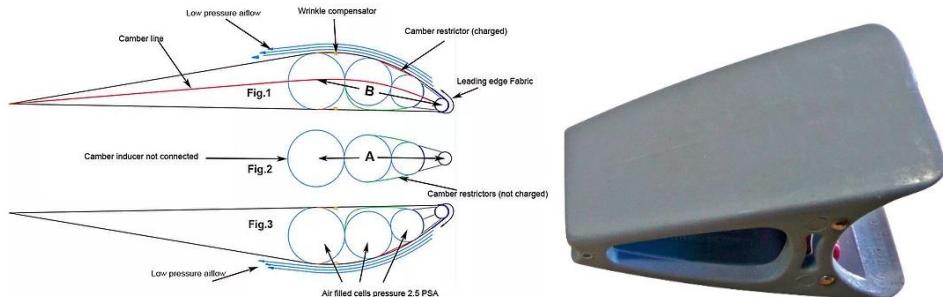


Figure 7: Système de camber (inducer et simple)

3.4 Simulation numérique, indispensable à la conception

3.4.1 Présentation des logiciels de calculs à notre disposition

3.4.1.1 ADINA



Le premier logiciel sur lequel la majorité de nos travaux vont se concentrer est ADINA. Il est utilisé dans l'industrie et le monde universitaire pour résoudre des problèmes structurels, de fluides, de transfert de chaleur et électromagnétiques. ADINA peut également être utilisé pour résoudre des problèmes multiphysiques, y compris les interactions fluide-structure et les problèmes thermomécaniques.

Sa méthode de résolution par défaut est une méthode principalement basée sur les éléments finis. Cette méthode [17], flow-condition-based interpolation (FCBI) est très adaptée pour les hauts nombres de Reynolds. C'est une méthode hybride d'éléments finis et de volumes finis. Pour la résolution fluide, il intègre des modèles de fermeture turbulente classiques comme $k - \omega$, $k - \varepsilon$, Spalart–Allmaras.

Ce logiciel est à disposition sur le site de Trappes et sera principalement utilisé pour les calculs fluide-structure (FSI) afin d'aider l'équipe de Aytré sur ce point-là. On cherchera à étudier le comportement de voiles sollicitées par le vent.

3.4.1.2 ANSYS FLUENT

Ansys Fluent est le leader commercial en termes de modélisation fluide. Il est considéré comme une référence dans ce domaine car il est très robuste. Sa méthode de résolution est basée sur les volumes finis. Il intègre des modèles de fermeture turbulente classiques comme $k - \omega$, $k - \varepsilon$, Spalart–Allmaras mais aussi des plus poussés comme LES, Reynolds Stress ou même $\gamma - R_e$.

Ce logiciel est à disposition sur le site de Trappes et sera utilisé pour les calculs CFD où l'on cherchera à étudier les composantes aérodynamiques de profils ou même d'objets 3D.

3.4.1.3 OpenFOAM



OpenFOAM est un logiciel de simulation multi-physiques open source. Comme Fluent, il base sa méthode de résolution par les volumes finis et intègre de même des modèles de fermeture turbulente classiques comme $k - \omega$, $k - \varepsilon$, Spalart–Allmaras. Ce code de calcul est compilable sur Linux. Il n'a donc pas d'interface, celui-ci n'est pas très intuitif.

Ce logiciel est à disposition sur le site de Aytré et sera utilisé pour les calculs CFD, il viendra en complément de Fluent.

3.4.2 Conditions limites

Afin de simuler au mieux les conditions réelles de navigation en windfoil, il est nécessaire que les conditions limites de la simulation comme les Wall, le vent, l'outlet,... soient bien paramétrées.

3.4.2.1 Inlet : modélisation du vent.

Afin de simuler au mieux les conditions de réels de vent, on utilisera les travaux du projet Windfoil à Aytré [1].

Un code de calcul a été développé pour permettre de calculer différents paramètres comme ceux des conditions du vent. Par exemple pour un vent réel à 10,25 noeuds et une incidence nulle, on obtient les courbes suivantes :

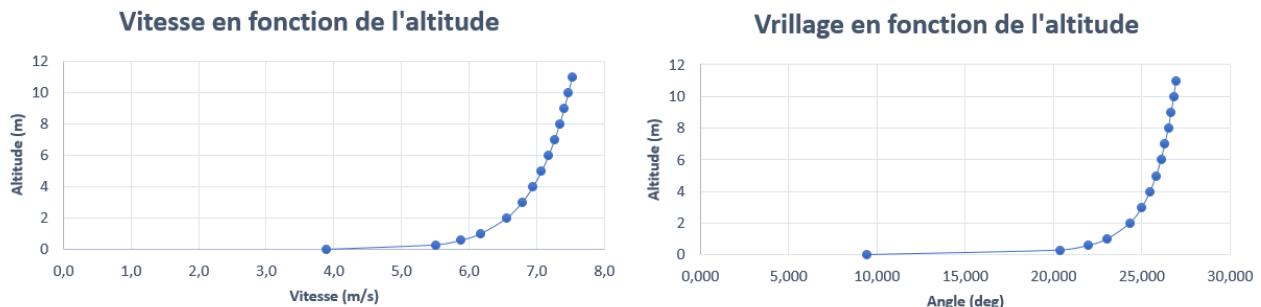


Figure 8: Conditions de vent en fonction de l'altitude

Une courbe représente la vitesse du vent en fonction de l'altitude : c'est le gradient du vent. La seconde la direction du vent en fonction de l'altitude : en effet, la direction du vent n'est pas uniforme en fonction de l'altitude comme on a pu voir précédemment sur la Figure 3. Les données de vent seront ensuite implémentables sur nos logiciels à l'aide de routines Python définissant des fonctions de surface. La condition d'entrée sur la surface sera une composante d'une surface définissant le gradient et une surface définissant le vrillage.

3.4.2.2 Outlet et autres conditions limites.

Afin de ne pas perturber l'écoulement d'air autour de la voile, on place la voile loin des parois et on paramètrera celles-ci de manière à ne pas influencer la vitesse et direction de l'écoulement. Pour des conditions de type « Wall », on peut mettre une condition de glissement ou non suivant la Figure 9 ci-dessous.

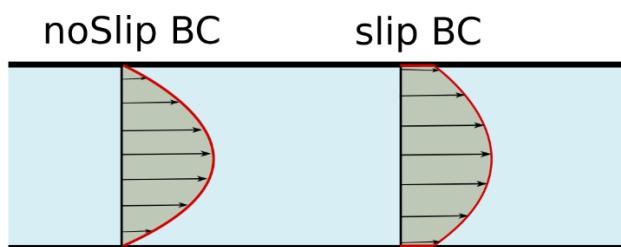


Figure 9: Conditions de glissement

Une condition de glissement nulle sera très adaptée pour des problèmes aéronautiques où l'on considérera cette condition sur l'ensemble du solide. La seconde condition, de glissement, sera plus adaptée pour les parois d'une soufflerie car cela ne perturbera pas l'écoulement autour du solide.

Pour la condition de sortie, on choisira simplement une condition de sortie à pression nulle (condition très classique en aéronautique). La condition sur la vitesse sera une condition de Neumann nulle (ie $\frac{\partial u}{\partial \vec{n}} = 0$ avec \vec{n} un vecteur normal à la surface de sortie et u une inconnue comme la vitesse).

3.4.3 Les simulations CFD

Les simulations numériques en CFD (Computational Fluid Dynamics) sont indispensables pour limiter les coûts expérimentaux. Elles permettent d'obtenir des données d'inconnues statiques comme la vitesse, pression, température,... sur un écoulement en chaque point d'un domaine défini avec un maillage.

Il est important de préciser qu'actuellement, aucune simulation numérique RANS 3D n'a été effectuée dans la littérature concernant les voiles de windsurf et windfoil. En effet, les simulations qui ont été faites sont effectuées avec des logiciels internes aux constructeurs de ces voiles (SailPack, North Sails). De plus, ces logiciels utilisent des **codes à panneaux** (ou

écoulements potentiels) prenant l'hypothèse d'un écoulement irrotationnel à viscosité négligeable.

Afin d'obtenir des résultats de simulation plus précis, la méthode RANS moyennant les équations de Navier-Stokes est préférable à utiliser car elle ne prend pas autant d'hypothèses que le code à panneaux. Elle est généralement couplée à une fermeture turbulente comme Spalart-Allmaras, k- ϵ (Standard, RNG, Realizable), k- ω SST (Shear Stress Transport). Prendre en compte la turbulence est indispensable pour des simulations « haute vitesses » où on aura nécessairement un nombre de Reynolds qui sera très élevé. Le détail des équations turbulentes ainsi que leurs plages d'utilisation est donné dans le cours d'introduction à la simulation numérique des écoulements [6].

Des simulations RANS de voiles ont été effectuées en 3D comme le montre les travaux de M. Lafforgue [4] décrivant des résultats 2D et 3D sur une voile. Il en découle une méthodologie pour effectuer les simulations ainsi qu'une conclusion sur les résultats comparant les codes à panneaux et la méthode RANS. Sans surprise, on observe sur la Figure 10 que les résultats en termes de précision sont meilleurs pour des simulations RANS qu'écoulements potentiels. Le temps pour obtenir des résultats est bien plus rapide numériquement (surtout pour les écoulements potentiels) qu'expérimentalement.

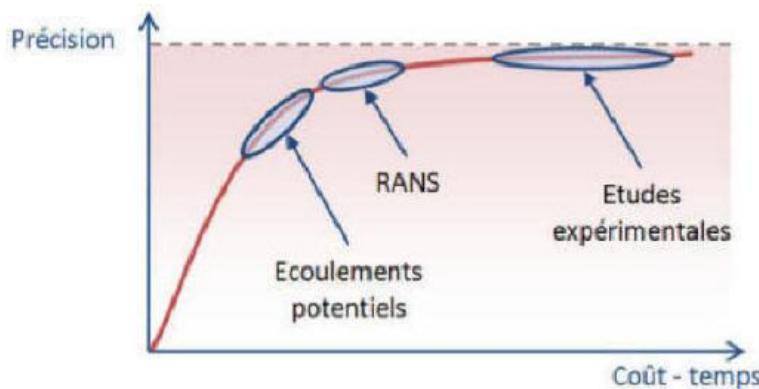


Figure 10: Comparaison des méthodes aérodynamiques en temps de calcul et précision

Contrairement à la méthode RANS qui consiste à résoudre un écoulement moyen et à modéliser les fluctuations par une viscosité turbulente. La méthode URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes) est une extension instationnaire du RANS qui permet de résoudre les très grandes (lentes) fluctuations temporelles de l'écoulement. Elle est utilisée dans l'article [10] qui effectue des simulations sur les voiles rigides d'un catamaran de l'America's Cup: AC72 Figure 11 ci-dessous.

**Figure 11: AC72**

Dans cette étude, ils étudient et comparent à des essais en soufflerie le comportement de la voile avec différents angles sur les *flaps* de la voile. Les coefficients aérodynamiques qu'ils ont obtenus ont été surestimés par la CFD.

3.4.4 Simulations CFD/FSI

En simulation numérique, les simulations fluides et structures sont très souvent dissociées. En effet, les équations de quantité de mouvement fluide et structure n'étant pas les mêmes, il n'est pas naturel de résoudre un couplage entre les deux.

Coupler ces équations fluide et structure relève d'un problème d'interaction fluide-structure (FSI). Utiliser des modèles de FSI pour notre problème est très pertinent afin de modéliser les interactions entre le vent et la voile. Ceci pourrait permettre d'étudier des phénomènes ou types de voiles difficiles à modéliser en soufflerie.

3.4.4.1 Mise en équation du problème

Par exemple, on peut considérer le problème avec le corps élastique suivant :

$\Gamma_N \quad \underline{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{F}_d$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho \ddot{u} + \mu \dot{u} = \operatorname{div}(\bar{\sigma}) + f_d & \text{sur } \Omega \\ \bar{\sigma} = \underline{\Lambda} : \varepsilon & \text{sur } \Omega \\ \bar{\sigma} \cdot \mathbf{n} = F_d & \text{sur } \Gamma_N \\ u = 0 & \text{sur } \Gamma_D \\ u(0) = u_0, \dot{u}(0) = \dot{u}_0 & \end{array} \right.$$

équation de la dynamique
loi de comportement

condition sur le bord
condition sur le bord

conditions initiales

On obtient alors la mise en équation ci-dessus avec les termes issus de la mécanique. Le but étant donc de déterminer le déplacement u due aux conditions du problème. Suite à la mise en équation, on écrira la formulation variationnelle qui sera résolue via la méthode des éléments finis. Le détail du problème et sa résolution sera en décrite dans le cours [13].

3.4.4.2 Résolution d'un problème de FSI

Le modèle décrit Figure 12 ci-dessus correspond à une réaction d'une structure avec les forces de pression exercées par le fluide.

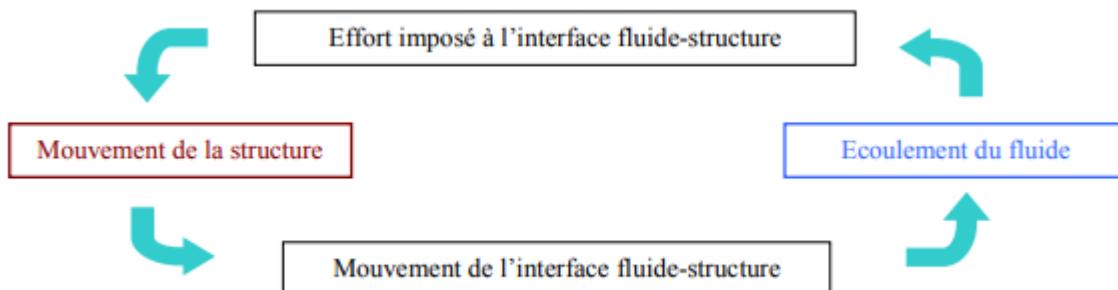


Figure 12: Schématisation du couplage fluide-structure

Pour simuler ce phénomène, il existe deux approches différentes. La première est l'approche dite monolithique qui est apparentée au couplage fort et l'autre dite partitionnée qui peut être soit forte ou faible en fonction du schéma itératif choisi.

3.4.4.2.1 Approche partitionnée

L'approche partitionnée utilise un solveur pour chaque domaine, l'un pour la partie fluide, l'autre pour la partie solide. Il y a ensuite un couplage en temps qui lie les deux solveurs permettant la mise à jour des grandeurs communes.

Cette méthode est adaptée aux problèmes physiques complexes et permet d'effectuer des calculs en parallèle. Cependant, résoudre les équations du milieu fluide et solide séparément à chaque pas de temps génère une erreur numérique supplémentaire qu'il sera nécessaire de contrôler lors de l'avancement du calcul.

3.4.4.2.2 Approche monolithique (direct)

Cette approche consiste à résoudre les équations de comportement du fluide et de la structure en un seul modèle mathématique. Le solveur effectue les calculs permettant de prendre directement en compte chaque modification d'un des deux domaines (fluide ou solide) sans utiliser d'interpolation ce qui a pour avantage d'assurer la stabilité du calcul.

Cependant, cette méthode présente des limites. En effet, dans certains cas, cette méthode est difficile à mettre en place car le domaine fluide et le domaine solide demandent des procédures de calculs spécifiques. Par exemple, les équations d'Euler sont souvent utilisées pour décrire le comportement fluide tandis que celui du solide est généralement décrit par un système lagrangien.

3.4.4.2.3 Méthode ALE

La méthode ALE est utilisée pour les maillages fluides proches de structures solides. Elle empêche des distorsions trop importantes dans le maillage. La méthode Lagrangienne, souvent utilisée en mécanique du solide, décrit un maillage qui bouge avec le solide ce qui facilite le suivi de l'interface et l'application des conditions aux limites. Cependant, cette méthode est limitée dans le cadre d'écoulements fluides et en particulier lors de la création de vortex, c'est pourquoi pour le domaine fluide, on utilise le plus souvent une description Eulérienne. Pour une description Eulérienne, le maillage reste fixe et les particules passent. En revanche, les surfaces et les frontières fluide-solide sont difficiles à suivre en utilisant cette approche.

Sur ADINA, la méthode ALE est utilisée de la manière suivante :

- 1) On détermine le déplacement noté δd de chacun des nœuds au niveau des parois de fluide-structure ou même les autres déplacements engendrés par l'utilisateur avec des « leader-follower » options. Cela se traduit par des points de références qui vont être suivis par des follower point tout en gardant le parallélisme du maillage sur les y comme on peut voir ci-dessous Figure 13.

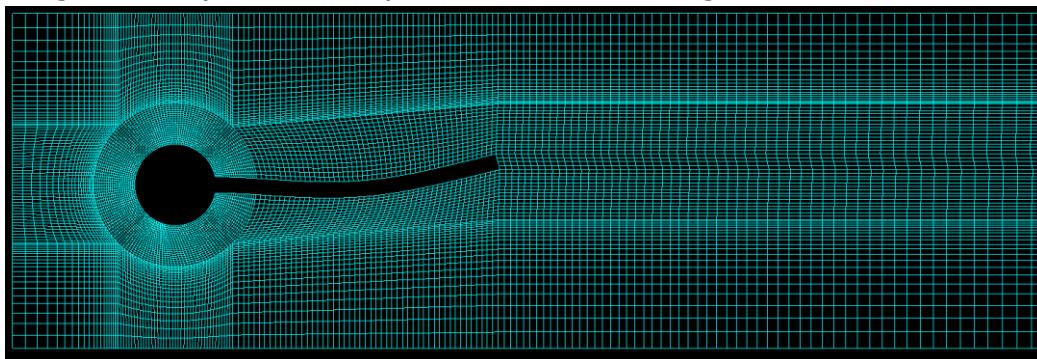


Figure 13: Méthode ALE sur le problème [12]

Sur l'image ci-dessus, les points leaders sont définis sur l'extrémité de la tige et les points follower parallèlement à ceux-là sur le bord de droite du domaine.

- 2) On résout avec la méthode des éléments finis l'équation de Laplace $\Delta(\delta d) = 0$ sur chacune des lignes de la partie fluide. On impose ensuite des conditions de Dirichlet provenant des déplacements δd obtenus à l'étape 1. Cela donne naissance à de nouvelles positions nodales. Pour les points n'ayant pas eu de déplacements, on les laisse à zéro.
- 3) On résout ensuite l'équation de Laplace sur toutes les surfaces fluides avec comme conditions de Dirichelet les nouvelles positions des lines.
- 4) Enfin, on résout l'équation de Laplace sur tous les volumes avec comme conditions de Dirichlet les nouvelles positions des surfaces.

On effectue ces étapes à chaque itération.

3.4.4.2.4 Méthode Steered Adaptative Mesh (SAM)

Une autre méthode d'ADINA permettant de traiter des problèmes de fortes déformations est celle appelée « Steered Adaptive Mesh » (SAM). On peut utiliser la méthode « Adaptive mesh repair » décrite de la manière suivante :

On suppose lancer un calcul fluide-structure sur l'intervalle $T = [t_0, t_f]$, qu'il existe un t_d où le calcul va diverger. Alors avec le SAM et un critère de remaillage défini suivant différents paramètres (gradient de vitesse/pression, taille des mailles, zones de raffinement,...) ; un nouveau maillage va automatiquement se générer à partir du maillage de l'étape précédente au temps t_p (où $t_0 < t_p < t_d$). Si le calcul diverge de nouveau, ces étapes seront réitérées jusqu'à que le calcul se termine à $T = t_f$.

On peut aussi utiliser cette méthode pour faciliter le raffinement du maillage sur des calculs aérodynamiques à géométrie complexe. On a pris un cas simple Figure 14 qui montre un raffinement de maillage autour d'une aile NACA 0012 en calculant les critères de gradients de vitesses et de pression. On voit bien notamment au niveau du bord d'attaque la représentation du champ de vitesse et pression assez particulier à ce niveau-là.

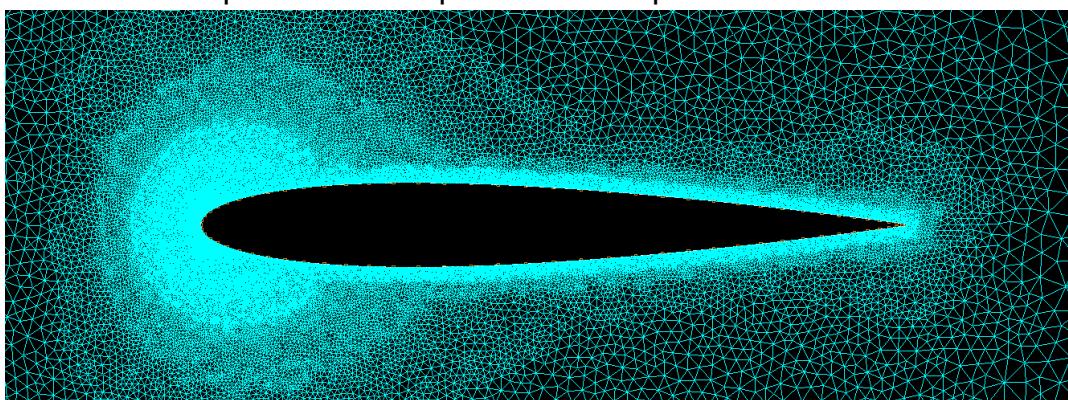


Figure 14: Maillage SAM sur une aile NACA 0012

3.4.4.3 Couplage fluide-structure avec ADINA

Sur ADINA, il existe 2 principales méthodes pour effectuer le couplage fluide-structure que ce soit en 2D ou 3D.

La première méthode décrite Figure 15 est très certainement la plus intuitive, elle consiste à créer un solide d'une géométrie quelconque, mailler celui-ci. Pour la géométrie du fluide, il est nécessaire de créer son domaine fluide puis de supprimer la partie structure. Ensuite le programme effectuera la jonction entre les nœuds fluides et structures. Attention, le maillage doit toutefois être fait de la même manière dans la partie fluide et solide afin que les nœuds fluides et structures coïncident au mieux pour éviter les erreurs d'interpolation.

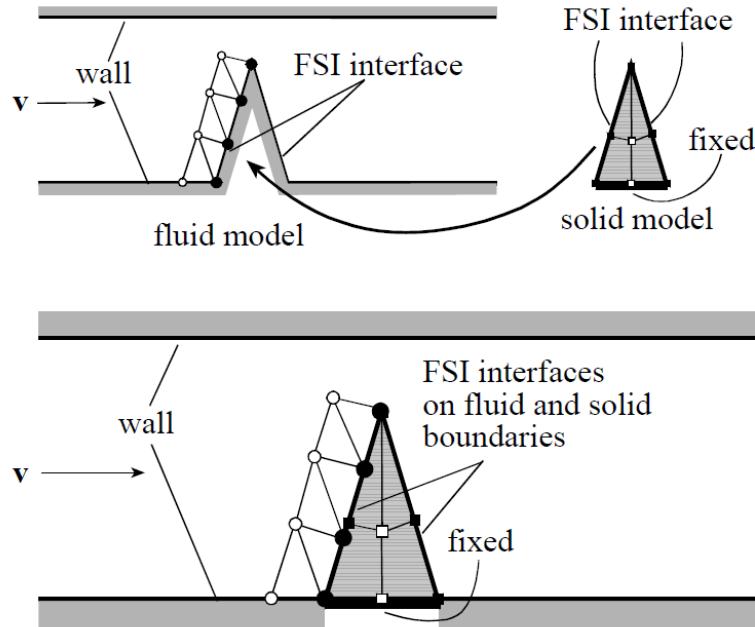


Figure 15: Première méthode couplage fluide-structure

La seconde méthode est moins intuitive, elle consiste à prendre une hypothèse sur le solide. Pour un 2D, on l'apparentera en beam : une ligne en 1D qui a une épaisseur paramétrable. Pour du 3D, on l'apparentera en shell : une face 2D qui a de même une épaisseur paramétrable.

Pour faire la jonction entre la partie fluide et solide, il faudra que les nœuds fluides soient écartés à une distance ϵ suffisamment petite pour que l'assemblage fluide-structure se fasse correctement par interpolation. On peut voir ceci sur la Figure 16 ci-dessous.

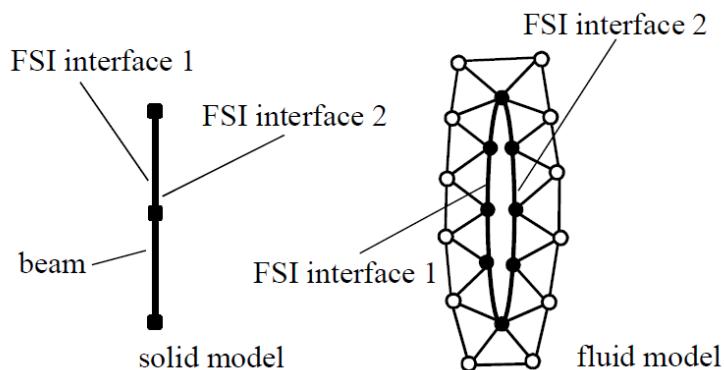


Figure 16: Deuxième méthode couplage fluide-structure

Une autre manière de faire la jonction avec cette méthode est de faire la géométrie du fluide indépendante du solide et faire une séparation des nœuds au niveau de la structure comme on peut voir sur la Figure 17 ci-dessous. Il est en effet nécessaire de dédoubler les nœuds car il y aura des nœuds intrados et extrados qui n'auront pas les mêmes valeurs que ce soit en termes de pression, vitesse, ...

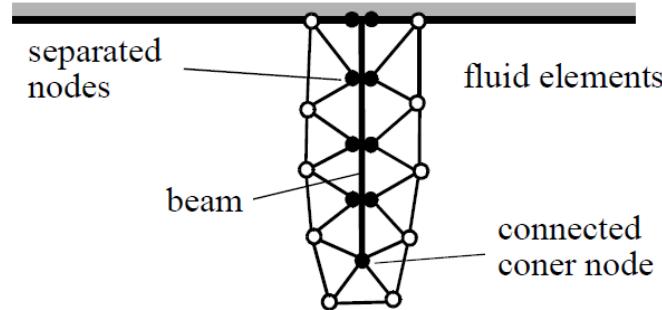
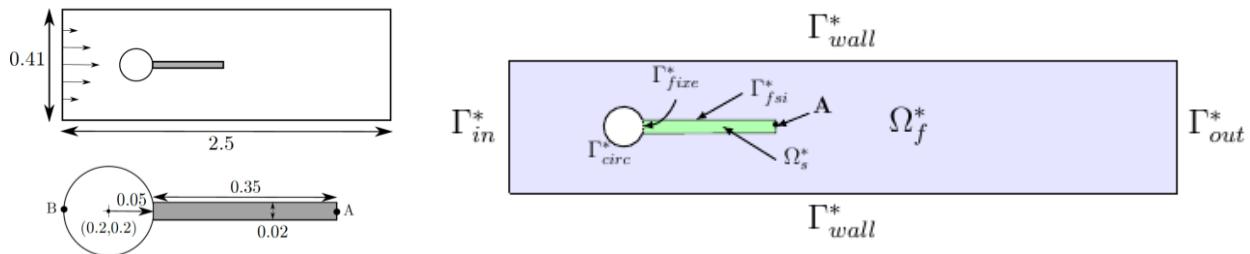


Figure 17: Split-nodes

3.4.4.4 Exemple d'un cas fluide-structure grande déformation

Un grand classique des cas-test fluide-structure grande déformation est le cas-test de S. Turekaptée and J. Hron qui décrit le problème suivant [12] :



L'idée de ce cas-test est de créer une instabilité en mettant un flux d'entrée centré sur la paroi Γ_{in}^* . Du fait que cette paroi mesure 0.41 et que le cylindre est centré en $y=0.2$. La vitesse étant parabolique centrée en $0.41/2=0.205$: on aura automatiquement une instabilité, même en régime laminaire.

On peut appartenir ce cas-test au profil d'une voile face au vent où le cylindre représente le mât. Ici ce cylindre sera forcément trop épais comparé à la largeur du mât d'un windsurf.

On pourrait adapter la géométrie du problème afin d'avoir la longueur du flexible qui mesure la longueur de la bordure.

On effectue la simulation à l'aide de la méthode ALE décrite en 3.4.4.2.3 et au rendu Figure 13, on reprend le tutoriel d'ADINA [21] puis le calcul arrive à converger sans problèmes : le maillage suit bien les déformations du solide.

On effectue ensuite une transformée de Fourier sur le déplacement vertical défini au point A et on obtient le graphique suivant Figure 18.

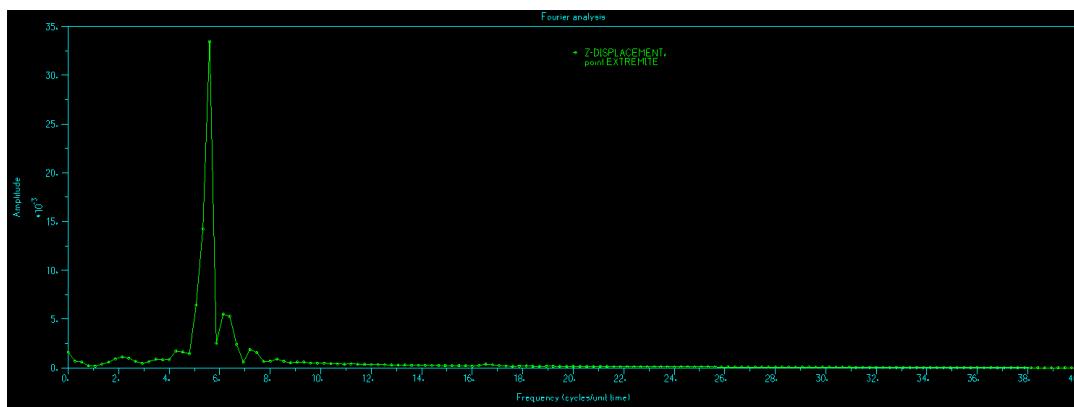


Figure 18: Résultats en amplitude du cas-test [10]

Le déplacement maximal en amplitude est donc de 3.328 E-02 m : ce qui est très proche des données de la littérature. La valeur trouvée dans les différentes simulations de la littérature [10] est de 3.448 E-02 m.

Se baser sur ces méthodes de simulations fluide-structure avec ADINA est donc une approche viable.

3.5 Méthodes d'optimisation de la voilure

3.5.1 Optimisation multidisciplinaire

Il existe un domaine de l'ingénierie qu'on appelle l'optimisation multidisciplinaire (OMD). Son but est d'utiliser des méthodes d'optimisation afin de résoudre des problèmes de conception mettant en œuvre plusieurs disciplines. Par exemple dans le cas de l'optimisation d'une voile, il serait judicieux de s'intéresser aux disciplines tels l'aérodynamisme, la mécanique des structures ou la propulsion.

Pour résoudre ce genre de problèmes, les méthodes d'optimisation sont utilisées, il en existe toute sorte comme celles basées sur le gradient (descente du gradient,...), l'évolution de population (algorithme génétique,...) ou bien d'autres méthodes. Ces méthodes résolvent des problèmes complexes et ont donc un temps de calcul très élevé. Ces méthodes peuvent résoudre des problèmes complexes d'optimisation comme on peut voir dans l'article de Soufiane Elouardi, Rabii El Maani et Bouchaib Radi [7] où l'on cherche le meilleur profil d'aile à l'aide d'une méthode génétique. Sans surprise, la solution converge rapidement vers le profil NACA0012 au bout de 35 générations. La difficulté de cette méthode est d'implémenter la fonction coût qui régit si un individu va être meilleur candidat qu'un autre. Dans cet exemple, on cherche à avoir $\max(C_d)$, $\min(C_l)$ c'est-à-dire la finesse C_d/C_l la plus grande. Pour évaluer ces finesse, il sera nécessaire de faire de la CFD sur le profil afin d'obtenir les forces de portances/trainées sur l'aile. Pour calculer cela, certaines méthodes font appel à des codes de calculs directement implantés dans leurs codes et d'autres utilisent des modules faisant appel à des logiciels CFD plus poussés comme FLUENT dans l'article [8] où on optimisera la finesse d'un profil.

Afin de pallier les temps de calcul d'une méthode stochastique comme celle des algorithmes génétiques, il est possible de coupler ce genre de méthodes avec des méthodes déterministes

comme celle de la descente du gradient. Ce genre d'optimisations est appliqué dans l'aéronautique comme dans [9] où l'ensemble de l'article résume les méthodes d'optimisation de formes d'ailes.

3.5.2 Innovations provenant des compétitions nautiques

3.5.2.1 Voile souple de l'American's Cup

Une des optimisations qui est née à l'America's Cup cette année en 2021 est celle du « dédoublement de voile » comme on peut voir dans [5] ou Figure 19 ci-dessous. L'idée est simple, à la manière des camber inducer, on dédouble la voile non pas seulement au niveau du mât mais sur l'ensemble de la voile. Ceci permet d'avoir une meilleure courbure au niveau de la voile et de limiter les forces de trainées induites par l'épaisseur du mât.



Figure 19: Voile de l'America's Cup

Pour un voilier, ce système est très avantageux car le mât de celui-ci est souvent très épais. Dans le cas d'un windsurf, le mât est assez fin. De plus, la majorité des voiles de vitesses sont déjà dotés d'un système de camber. Les résultats attendus de cette optimisation sur une voile de windsurf sont donc minimes.

3.5.2.2 Voiles rigides

Comme indiqué dans la partie 3.2.3, il n'existe pas encore de voile rigide en windsurf. Penser une voile rigide pour windsurf ferait appel à des prérglages particuliers. En effet, le vrillage du vent étant conséquent, il serait nécessaire de régler le twister d'une telle voile avant chaque sortie ou même être prédéfini avant la conception. L'inconvénient principal de cette solution est que la voile serait vrillée soit à bâbord soit à tribord durant toute la navigation. Ceci empêcherait une navigation polyvalente.

Sur un voilier, le twister est un dispositif mécanique permettant de vriller la voile dans un sens ou dans l'autre. Ajouter ce dispositif sur une voile de windsurf rajoutera un poids supplémentaire très conséquent et poserait de nombreux problèmes de conception.

Cette solution intéressante pour des professionnelles voulant s'entraîner à hautes vitesses, pourrait permettre d'établir des records. Cependant elle serait très probablement à exclure pour des particuliers voulant profiter pleinement de leur loisir.

INCERTITUDES ET DIFFICULTÉS TECHNIQUES

Au cours de cette recherche bibliographique, de nombreuses études ont montré qu'il était possible de faire des simulations RANS 3D sur des voiles de voiliers ainsi qu'optimiser certains paramètres (réglages,...). La principale difficulté est donc le manque de données sur les simulations sur les voiles de windsurf et windfoil. En effet, les données dans la littérature sont inaccessibles voire inexistantes : celles-ci sont gardées par les constructeurs de ces voiles, de plus, leurs modèles de simulation (code à panneau) ne sont pas ceux que nous souhaitons utiliser. Une approche fluide-structure demande une modélisation bien plus précise que pour des voiles de voiliers. Il réside un manque de données (matériaux, hypothèses fluide-structure,...) pour avoir une simulation réaliste.

Aucune méthodologie n'existe dans la littérature pour l'optimisation globale d'une voile. Les méthodes d'optimisations (déterministes, stochastiques) sont souvent implémentées directement dans les codes de calculs afin d'automatiser le processus. Ces méthodes ne sont pas implantables dans des logiciels commerciaux.

Aucune documentation n'a été relevée concernant les voiles rigides en windsurf. Explorer cet horizon est un axe envisageable car elle existe en sur des voiliers classiques cependant aucune piste n'est référencée concernant les windsurfs.

Effectuer des simulations RANS 3D demande l'utilisation de modèles turbulences particuliers ainsi qu'un maillage travaillé afin d'obtenir une qualité suffisante. La difficulté pour obtenir un maillage de bonne qualité sur ces simulations réside dans le critère d'inclinaison (skewness) qui n'est pas évident à obtenir pour des voiles fines.

4 PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE R&D

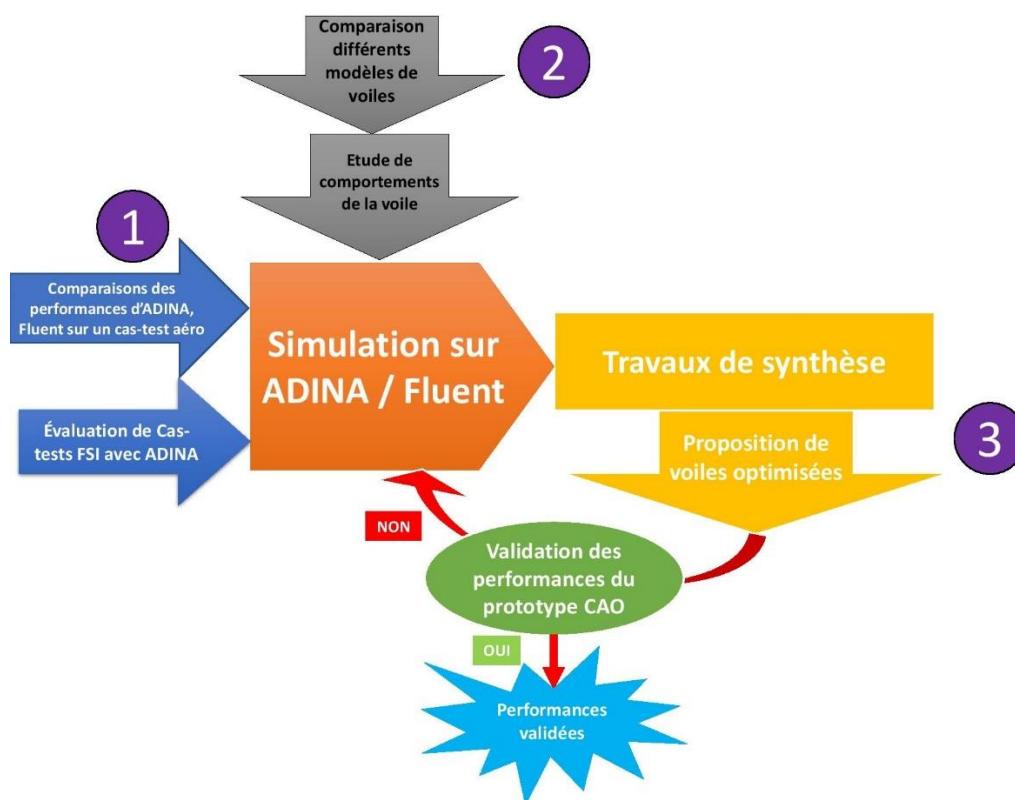
4.1 Démarche de travail

L'objectif principal est de développer un modèle de voile permettant d'optimiser un windsurf en windsurf. La démarche d'optimisation du windfoil se base donc sur l'exploration de différents modèles de voiles.

L'idée est dans un premier temps de développer une méthodologie permettant d'effectuer des simulations 3D RANS sur des voile 3D avec et sans itérations fluide/structure.

Ensuite, il sera nécessaire de développer une méthodologie permettant l'optimisation de ces voiles.

On peut globalement résumer la démarche de travail le logigramme suivant :



4.1.1 Simulations CFD/FSI sur ADINA

Afin de simuler l'écoulement du vent autour d'une voile en 3D, il sera nécessaire dans un premier temps d'effectuer des cas-test permettant la validation des modèles. Les simulations devront être validées sans utiliser le module de fluide-structure : en considérant des murs autour de notre objet. Puis elles devront être validées avec les interactions fluide-structure.

4.1.1.1 Simulations aérauliques

Les cas-test se concentreront dans un premier temps sur des modèles de géométrie simples en 2D comme des ailes NACA0012. Ensuite il serait intéressant de simuler directement des écoulements autour de profils de notre voile de windsurf pour à terme simuler des profils créent de manière plus aérodynamique.

Pour ce qui est des simulations 3D, on pourra comparer les simulations d'ADINA sur la voile de windsurf avec les résultats obtenus par l'équipe d'Aytré sur Openfoam. Puis comparer directement ces résultats avec les résultats obtenus par le logiciel SailPack utilisant un code à panneaux. Enfin, on pourra effectuer des simulations sur des voiles 3D créées à partir des profils innovants.

4.1.1.2 Simulations fluide-structure

Ajouter les interactions fluides-structures changera de manière conséquente le problème. En effet, utiliser ce modèle nous amènera à avoir un problème transitoire : on ne cherchera plus le temps final. De plus, il y aura une partie solide en mouvement à gérer sur notre modèle.

Il sera donc important dans un premier temps de valider les cas-test de grande déformation. Ensuite, on pourra étudier certains phénomènes comme une rafale sur différents profils comme des profils minces, épais, rigides, souples. Ceci permettra de comprendre quelle voile serait la plus aérodynamique.

4.1.2 Optimisation de voiles

Dans un premier temps, il serait pertinent de s'inspirer des voiles de l'America's Cup en jouant sur l'épaisseur de la voile le long de la cambrure comme on peut voir Figure 19. On pourra dessiner plusieurs profils : épais, fins, concaves, convexes,...

Une fois les simulations effectuées en CFD, certains profils seront décrétés comme plus aérodynamiques que d'autres. Il conviendra ensuite d'effectuer des simulations FSI sur les différents profils en regardant les comportements de voiles rigides.

Une fois ces études effectuées, une analyse approfondie des résultats sera nécessaire afin de dessiner sur un logiciel de CAO paramétrable les différentes optimisations. On développera un outil de CAO qui à l'aide de FreeCad pourra créer la CAO 3D d'une voile à partir d'un profil 2D aérodynamique.

4.2 Description des travaux réalisés

4.2.1 Cas-test de référence NACA0012 à Re=100 000 – Fluent - ADINA

Avant de commencer l'étude de l'aérodynamique de la voile, il est nécessaire d'évaluer les outils que nous disposons. Dans un premier temps, on commence par réaliser un modèle simple en commun, sur la partie aéronautique uniquement entre ADINA et FLUENT. Puis on viendra comparer avec OpenFoam. Dans un second temps, nous passerons sur la partie FSI avec ADINA.

L'idée est de confirmer la pertinence des modèles numériques déjà existant du projet. Pour cela nous prenons en exemple le NACA0012.

Dans le domaine de la voile, on apparaît parfois les voiles des voiliers à des modèles 2D de l'aéronautique. On prendra ici l'exemple bien connu de la littérature à savoir le **NACA0012**. L'approximation d'une voile de windsurf à un profil NACA0012 est certes très grossière mais elle va nous permettre d'avoir une idée approximative des résultats attendus ainsi qu'être sûrs de la fiabilité de nos futures simulations qui seront limitées en données de références. On pourra lancer des calculs sur des profils plus particuliers en connaissant les avantages et faiblesses de chaque logiciel afin de recalibrer ces données à la réalité.

L'objectif de cette première étude est de lancer une même simulation sur ADINA et Fluent afin de retrouver les données de la littérature. Pour ce faire, on se placera dans un cas-test très connu où les données de la NASA [16] nous donnent les coefficients de portance et de trainée.

4.2.1.1 Description du problème

De manière très classique, on définira la géométrie du problème de la manière suivante Figure 20 avec deux domaines : un faiblement raffiné et un fortement raffiné. Le domaine sera très grand afin d'éviter toutes interférences entre les parois du domaine et les champs autour de la NACA.

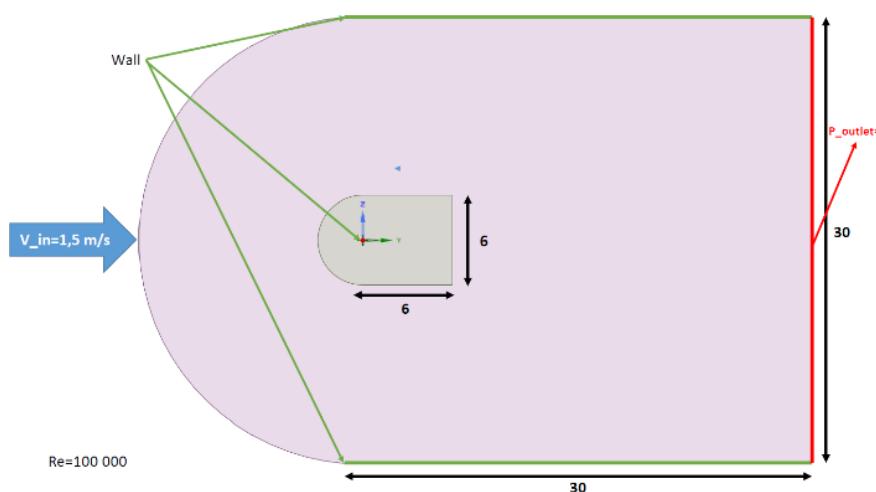


Figure 20: Description problème NACA 0012

On notera une vitesse d'entrée sans incidence à 1,5 m/s ce qui correspond pour une corde $c=1\text{m}$ à un nombre de Reynolds de 100 000.

4.2.1.2 Maillage

Pour le maillage, on effectuera un maillage à environ 100 000 cellules et on traitera le maillage de la couche limite avec une inflation croissante en choisissant l'épaisseur de la première couche correspondant à un $y^+ < 1$. Ce terme sera calculé et expliqué dans l'annexe 7.2. Il est très adapté pour notre modèle de turbulence k- ω SST qui est recommandé pour des simulations de couche limite de haute précision.

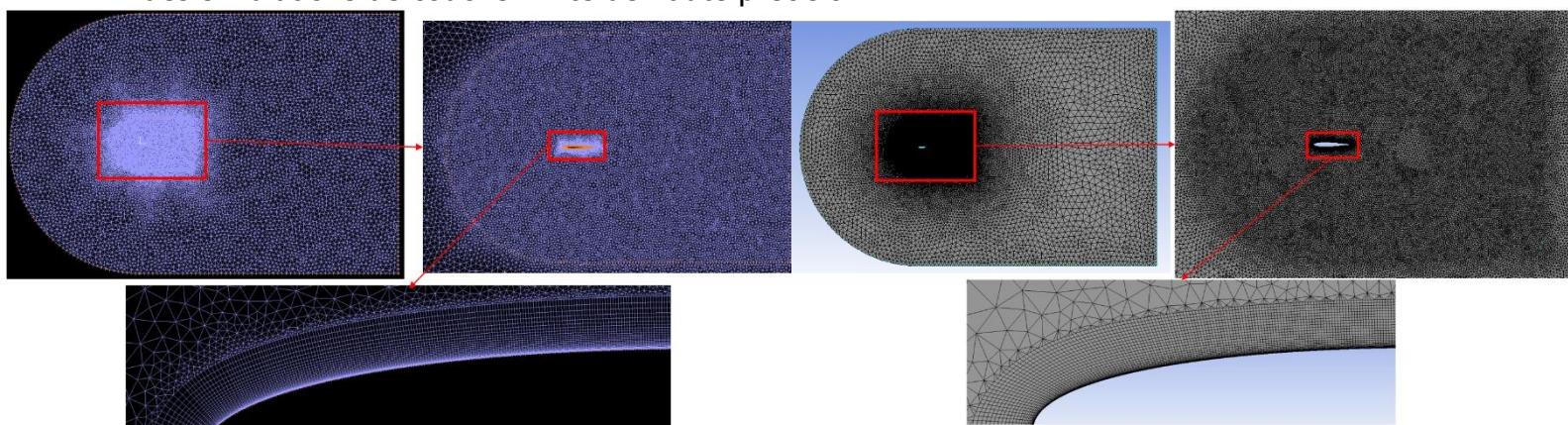


Figure 21: Maillage sur ADINA (gauche) et Fluent (droite)

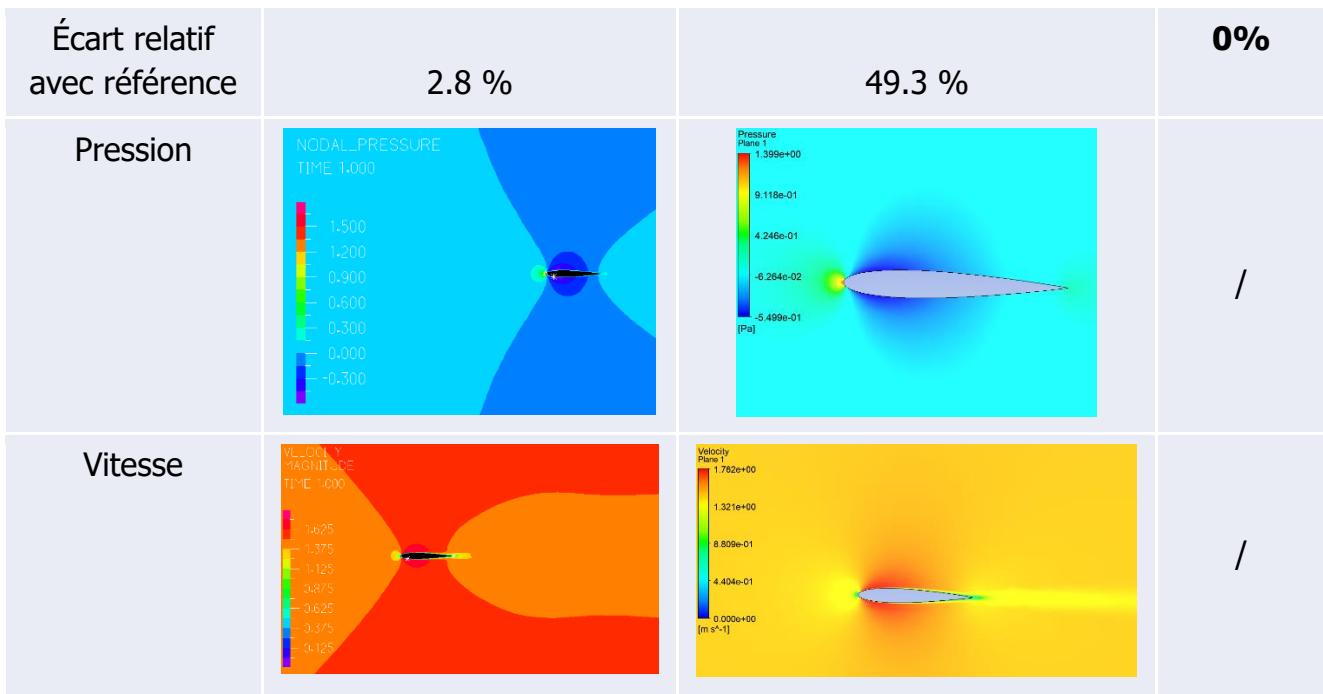
4.2.1.3 Paramètres de simulation

Pour les paramètres de simulation, on utilisera une résolution avec le modèle turbulence k- ω SST où on prendra comme intensité turbulente I calculée empiriquement à 5% et longueur de référence étant la longueur de la corde à 1. Les schémas de discréétisations seront d'ordre 2. On utilisera dans les deux simulations une résolution par les volumes finis avec une tolérance sur les résidus à 10E-8. On vérifiera que notre coefficient tend bien vers une valeur finie au fil des itérations.

4.2.1.4 Résultats

Pour obtenir les résultats en trainée, on effectue la somme des forces selon x sur tous les nœuds de l'aile. On expose les résultats sur la trainée ci-dessous et on remarque que la trainée est bonne sur Fluent et est très surestimée sur ADINA.

Re= 100 000	Fluent	ADINA	Référence
Coefficient de trainée	0.01741608	0,0343703	0.01693



On remarque que les champs de pression et vitesse sont très similaires. Cependant les coefficients obtenus sur ADINA sont éloignés de ceux que nous sommes censés obtenir. Il convient donc de vérifier les critères un par un pour déceler la provenance de l'erreur.

4.2.1.5 Axes d'amélioration d'ADINA

Afin d'améliorer notre modèle, on va jouer sur plusieurs critères dans le but d'obtenir le modèle le plus optimal.

Critère de convergence

On va dans un premier temps baisser les critères de convergence afin de voir s'il y a un changement au niveau des résultats. On essayera avec les seuils de résidus suivants :

Critère de convergence sur les résidus	10E-3	10E-5	10E-8	Référence
C_d	0.03562	0.03555	0.03557	0.01693

Le calcul semble tendre vers la même valeur quel que soit le critère de convergence. On peut rejeter cette hypothèse. On restera tout de même sur un critère de convergence à 10E-8. On peut ensuite s'il y a bien convergence en maillage.

Convergence en maillage

Il est intéressant d'observer s'il y a convergence sur notre maillage. L'idée est donc de faire varier le nombre de cellules du maillage progressivement (on ajoutera principalement sur la couche limite) afin de voir s'il y a un changement dans les variables de sorties.

Nombre de cellules	100 000 cellules	300 000 cellules	Référence
C_d	0.0343703	0.038528	0.01693

On essaie plusieurs maillages et on n'observe pas de changements significatifs. On écarte donc l'hypothèse du maillage.

Méthode de calcul :

On essaie ensuite de résoudre le problème via deux méthodes différentes : une basée sur les éléments finis et une sur les volumes finis.

Méthode de calcul	FCBI - Eléments Finis	FCBI-C – Volumes Finis	Référence
C_d	0.03562	0.036193	0.01693

La méthode de résolution ne semble pas changer significativement les résultats. On rejette de même cette hypothèse. Pour des questions de rapidité de calcul, on continuera les calculs en utilisant la méthode par défaut d'ADINA : FCBI.

Modèles turbulence :

Le surplus de trainées pourrait venir du modèle de turbulence qui n'est pas adapté ou mal paramétré dans notre logiciel. On essaie les différents modèles turbulences suivant en utilisant les paramètres de turbulences identiques à ceux définis sur FLUENT.

Re= 100 000	Spalart- Allmaras	$k - \varepsilon$ REALIZABLE	$k - \omega$ SST	$k - \omega$ SST low Re	Référence
C_d	0.03562	0.03588	0.034704	0.034811	0.01693

Après avoir adapté les lois-parois à chaque modèle de turbulence, on obtient les résultats ci-dessus qui ne semblent pas être très différents les uns des autres.

Après de nombreux essais, la vérification de nombreuses hypothèses, des échanges avec le support. Il n'a pas été possible de retrouver les valeurs de la littérature avec ADINA. Les champs de vitesses et pression étant très cohérents vis-à-vis de Fluent, l'hypothèse la plus

probable des écarts pourrait venir du post-traitement manuel qui serait possiblement mal exécuté. Cependant, cette hypothèse a été vérifiée avec les tutoriels faits par ADINA ainsi que son support.

4.2.2 Coordination Fluent, OpenFoam avec nos paramètres d'étude, Reynolds : 1 million.

Avec les travaux précédents, on a observé que Fluent était performant pour obtenir les valeurs de la littérature. OpenFoam et XFLR5 (écoulement potentiels) ont été utilisés par l'équipe d'Anytre sur des cas similaires, il convient maintenant de coordonner ces simulations avec nos paramètres d'étude.

On simulera un écoulement autour d'une aile NACA0012 de corde 1 m à 15 m/s correspondrait à un nombre de Reynolds de 1 000 000.

On s'intéressera aux caractéristiques aérodynamiques pour les incidences de 0, 5, 10 et 15 degrés avec le modèle turbulence commun aux 2 logiciels : $k - \omega SST$.

On définira le problème et le maillage de la même manière que la partie précédente et on notera donc les résultats dans le tableau ci-dessous.

Angle d'indidence (°)	Cl			Cd		
	Fluent	OpenFoam	XFLR5	Fluent	OpenFoam	XFLR5
0	/	/	/	123%	84%	-25%
5	-7%	-10%	1%	156%	129%	-1%
10	-13%	-16%	-2%	171%	189%	8%
15	-17%	-23%	-12%	226%	249%	55%

Globalement, OpenFoam, Fluent et XFLR5 sont très bons pour déterminer des portances. Pour la trainée, OpenFoam et Fluent obtiennent des valeurs très similaires mais assez éloignées de la littérature.

Une manière de régler ces écarts serait d'utiliser le modèle γ transition sur ces deux logiciels. Cependant il n'a pas été implémenté par l'équipe d'Aytré.

4.2.3 Cas-test NACA0012 avec variation des nombres de Reynolds sans incidence, ajout du modèle $k - \omega - \gamma$ transition

Nous avons vu que Fluent se recèle plutôt bien avec la littérature, reprenons notre cas avec les Reynolds se rapprochant progressivement du problème que nous souhaitons simuler. On se placera donc dans une configuration fonctionnelle de la partie précédente et on augmentera progressivement nombre de Reynolds tout en mesurant et comparant les coefficients de trainées.

On définira le problème de la même manière que précédemment dans la partie 4.2.1. On changera la vitesse pour avoir différents nombres de Reynolds, ainsi que la couche limite qu'il sera nécessaire d'adapter afin d'avoir un $y^+ < 1$ adapté à notre modèle turbulent. On utilisera un second maillage plus régulier Figure 24.

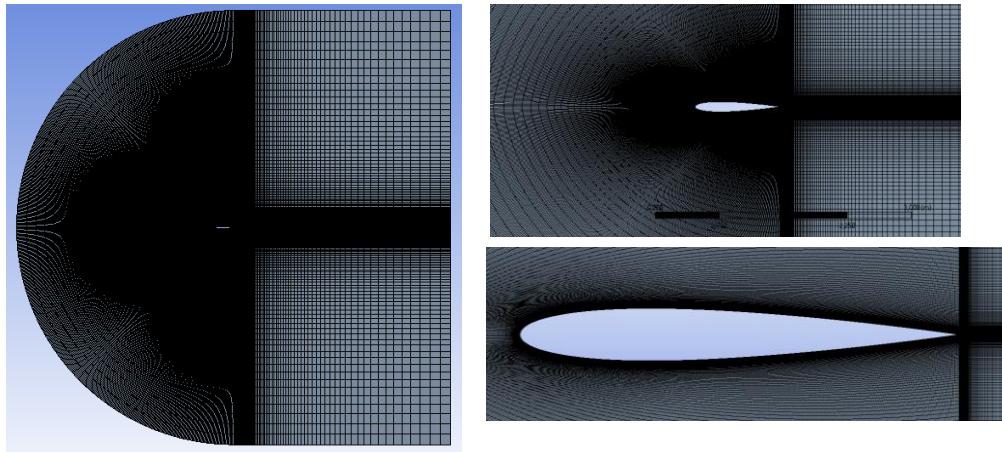


Figure 22: Second maillage plus régulier

On trace donc les résultats de Fluent sur la Figure 23 à gauche ci-dessous. On la corrélera avec les données de simulations et valeurs expérimentales et expérimentales de la littérature (à droite).

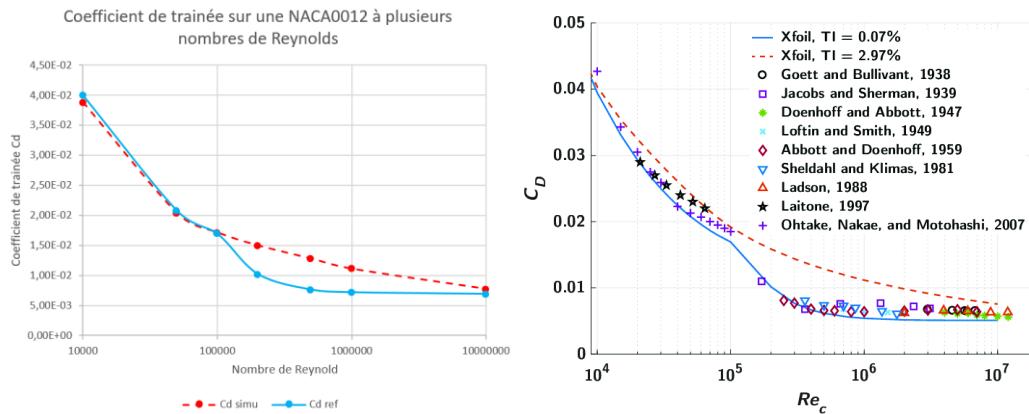


Figure 23: Simulation FLUENT sur NACA0012 (gauche) et références (droite)

Les points de la courbe de droite sont des données expérimentales, les courbes sont issues d'Xfoil qui est un logiciel de simulation très adapté aux bas nombres de Reynolds faibles étant donné qu'il prend l'hypothèse que le fluide est non visqueux.

On remarque une corrélation entre la courbe simulée sur Fluent et celle simulée sur Xfoil à intensité turbulente = 2.97%. En changeant notre intensité turbulente à 0.07%, on ne remarque pas de changement significatif sur nos résultats. Si on regarde d'autres études simulant des écoulements autour de NACA0012 avec des méthodes RANS et différents modèles turbulence comme en [15], on remarque que les résultats suivent aussi la courbe Xfoil 2.97. L'explication la plus plausible de l'article [15] qui justifierait ces écarts serait que les modèles de turbulence ne calculent pas le point de transition entre l'écoulement laminaire (rappel Figure 2) sur la première moitié de l'aile et l'écoulement turbulent sur la seconde.

Tout l'écoulement de la couche limite est donc traité de manière turbulente qui théoriquement transporte plus d'énergie qu'une couche laminaire et surestime donc la valeur du coefficient de trainée. Les valeurs en portances ne sont pas très impactées par ce manque : des simulations à différents angles d'incidence ont pu confirmer cette conclusion.

Il convient d'essayer les simulations avec un modèle de turbulence plus optimisé qui prendra en compte le changement de phase de l'écoulement de laminaire à turbulent. On utilisera donc le **Gamma-Re Transition Model** qui est un dérivé du modèle $k - \omega$ SST faisant intervenir un terme supplémentaire où $\tilde{\gamma}$ modélise l'intermittence. Ce terme aura pour valeur 1 en régime turbulent et 0 en régime laminaire comme on peut voir sur la Figure 24. Au niveau des équations, on ajoutera un terme source à l'équation de transport sur l'énergie cinétique turbulente k qui agira sur le terme de production pour simuler les flux laminaires/turbulents. Le détail des équations sera donné en annexe 7.3.

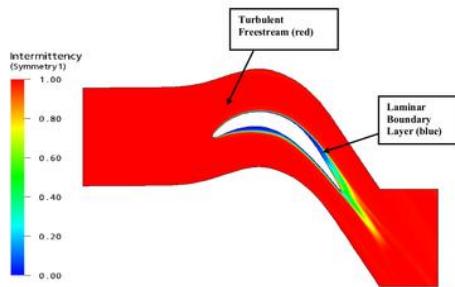


Figure 24: Intermittence autour d'une lame de turbomachine

En relançant les simulations avec ce modèle, on obtient les résultats Figure 25 suivants :

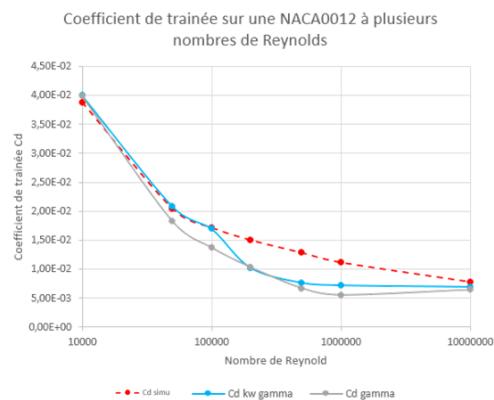


Figure 25: Résultats avec le modèle gamma transitoire

Cette fois-ci, on effectue plusieurs essais, plusieurs modèles turbulence (modèle $k - \omega$ GEKO de Fluent) avec plusieurs paramètres ; on obtient au mieux les résultats en trainée ci-dessus. Ces résultats sont cette fois-ci souvent sous-estimés mais bien plus proches des données de référence qu'avec l'ancien modèle. Ce modèle sera donc privilégié dans les futures simulations.

4.2.4 Développement d'un modèle aérodynamique CFD sur ADINA

La finalité des travaux vise à effectuer des simulations fluides-structures 3D sur des voiles. Il convient donc d'effectuer dans un premier temps des simulations aérodynamiques 3D sur des voiles.

4.2.4.1 Géométrie du problème

Pour le problème, on optera pour la géométrie suivante Figure 26. L'idée est d'avoir un volume raffiné grossièrement qui englobe un volume plus petit raffiné finement. Celui-ci englobe la voile comme on peut voir Figure 27. Ici on peut voir sur la simulation la présence d'un second volume le côté gauche. Celui-ci est nécessaire sur Adina afin d'utiliser de fonctions spatiales pour implémenter le gradient de vent. Ces fonctions n'étant pas implantables sur des body.

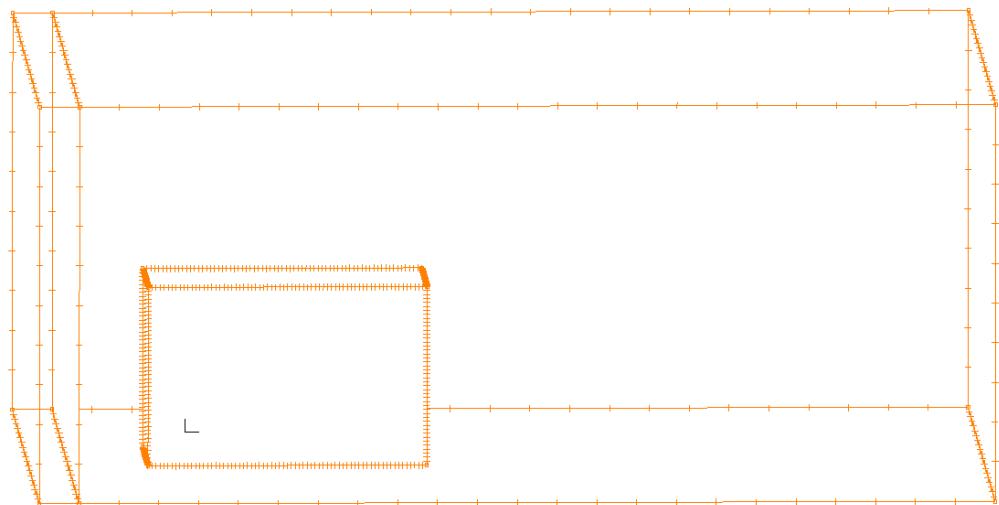


Figure 26: Géométrie globale de la simulation CFD

La géométrie totale est de dimension : $x,y,z=[-4,20]x[-10,10]x[-0.6,9.4]$. A noter que le 0.6 correspond à la hauteur de la voile par rapport au niveau de la mer qui ici sera à -0.6m.

Le petit volume ci-dessous Figure 27 englobe la voile qui a une épaisseur constante de 5mm.

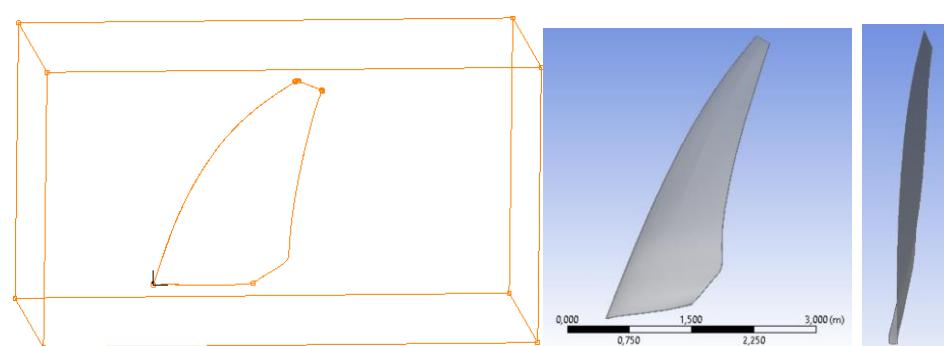


Figure 27: Géométrie locale de la simulation CFD

4.2.4.2 Condition limite du problème

On rappelle dans un premier temps les caractéristiques du vent :

- Viscosité = $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg.s/m}^3$
- Densité $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Pour cette simulation, on prendra en compte le gradient de vent et son vrillage (partie 3.4.2.1) et on l'implémentera avec la routine Python 7.1 (plus de détails dans le tutoriel). On obtiendra l'inlet suivant sur ADINA :

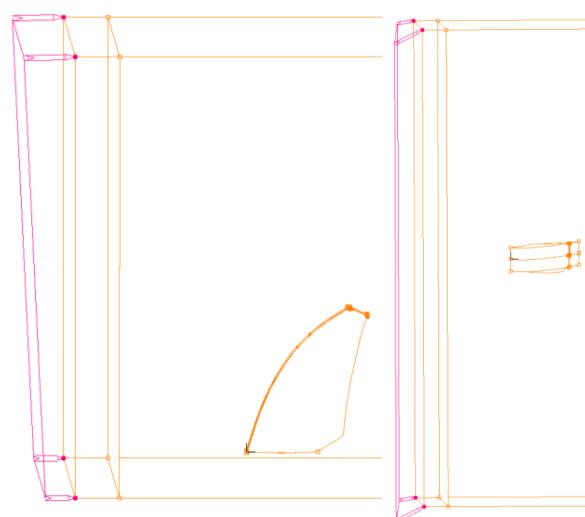


Figure 28: Inlet de vent: gradient/vrillage vu de côté et dessus

Les parois seront définies comme des walls avec conditions de glissement. Pour la paroi représentant le niveau de la mer on prendre une condition de glissement nulle afin de représenter au mieux le problème physique.

La sortie sera considérée comme pression nulle.

4.2.4.3 Maillage

Le maillage global est de la forme suivante Figure 29 avec 1 400 000 cellules.

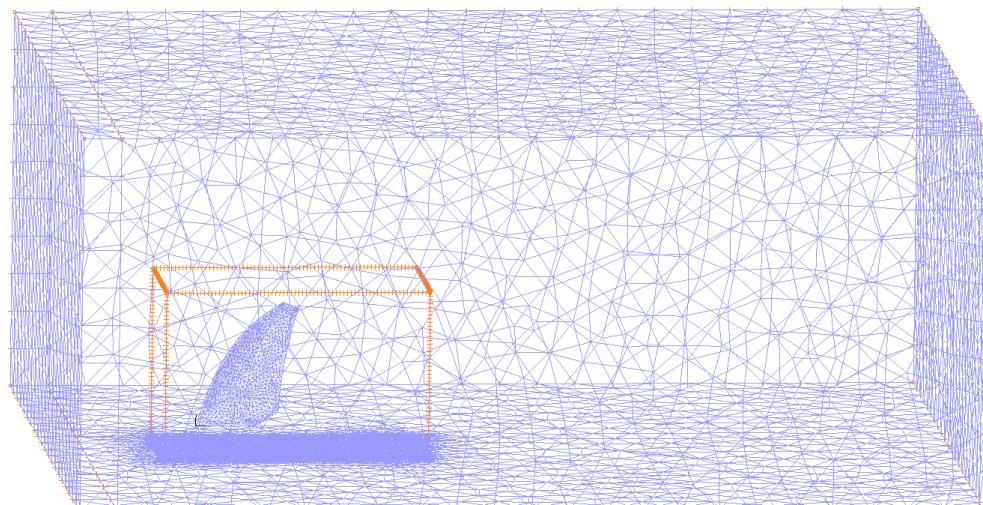


Figure 29: Maillage de la simulation CDF

Les cellules dans le petit volume sont 5 fois inférieures aux autres. De plus, on paramètrera de l'inflation au niveau des bords de la voile comme on peut voir ci-dessous Figure 30 :

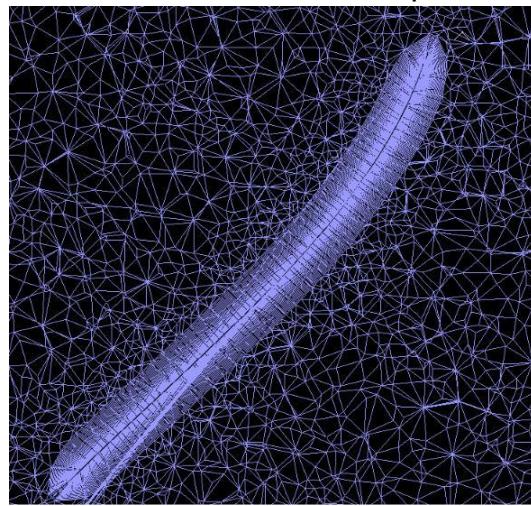


Figure 30: Inflation autour de la voile

La première couche est calculée de sorte à avoir un $y^+ < 1$ adapté à notre modèle turbulence.

4.2.4.4 Paramètres de la simulation

La résolution du calcul se fera en utilisant la méthode des éléments finis avec une tolérance des résidus à $10E - 5$. Le modèle turbulence qui sera utilisé sera le $k - \omega$ SST avec les caractéristiques suivantes :

- $I=0.05$, l'intensité turbulente
- $L=1.6$, la longueur caractéristique représentant la longueur de la bôme

Les valeurs de k et ω seront ensuite calculés à l'aide des formules empiriques de l'annexe 7.3.

4.2.4.5 Résultats de la simulation

Les points intéressants à comparer seront les champs de vitesses/pression ainsi que les forces Fx, Fy, Fz exercées sur la voile.

4.2.4.5.1 Champ de vitesse :

Les champs de vitesses sur la partie intrados/extrados sont nuls étant donné. On peut de plus voir une coupe en $z=1m$ ci-dessous.

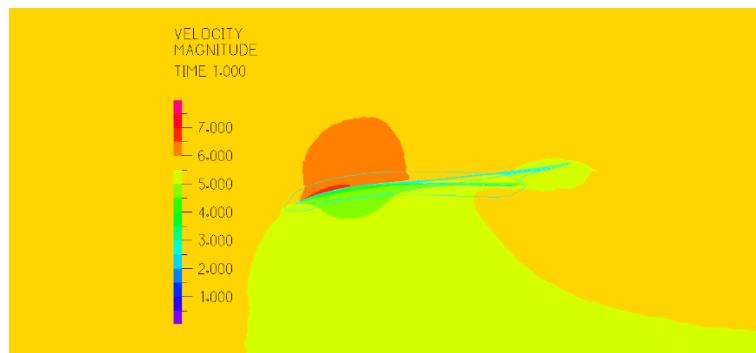


Figure 31: Champs de vitesse en coupe à z=1m

4.2.4.5.2 Champ de pression :

De même, les champs de pressions sur la partie intrados/extrados sont très complémentaires. On peut de plus voir une coupe en z=1m ci-dessous.

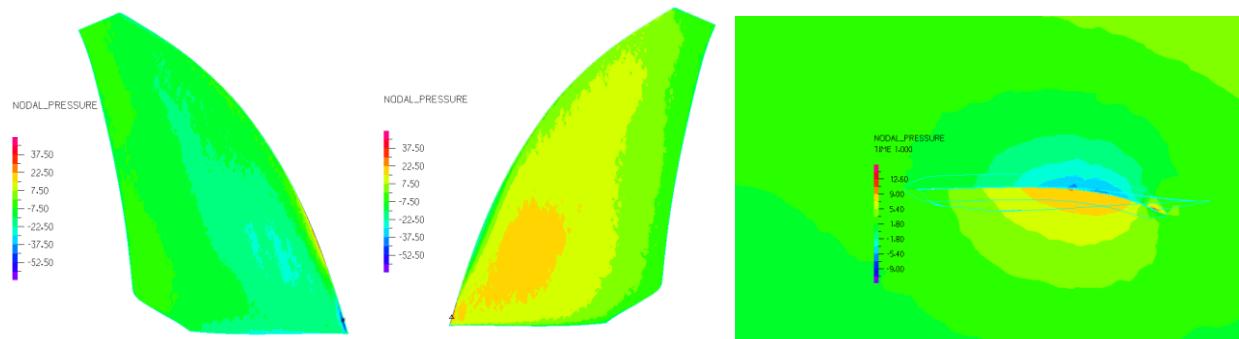


Figure 32: Champs de pressions intrados/extrados et coupe en z=2m

4.2.4.5.3 Forces Fx, Fy, Fz

En faisant la somme des nœuds sur la surface de la voile, on trouve les forces suivantes : forces de portance, trainée, verticale.

- $F_x = 94 \text{ N}$
- $F_y = 4538 \text{ N}$
- $F_z = 288 \text{ N}$

On peut observer la répartition des forces sur la voile sur les figures ci-dessous.

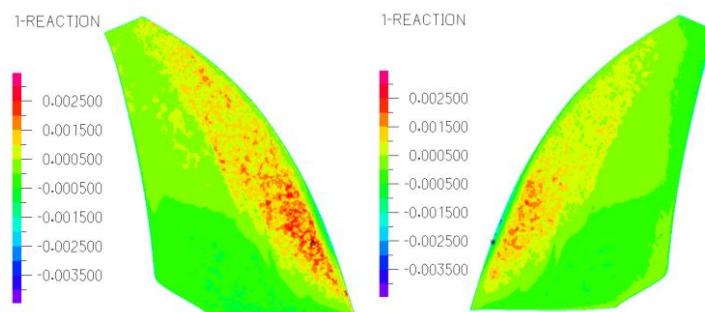


Figure 33: Force de trainée (selon x)

Sans surprise, on remarque que le bord d'attaque induit une trainée assez conséquente.

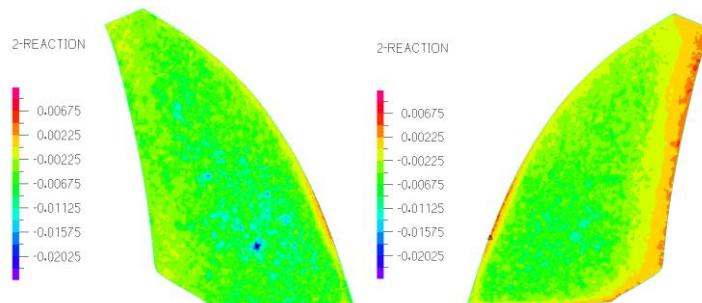


Figure 34: Force de portance (poussée vélique) (selon y)

Étonnement, la poussée vélique n'est pas centrée au milieu de la voile mais plus sur le bord de fuites. On peut expliquer cela à cause de l'écoulement qui arrive dès le bord d'attaque d'une voile considérée comme indéformable. L'écoulement crée donc un moment important sur le bord de fuite de la voile.

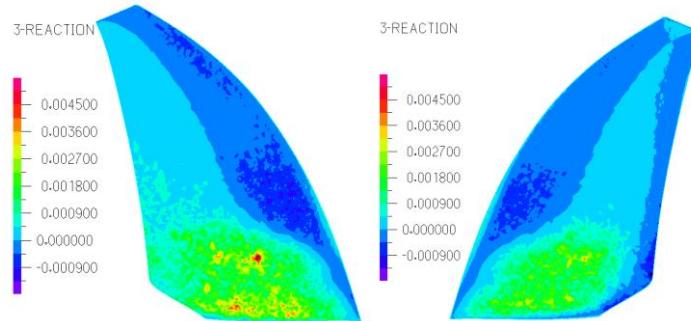


Figure 35: Force verticale (selon z)

La force verticale est centralisée principalement sur le bas de la voile, là où se forme est particulièrement creuse. La voile n'est pas parfaitement dans le plan xy, il y a un angle de la bôme jusqu'au wishbone comme on peut voir Figure 27 sur l'arrière de la voile.

Les résultats en termes de forces sont très surestimés par rapport à ce qu'on peut déterminer par une approche théorique (force de portance maximale de l'ordre de 400N). Ces erreurs peuvent venir du fait qu'ADINA surestime fortement les résultats, que le modèle de turbulence n'est pas en compte la transition de régime laminaire/turbulence. Il convient de travailler sur un modèle 2D pour obtenir des résultats plus précis.

4.2.5 Développement d'un modèle 2D en modélisant le mât – ADINA / Fluent

Afin d'avoir une modélisation réaliste d'un modèle 2D (moins coûteux en temps de calcul), on effectuera une coupe de la voile comme sur la figure ci-dessous avec l'outil Space-Claim de Ansys. On va y extraire ensuite la ligne étant la courbure ce de profil.

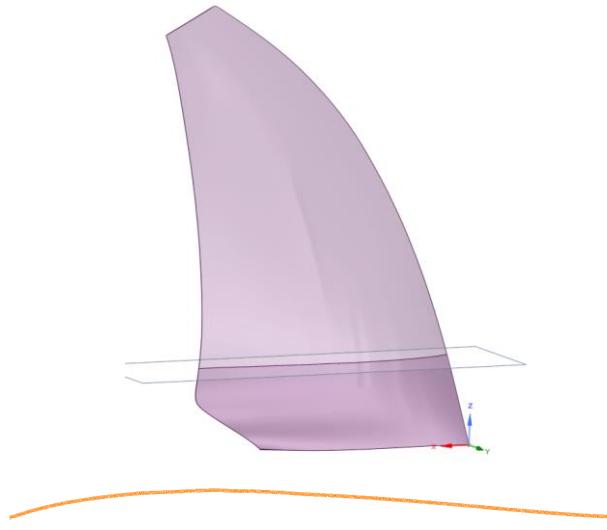


Figure 36: Coupe de la voile pour le modèle 2D

Ensuite, il est nécessaire de modéliser un mât sur ce modèle. Pour ce faire, on prendra le diamètre d'un mât standard RDM de $d=33\text{mm}$. On regardera ensuite l'influence du mat sur cette modélisation.

On supposera que la voile CAO que nous disposons est représentative d'un modèle réel qui a donc une épaisseur entre les deux voiles de $e=5\text{mm}$. En bord de fuite, on aura donc une épaisseur à 5mm maximale (une épaisseur nulle aurait engendré des instabilités numériques).

Sur l'ensemble des modélisations ci-dessous, on partira d'une ligne extraite du profil 3D avec des points équidistants de 5mm. On travaillera principalement sur une fonction de rapport d'épaisseur qui ne sera donc pas constante. Utiliser des fonctions de rapport d'épaisseur permettra de créer des **profils 2D paramétrables** pour à terme les implémenter dans de la **CAO 3D paramétrable** avec FreeCad.

Afin de dessiner des profils 2D avec une fonction d'épaisseur, il sera nécessaire de calculer les vecteurs normaux \vec{n} en chaque point qu'on obtiendra avec l'angle α entre le vecteur \vec{z} du repère orthonormé et le vecteur normal \vec{n} .

- On calculera dans un premier temps l'angle $\alpha_i = \arctan(\frac{z_{i+1}-z_i}{y_{i+1}-y_i})$ avec i l'indice spatial. Les conditions de bords seront traitées au cas par cas.
- On note ensuite discrétisation spatiale de N éléments suivants : $h_i = \frac{i}{N-1}$ avec les $i \in [0, N-1]$ et donc les $h_i \in [0, 1]$.
- Sur notre ligne, on aura donc les coordonnées y_i^+ et y_i^- (partie supérieure / inférieur de la ligne) par projections définies de la manière suivante :

$$y_i^+ = y_i + r \cdot f(h_i) \cdot \cos(\alpha_i)$$

$$y_i^- = y_i - r \cdot f(h_i) \cdot \cos(\alpha_i)$$

De même, on aura donc les coordonnées z_i^+ et z_i^- définis de la manière suivante :

$$\begin{aligned} z_i^+ &= z_i + r \cdot f(h_i) \cdot \sin(\alpha_i) \\ z_i^- &= z_i - r \cdot f(h_i) \cdot \sin(\alpha_i) \end{aligned}$$

Avec f la fonction du rapport d'épaisseur que l'on définira au cas par cas.

4.2.5.1 Géométrie locale du problème

4.2.5.1.1 Mat – voile classique : sans camber

Pour modéliser une voile sans camber, il sera nécessaire de marquer le saut entre le diamètre du mât de $d=33\text{mm}$ et l'épaisseur entre les deux voiles qui est de 5mm .

L'approche la plus réaliste serait d'utiliser une fonction convexe définie sur $[0,1]$ en coefficient multiplicatif de l'épaisseur maximale $r=d/2$, sur les h_i le long de l'épaisseur ayant pour valeur le rayon du mât en 0 et l'épaisseur de la voile à $l = 1/10$ de la voile.

On choisit arbitrairement une fonction convexe : $f(x) = e^{nx}$ tel que $f(0) = 1$ (pour avoir l'épaisseur du rayon en 0) et $f(l) = \frac{e}{2r} \approx 0.15$ (pour avoir l'épaisseur de la voile sur 2 en l).

Elle nous donnera l'épaisseur le long des h_i et est régit avec la fonction suivante :

$$f(x) = \begin{cases} e^{nx} & \text{pour } x \in [0, 0.05] \\ e^{n \cdot 0.1} \approx \frac{e}{d} \approx 0.15 & \text{pour } x \in [0.05, 1] \end{cases}$$

Avec donc $n = \frac{\ln(\frac{e}{d})}{l}$ afin d'éviter toute discontinuité.

Ce qui nous donne ici :

$$f(x) = \begin{cases} e^{-37.9423x} & \text{pour } x \in [0, 0.05] \\ 0.15 & \text{pour } x \in [0.05, 1] \end{cases}$$

On obtient le profil 2D suivant :



Figure 37: Mât - voile 2D simple

4.2.5.1.2 Mat – voile avec camber

Pour modéliser la voile avec camber, cette fois-ci on prolonge le désépaississement du mat un peu plus loin que pour le cas sans camber. Ici supposera que le camber agira jusqu'à $1/3$ de la voile avec le même type de fonction convexe ce qui donne :

$$f(x) = \begin{cases} e^{-18.8706x} & \text{pour } x \in [0, 0.1] \\ 0.15 & \text{pour } x \in [0.1, 1] \end{cases}$$

On obtient le profil suivant :



Figure 38: Mât - voile 2D avec camber

4.2.5.1.3 Mat – voile façon American Cup

Pour ce modèle, on s'inspire de la Figure 19 et on remarque que l'épaisseur ne décroît pas de manière linéaire. On utilise donc une fonction concave de rapport d'épaisseur le long des h_i avec donc pour valeur $f(0) = 1$ et $f(1) = 0.15$.

On choisit arbitrairement la fonction : $f(x) = -0.85x^2 + 1$ qui semble convenir.

On obtient le profil suivant :

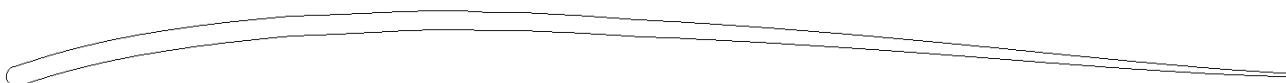


Figure 39: Mât - voile 2D façon American Cup

4.2.5.2 Géométrie globale

Pour la géométrie globale du problème, on prendra la même que pour le modèle 2D FSI : une large zone où le raffinement sera assez grossier qui englobera une zone plus petite avec un raffinement plus fin. On peut la voir sur la Figure 40.

4.2.5.3 Maillage

Comme énoncé dans la partie précédente, on effectue un maillage grossier dans une première zone qui englobe une zone plus petite ayant un maillage plus raffiné.

Au niveau de l'interface de la voile, les cellules sont plus petites afin de prendre en compte la couche limite. Par souci de logiciel, on ne mettra pas d'inflation au niveau de la voile (logiciel s'arrêtant à chaque essai malgré beaucoup de tentatives dans différentes configurations).

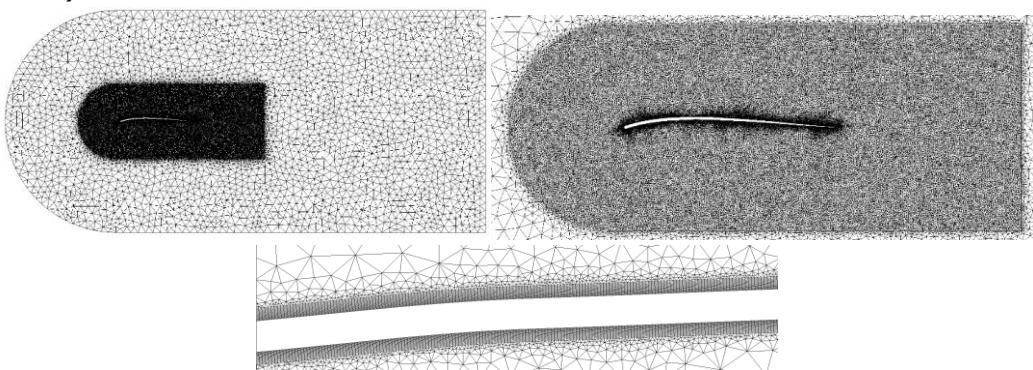


Figure 40: Maillage pour un modèle 2D avec mât

4.2.5.4 Conditions limites

Pour les essais, on commencera par des simulations sans prendre en compte le couplage fluide-structure. On imposera seulement un vent à 10 m/s avec une incidence à 10°. Comme évoqué dans les parties précédentes, les parois seront considérées comme des wall avec condition de glissement et l'interface de la voile comme un wall sans condition de glissement (vitesse nulle). Pour la sortie, on imposera une pression à 0 et une condition de Neumann nulle sur la vitesse.

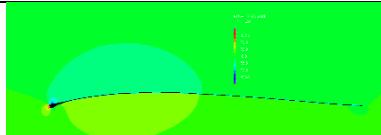
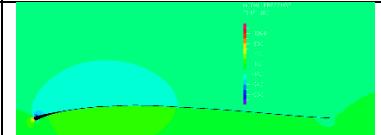
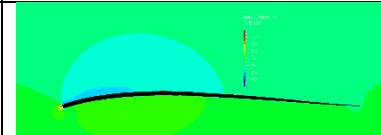
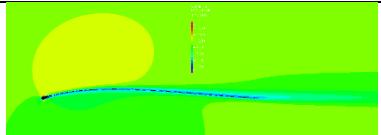
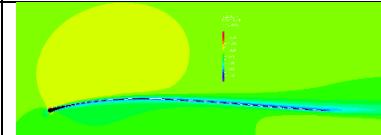
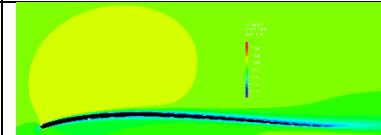
4.2.5.5 Paramètres de simulation

La résolution du calcul se fera en utilisant la méthode des éléments finis avec une tolérance des résidus à $10E - 5$. Le modèle turbulence qui sera utilisé sera le $k - \omega$ SST avec les caractéristiques suivantes :

- $I=0.05$, l'intensité turbulente
- $L=2.1$, la longueur caractéristique représentant la longueur de la corde.

Les valeurs de k et ω seront ensuite calculés à l'aide des formules empiriques de l'annexe 7.3.

4.2.5.6 Résultats Adina

	Mat – voile simple	Mat – voile camber	Mat – voile AC
Pressions			
Vitesses			
Force de trainée (N)	20.6 N	20.46 N	20.20 N
Force de portance (N)	97.4 N	98.6 N	98.8 N
Coefficient de trainée	0.160	0.159	0.157
Coefficient de portance	0.765	0.767	0.768
Finesse : Cl/Cd	4.77	4.82	4.89

On remarque qu'il y a une large différence entre une configuration mât-voile simple et mat-voile façon American cup. La différence est principalement due à la forte convexité due au niveau du mât qui induit un « tourbillon » à ce niveau-là comme on peut voir sur la figure ci-dessous pour cette incidence de vent donnée.

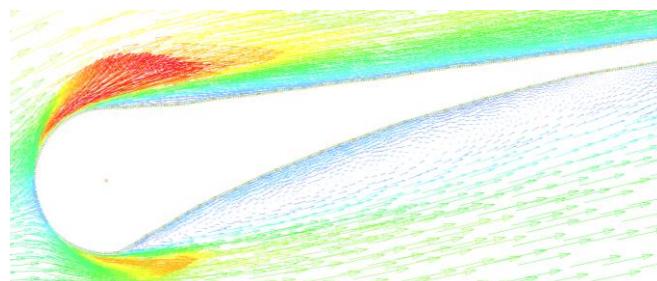
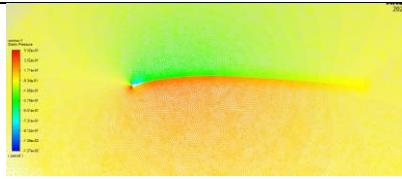
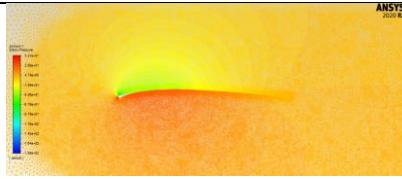
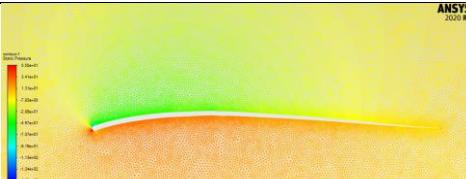
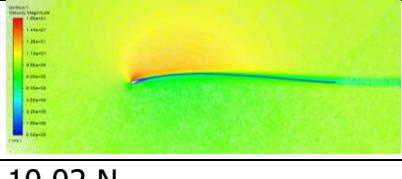
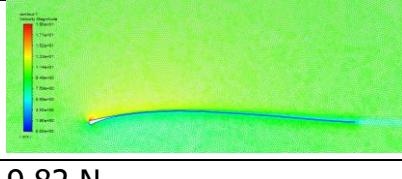
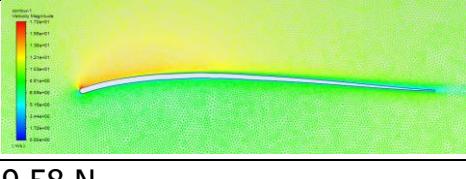


Figure 41: Tourbillon au niveau du bord d'attaque

D'autres simulations restent à faire avec des incidences différentes pour se convaincre de l'efficacité d'une voile façon American-Cup.

4.2.5.1 Résultats Fluent

	Mat – voile simple	Mat – voile camber	Mat – voile AC
Pressions			
Vitesses			
Force de trainée (N)	10.02 N	9.82 N	9.58 N
Force de portance (N)	76.42 N	77.47 N	78.52 N
Coefficient de trainée	0.077	0.076	0.074
Coefficient de portance	0.594	0.602	0.611
Finesse : Cl/Cd	7.62	7.89	8.20
Écart fitness avec voile AC	7.1%	3.8%	0%

Les résultats de Fluent confirment ceux d'ADINA : un profil type AC semble plus aérodynamique.

4.2.5.2 Comparatifs ADINA – Fluent

Erreurs	Mat – voile simple	Mat – voile camber	Mat – voile AC
Trainée	103%	108%	110%
Portance	27%	27%	25%
Finesse : Cl/Cd	67%	63%	67%

Les résultats d'ADINA en termes de trainée sont toujours surestimés comme on avait pu le remarquer dans la partie 4.2.1. On observe toujours un rapport 2 entre la trainée simulée sur ADINA et celle sur FLUENT.

Obtenir un profil 2D plus aérodynamique nous mène à développer une méthode de conception permettant d'incorporer ce profil dans une voile 3D qui serait elle-même plus aérodynamique.

4.2.6 Développement d'un modèle 3D en modélisant le mât

La première approche était donc de valider l'optimisation des profils 2D (paramétrables) pour ensuite les implémenter sur du 3D. La seconde est ensuite de valider les optimisations sur des voiles en 3D avec la partie aérodynamique puis à terme valider en 3D sur la partie FSI.

Il convient donc d'utiliser les travaux 2D précédents de la partie 4.2.5 afin de les implémenter sur du 3D. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser un logiciel où on pourra faire de la conception paramétrable : on utilisera donc le logiciel FreeCad.

La démarche globale est donc de créer une fonction permettant d'extraire les lines d'intersections avec un plan xy de hauteur z. Par exemple, si on utilise cette fonction pour récupérer les lines entre la hauteur $h=1\text{m}$ et $h=1.9\text{m}$ avec un pas spatial de 10cm, on obtient la Figure 42 suivante :

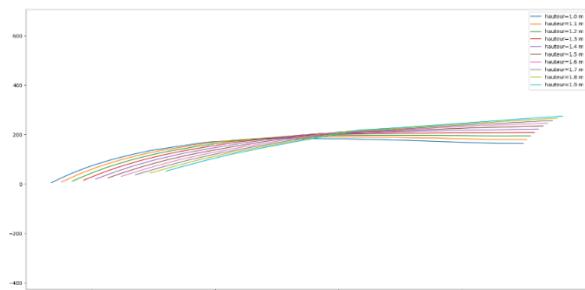


Figure 42: Lines sur différentes hauteurs

Ensuite, à l'aide de la partie 4.2.5, on peut implémenter directement notre fonction Python créant les profils sur FreeCad étant donné qu'il prend en compte le format Python. On pourra donc afficher les profils 2D de type American-Cup en fonction de la hauteur sur la Figure 43 suivante :

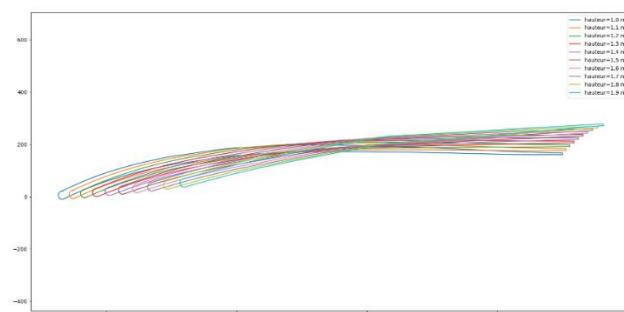


Figure 43: Profils 2D sur différentes hauteurs

Enfin, on peut créer des splines parcourant les points de mêmes indices (sur le profil 2D) en fonction de la hauteur de la voile. On obtiendra les premières splines de la voile sur la Figure 44 ci-dessous.

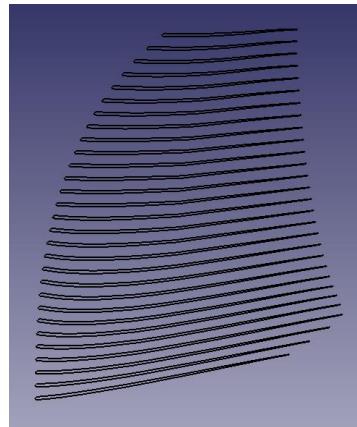


Figure 44: Quelques splines de la voile

Enfin, il ne reste plus qu'à créer une surface passant par toutes les splines ainsi que les deux surfaces d'extrémités permettant de fermer le solide.

En adaptant le programme d'Alleau Thibaut reconstituant la voile de la manière décrite dans les étapes précédentes avec une épaisseur décroissante de manière linéaire ; on adapte le programme pour ajouter nos épaisseurs paramétrages pour obtenir différents types de voiles en CAO comme on peut voir ci-dessous Figure 45.

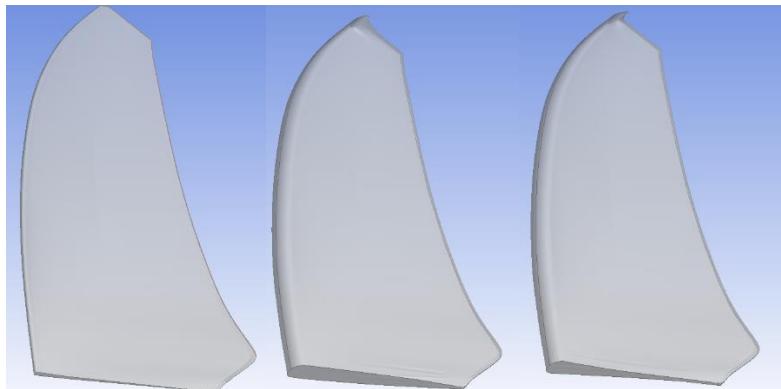


Figure 45: Voile mince, épaisses à profils concaves et convexes

Il ne reste plus qu'à vérifier les différentes optimisations en simulations RANS 3D puis RANS FSI. Des travaux plus approfondis sur les profils 2D pourront être effectués avant d'effectuer des simulations RANS 3D.

4.2.7 Développement d'un modèle FSI – 2D

Il est intéressant d'effectuer des travaux en fluide-structure afin d'étudier le comportement de la voile soumise à l'action du vent. Selon ses différentes caractéristiques (souple, rigide, épaisse, mince), on s'attend à avoir des performances diverses.

4.2.7.1 Quelques conditions du problème

Pour simuler un problème fluide-structure, il est nécessaire de paramétrier la partie fluide et la partie solide. Pour la partie fluide, les données nécessaires ont déjà été évoquées dans la partie CFD en simulation aéronautique.

Pour la partie solide, il est nécessaire de prendre des hypothèses et implémenter des données concrètes comme celles des matériaux.

Pour la partie matériaux, on prendra l'hypothèse d'apparenter la voile de windsurf comme une voile de voilier. C'est une hypothèse qui est aussi prise dans les logiciels des constructeurs comme sailpack.

On implémentera donc les données provenant de la simulation FSI [14] d'un voilier avec les matériaux suivants :

Density	1439.4 kg/m ³
Elastic modulus	124 GPa
Poisson ratio	0.36
Thickness	0.34 mm

4.2.7.2 Description du modèle

On décide d'utiliser un des profils 2D paramétrable plus aérodynamique comme celui créé dans la partie 4.2.5.1.3. La géométrie choisie sera identique à celle de la partie 4.2.5.1.3. On s'intéressera cette fois au comportement de la voile soumise à une rafale : on vient perturber sa position initiale avec un écoulement de vent d'une vitesse de 7 m/s (moyenne du gradient de vent) et d'une incidence à 15 degrés, ce qui correspond à la position optimale pour profiter de la force du vent.

On comparera plusieurs types de voiles à plusieurs épaisseurs et plusieurs modules d'Young.

4.2.7.3 Maillage

Pour le maillage, on utilisera sensiblement le même que pour la simulation fluide de la partie 4.2.5. Pour la partie solide, on fera attention à ne pas avoir trop d'éléments sur l'épaisseur du profil : ceci pourrait induire une erreur numérique. En effet, avoir un maillage trop fin sur la partie solide limiterait ses déformations et induirait une rigidité fictive.

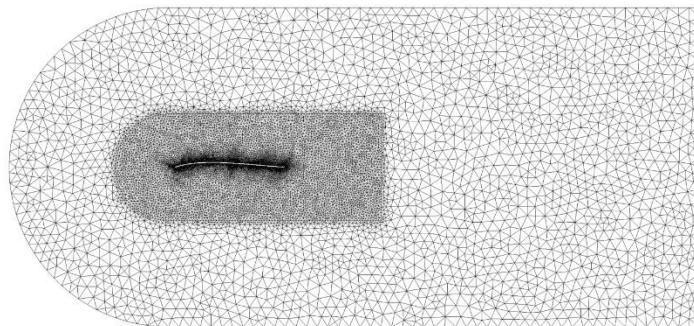




Figure 46: Maillage fluide et structure

4.2.7.4 Condition limite

Comme la partie précédente, on considère les murs avec une condition de glissement, la sortie à une pression nulle. Cette fois-ci il convient de définir où les interactions fluide-structure agiront. On fixera l'arc de cercle et le bord de fuite et le reste des bords du profil sera considéré comme IFS.

4.2.7.5 Paramètres de simulation

On prendra les propriétés matériaux définies précédemment. La simulation sera sur une durée $T_f = 1s$ avec un pas de temps $\Delta t = 1E - 3$. On utilisera un pas de temps adaptatif qui divisera successivement le pas de temps par deux quand le calcul ne convergera pas pour des raisons de déformation.

La résolution sera toujours en éléments finis avec un avec une tolérance à 10E-5. Le modèle de turbulence sera $k - \omega SST$. Le couplage fluide-structure sera direct car il est plus robuste pour notre cas d'étude. La méthode ALE sera utilisée afin de pallier les déformations de maillage.

4.2.7.6 Comparaison des résultats sur différentes épaisseurs

Suite aux simulations de différentes épaisseurs, on obtient les résultats suivants en termes de coefficients de trainée, portance et finesse.

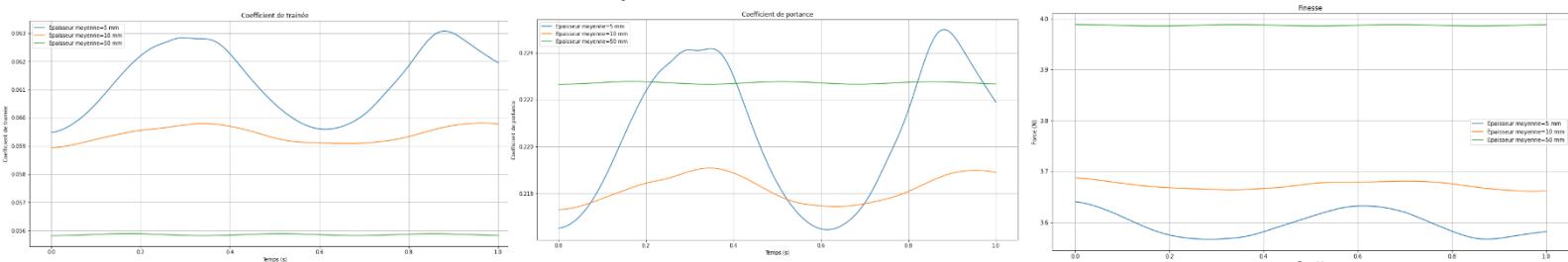


Figure 47: Coefficients aérodynamiques sur différentes épaisseurs

On remarque que les profils fins oscillent beaucoup plus que les épais. Cela induit des oscillations dans la trainée ainsi que dans la finesse du profil. Il y a une différence significative entre la finesse du profil très épais : 4 et celle des profils fins : 3.6.

Utiliser un profil épais serait donc plus aérodynamique. D'autres simulations restent à faire afin de trouver jusqu'à quel seuil ce profil est le plus aérodynamique. Il est important de trouver un équilibre entre poids de la voile et épaisseur.

4.2.7.7 Comparaison des résultats sur différents modules d'Young

Suite aux simulations de différents modules d'Young, on obtient les résultats suivants en termes de coefficients de trainée, portance et finesse.

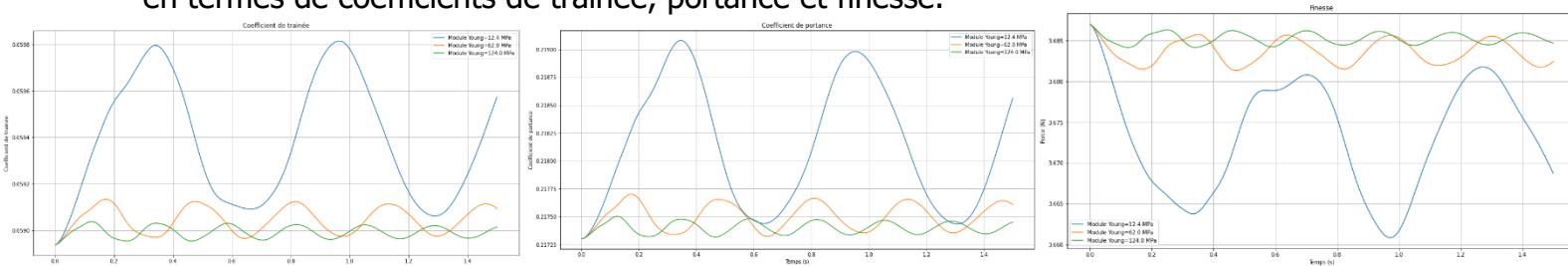


Figure 48: Coefficients aérodynamiques sur différents modules d'Young

Sans surprises, on remarque que les profils flexibles oscillent plus que les rigides. Cependant la finesse reste toujours très proche quelle que soit la rigidité du matériau. L'approche rigide sur des profils comme ça ne semble pas concluante. Il convient de vérifier ces conclusions sur un modèle 3D.

4.2.8 Développement d'un modèle FSI 3D

Les résultats 2D visant à optimiser l'épaisseur de la voile, il convient de vérifier cette hypothèse via des simulations 3D.

4.2.8.1 Description du modèle et maillage

On décide d'utiliser une seule face de la voile sous forme de shell 2D. On prend donc l'hypothèse que les deux faces de la voile sont identiques. L'avantage de travailler sur une face est qu'il sera possible de paramétriser l'épaisseur : ce qui sera un très bon avantage pour les différents tests en simulation. Pour la partie fluide, on reprendra donc les paramètres de simulation de la partie 4.2.4 (gradient de vent, vrillage, géométrie) comme on peut voir ci-dessous Figure 49. Le maillage est constitué de seulement 200 000 cellules.

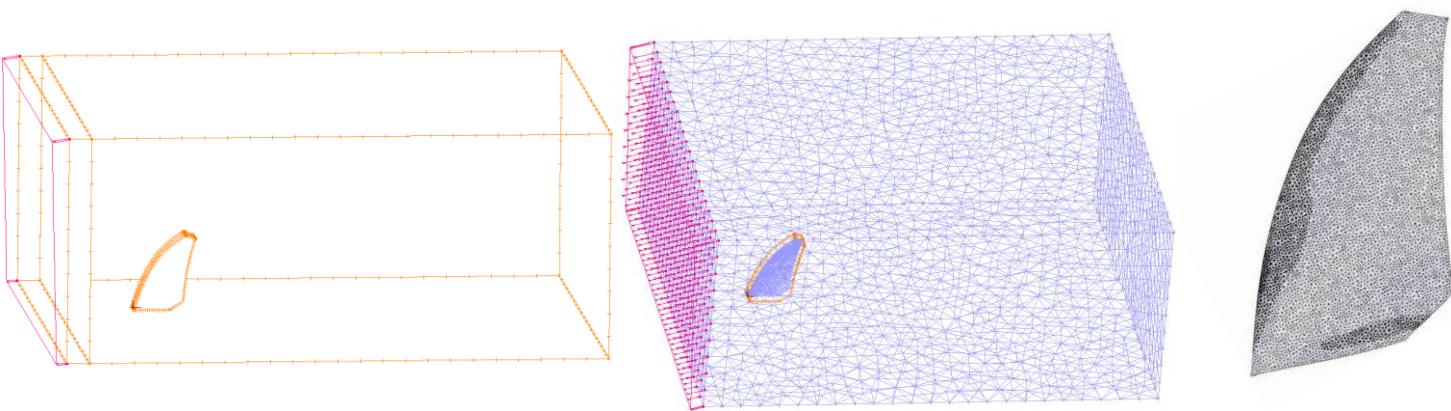


Figure 49: Domaine fluide de la simulation 3D FSI

On remarque deux « boîtes » autour de la voile. Ces « boîtes » sont des bodys créés par extraction de la face (le shell 2D) selon $y+$ et $y-$. Il est nécessaire d'avoir ces deux bodys afin

d'avoir des nœuds en jonction de la partie solide et fluide sur la surface de la voile. Comme on a pu le voir dans la partie 4.1.1, il est nécessaire d'effectuer une séparation des nœuds au niveau de la face (un dédoublement des nœuds sur la partie fluide) afin d'avoir des données intrados et extrados.

4.2.8.2 Condition limite

Comme la partie précédente, on considère les murs avec une condition de glissement, la sortie à une pression nulle. Cette fois-ci il convient de définir où les interactions fluide-structure agiront. On fixera le mât de la voile ainsi qu'un point sur la chute correspondant au point d'attache du wishbone. Le reste des faces de la voile seront considérées comme IFS.

4.2.8.3 Paramètres de simulation

On prendra les propriétés matériaux définies précédemment. La simulation sera sur une durée $T_f = 1s$ avec un pas de temps $\Delta t = 1E - 3$. On utilisera un pas de temps adaptatif qui divisera successivement le pas de temps par deux quand le calcul ne convergera pas pour des raisons de déformation.

La résolution sera toujours en éléments finis avec un avec une tolérance à 10E-5. Le modèle fluide sera laminaire pour des soucis de temps de calculs. Le couplage fluide-structure sera direct car il est plus robuste pour notre cas d'étude. La méthode ALE sera utilisée afin de pallier les déformations de maillage.

4.2.8.4 Comparaison des résultats différentes épaisseurs et différents modules d'Young

Afin de confirmer les travaux menés en 2D dans la partie 4.2.5, on effectue une simulation plus réaliste en 3D en incluant le gradient et vrillage de vent. On effectue des essais de rafales sur des voiles à différents modules d'Young et différentes épaisseurs.

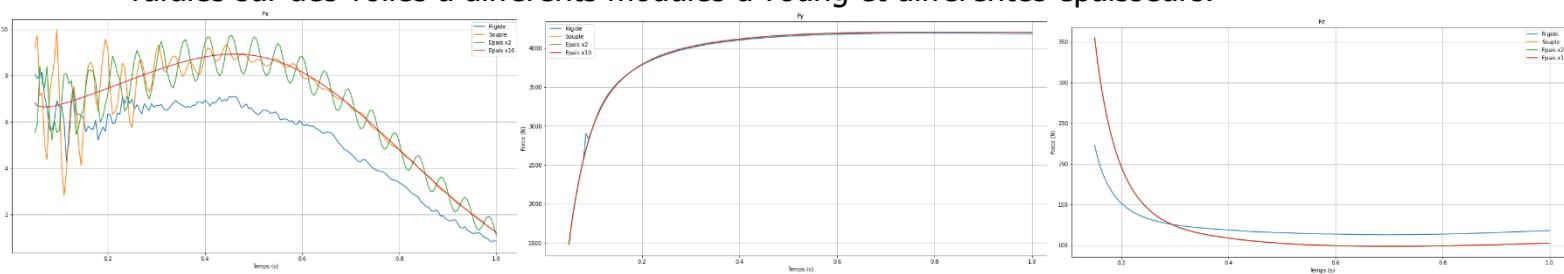


Figure 50: Résultats en forces de trainée, portance et verticale sur une voile 3D

Comme on peut voir sur les courbes ci-dessus

Figure 50, on n'observe pas de différences notables entre les différents types de voiles. Les seules différences sont sur la trainée qui est due à l'oscillation de la voile.

On peut expliquer ces résultats du fait que le maillage de ces simulations est très grossier (200 000 cellules pour du 3D) étant donné que les simulations sont très longues (plusieurs jours) car le pas de temps est petit au vu des déformations de la voile. Il serait nécessaire

d'avoir un maillage plus travaillé ainsi qu'une puissance de calcul bien supérieure pour obtenir des résultats 3D plus intéressants.

De plus, l'approximation d'un Shell 2D pour la voile ne traite pas le problème exactement de la même manière que pour un volume. Il serait nécessaire d'effectuer ces simulations avec des voiles en volume (ou body) pour observer les différents résultats. Cependant, le maillage devra être très travaillé afin d'avoir la qualité nécessaire pour éviter les déformations de maillage.

4.3 Conclusion

L'émergence des simulations numériques a permis des avancées majeures dans de nombreux domaines comme l'industrie spatiale, aéronautique ou même navale. Concernant les simulations dans le domaine marin, des codes de calculs VPP ont été développés spécifiquement à chaque navire. Ces avancés ont permis des optimisations majeures permettant d'avoir des voiliers de plus en plus performants à chaque régate.

Néanmoins ces méthodes font appel à des modèles numériques prenant en compte des hypothèses fortes (écoulements irrotationnels) non négligeables à hautes vitesses.

Les travaux effectués durant ce projet visent donc à négliger le moins d'hypothèses possibles en utilisant une méthode RANS pour simuler un écoulement autour d'une voile. Certaines difficultés sont apparues lors de la simulation d'un écoulement de vent autour d'une voile. La couche limite de celle-ci étant semi-laminaire et semi-turbulente ; il est nécessaire d'adapter le modèle de turbulence ou estimer celui-ci pour calibrer les résultats. Les résultats de FLUENT et OPENFOAM ont montré que la trainée était surestimée pour ces écoulements si l'on utilisait un modèle turbulence simple. Un modèle γ transition calculant la transition laminaire/turbulente est la solution qui a été trouvée pour régler ce problème.

Des modèles 2D ont été développés en CFD et FSI. Ces modèles sont fonctionnels : ils ont mis en évidence l'influence de l'épaisseur et de la rigidité d'une voile sur ses performances. Une voile épaisse serait plus performante qu'une voile mince.

Des modèles 3D ont été développés en CFD et FSI. Ceux-là visaient à confirmer les travaux sur les modèles 2D. Ces modèles n'ont pas été validés par souci de temps de calculs, de qualité de maillage.

Une méthode d'optimisation a été développée en 2D afin d'optimiser les profils de la voile de windsurf en paramétrant son épaisseur le long de la courbure. Un profil de type America's Cup est le profil ayant les caractéristiques aérodynamiques les plus performantes. Afin de confirmer ces performances, un outil de CAO paramétrable a été développé avec FreeCad afin de créer des voiles paramétrables avec des profils optimisés.

Il conviendrait donc de valider les simulations CFD à l'aide de Fluent ainsi qu'un mailleur puissant pour valider les performances des différentes voiles optimisées.

5 PROGRÈS SCIENTIFIQUES ET/OU TECHNIQUES

5.1 Valeur ajoutée

Un premier point surprenant a été découvert lors de la recherche bibliographique. La trainée aérodynamique est parfois surestimée sur des écoulements à des nombres de Reynolds donnée. Les simulations ainsi que la littérature ont confirmé ce point, des modèles de turbulences plus adaptés ont été utilisés pour essayer d'y remédier. Le problème physique que nous souhaitons simuler étant dans ces phases de transitions, il convient d'utiliser un modèle de turbulence adapté.

Des modèles FSI et CFD d'ADINA ont été développés en 2D et 3D sur les voiles. Ces modèles ont été testés et utilisés pour comparer des résultats. Des travaux 2D ont été réalisés sur différentes épaisseurs de profils et différentes rigidités. Un profil épais semble plus aérodynamique qu'un profil fin.

Une méthodologie de conception a été élaborée afin d'optimiser des profils de voile de windsurf à partir d'une épaisseur paramétrable. Un code a été développé avec FreeCad pour créer des voiles 3D via les profils aérodynamiques. Les résultats 2D ont montré qu'un profil type America's Cup semble plus performant que les profils classiques.

5.2 Perspectives

Le premier objectif vise à résoudre un problème arrivé durant les simulations RANS 3D. La voile étant très fine, il était très difficile d'obtenir une qualité de maillage suffisante (skewness<90) pour obtenir des résultats cohérents. Utiliser un mailleur comme ANSA ou Hypermesh pourrait être utile pour avoir des simulations CFD 3D fonctionnelles.

Un second objectif pourrait être de développement d'un modèle de windsurf plus réaliste : ajout de lattes plus rigides, implémentation de données matériaux plus réalistes ... En effet, beaucoup d'hypothèses ont été prises pour les simulations.

Un troisième objectif pourrait être de travailler sur la méthodes d'optimisation (algorithmes génétique,...) pour trouver le profil 2D le plus aérodynamique pour le record de vitesse puis effectuer une conception 3D avec FreeCad puis faire des essais en simulations 3D CFD puis FSI.

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Segula Technologies, Méthode de conception d'hydrofoils de sports nautiques : application aux hautes vitesses - Modélisation de windfoils destinés aux hautes vitesses et simulations associées, 2019 – 2020.
- [2] <https://www.mauultrafins.fr/quelle-vitesse-est-il-possible-datteindre-en-windsurf>, Dietrich Hanke, Quelle vitesse est-il possible d'atteindre en windsurf? Consulté le 23/03/2021
- [3] Pierre-Luc Delafin. Analyse de l'écoulement transitionnel sur un hydrofoil : application aux hydroliennes à axe transverse avec contrôle actif de l'angle de calage. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2014.
- [4] http://www.finot.com/ecrits/Damien%20Lafforgue/article_voiles.html, Damien Lafforgue, Les voiles : de l'expérimental au numérique, Consulté le 24/03/2021.
- [5] <https://voilesetvoiliers.ouest-france.fr/regate/coupe-de-l-america/video-les-ac-75-de-l-america-s-cup-decortiques-par-leurs-architectes-f52f0684-d561-11ea-94f6-032c4d746155>, Les AC75 de l'America's Cup décortiqués par leurs architectes, Consulté le 26/03/2021.
- [6] Introduction à la simulation numérique des écoulements. Application au transfert thermique sur plaque plane avec StarCCM+, H. Nouri and F. Ravelet, 2013.
- [7] Optimisation Multiobjectif du profil NACA0012 basée sur l'algorithme génétique de Tri Non-dominé, Soufiane Elouardi, Rabii El Maani, Bouchaib Radi. 2020.
- [8] Optimisation aérodynamique d'un profil d'aile à base d'algorithme génétique, Djamal Boudieb, Kamal Mohammedi, Bouziane Abdelkader, 2012.
- [9] State-of-the-art in aerodynamic shape optimisation methods, S.N. Skinner, H. Zare-Behtash, 2017.
- [10] Numerical and experimental analysis of the flow around a two-element wingsail at Reynolds number 0.53×10^6 . Alessandro and Gourdain, Nicolas and Chapin, Vincent and Senter, Julien and Bury, Yannick. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016.
- [11] Caractérisation du fonctionnement d'une hydrolienne à membrane ondulante pour la récupération de l'énergie des courants marins, Université de Bretagne, 2016.
- [12] Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, S. Turekaptée and J. Hron, 2006.
- [13] Méthodes de résolution en éléments finis, Stéphanie Basseville, Frédéric Feyel, 2005-2006.
- [14] Fluid-structure interaction analysis of deformation of sail of 30-foot yacht, Sera Bak, JaehoonYoo, Chang YongSong, 2013.
- [15] Evaluation of the turbulence models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0012 airfoil, 2012.

- [16] https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html, The Langtry-Menter 4-equation Transitional SST Model, NASA Langley Research Center.
- [17] Adina R&D Inc. Theory and Modeling Guide Volume I, II, III. Avril 2019.
- [18] On the flow-condition-based interpolation approach for incompressible fluids, Haruhiko Kohno, Klaus-Jürgen Bathe.
- [19] The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (SST), <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>
- [20] K-gamma 2-equation Transitional Model, https://turbmodels.larc.nasa.gov/k-gamma_transition_2eqn.html
- [21] ADINA Primer, ADINA System 9.5, Problem 64: 2D flow around a cylinder with a flexible splitter, April 2019

7 ANNEXES

7.1 Routine python d'interpolation linéaire points par points pour les données de vent.

```

def
  f_lin(x,X,Y
):
  i=0
  while
    x>X[i]:
      i+=1
    B=(Y[i-1]*X[i]-Y[i]*X[i-1])/(X[i]-X[i-1])
    A=(Y[i-1]-Y[i])/(X[i-1]-X[i])
    if x<min(X):
      return Y[0]
    return
  A*x+B=1001
  H=np.linspace(0,10,n)
  V=[f_lin(h,z,v) for h in H]

```

7.2 Loi paroi, théorie du y^+

La couche limite est la zone d'interface entre l'écoulement externe à vitesse constante et le corps solide plongé dedans. Dans le cas de notre profil d'aile, à faible échelle, on peut faire l'approximation qu'on est dans un écoulement sur une plaque plane.

On définit la valeur adimensionnée y^+ qui caractérise la distance à la paroi :

$$y^+ = \frac{U_{fric} \cdot \rho \cdot y}{\mu}$$

Avec y la distance avec la paroi. Et la valeur adimensionnée U^+ qui caractérise la vitesse de l'écoulement à l'intérieur de la couche limite :

$$U^+ = \frac{U}{U_{fric}}$$

$Re_x = \frac{\rho U L}{\mu}$: Nombre de Reynolds

$C_f = \frac{0.026}{Re_x^{1/7}}$: coefficient de frottement local (déterminé par la loi de Prandtl sur les couches limites turbulentes)

$\tau_{wall} = \frac{C_f \rho U^2}{2}$: contrainte pariétale de frottement à la paroi

$U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}$: vitesse de frottement

$\Delta s = \frac{y^+ \mu}{U_{fric} \rho}$: La taille de la première couche pour un y^+ donné.

On peut la diviser en plusieurs zones distinctes dans lesquelles le comportement de la vitesse est différent :

- **Sous-couche visqueuse : $y^+ < 5$**

Proche de la paroi, la contrainte visqueuse est prépondérante, la vitesse moyenne et les fluctuations tendent vers zéro.

$$U^+ = y^+$$

- **Zone logarithmique :**

Cette zone intermédiaire subit l'influence de la viscosité à la paroi ainsi que celle de l'agitation turbulente.

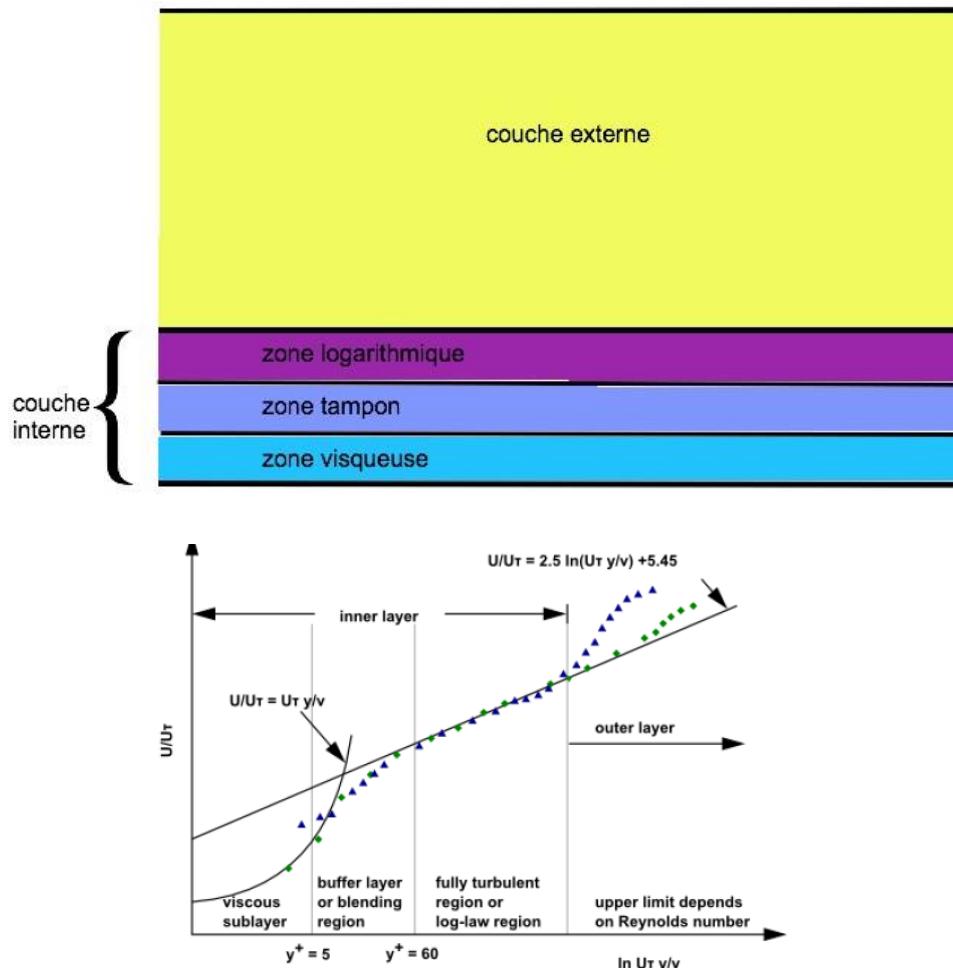
- **Zone logarithmique : $50 < y^+ < 500$**

Ici, c'est la contrainte turbulente qui est dominante, la vitesse suit une loi logarithmique :

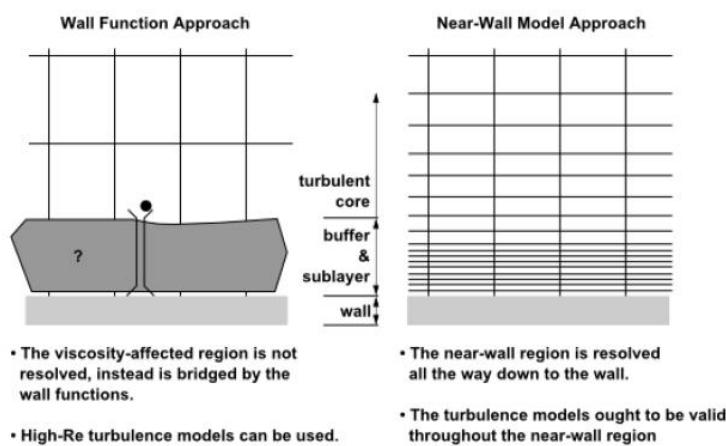
$$U^+ = A \ln(y^+) + B$$

- **Couche externe :**

Elle représente environ 80% de l'épaisseur de la couche limite. La vitesse $U(y)$ y est peu influencée par la paroi.



En CFD, il existe deux approches à la modélisation de la couche limite. La première se contente de modéliser la zone visqueuse et la zone tampon par des fonctions de proche paroi qui modélisent les effets de la viscosité qui sont prépondérants dans ces zones. Cette méthode permet avant tout d'économiser en temps de calcul et de fournir des résultats généralement bons sans se soucier du modèle de turbulence. La deuxième approche permet de résoudre la région visqueuse à l'aide d'un maillage très fin et d'un modèle de turbulence adapté. Pour pouvoir résoudre la zone visqueuse, il faut que la hauteur de la première maille (celle qui touche la paroi) soit plus petite que l'épaisseur de la zone visqueuse.



Cette approche demande donc un $y^+ < 1$ en proche parois et résout la couche limite avec plus de précisions.

7.3 Modèle $k - \omega$ SST – gamma transitoire

Les équations RANS en sont les suivantes en 2D :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{pmatrix} \quad \text{Avec } \bar{\mathbf{u}} \text{ la vitesse moyenne, } \mathbf{u} \text{ la vitesse réelle et } u' \text{ la turbulence.}$$

$$\mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}} + p'$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + u'$$

Un rapide bilan des actions mécaniques nous donne les équations suivantes :

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right]$$

En utilisant l'hypothèse de Bousinesq :

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{avec } \tau_{ij} = \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$$

Modèle $k - \omega$ SST

Pour résoudre notre modèle, il manque une équation. On introduit donc l'équation de transport sur l'énergie cinétique turbulente k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

Cette équation faisant intervenir une nouvelle inconnue, le taux de dissipation ω . On introduit l'équation de transport sur ce taux de dissipation :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1-F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Le système est maintenant résolvable.

Modèle $k - \omega$ SST γ transition :

Pour ajouter le terme d'intermitence γ , on va l'ajouter en tant que terme source de production de l'énergie cinétique turbulente de la manière suivante :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \boxed{n \max(\tilde{\gamma}, 0.1) \beta^* \rho \omega k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \boxed{\Psi_{k\gamma}}$$

Les termes encadrés ont été ajoutés par rapport au modèle précédent.

Les détails des termes des équations seront donnés dans les articles suivants [19] et [20].

Valeurs empiriques de I, k, ε et ω

Les formules empiriques pour calculer les caractéristiques de turbulence sont les suivantes :

$$k = \frac{3}{2}(\bar{u}I)^2 \quad \epsilon = \frac{0.1643k^{1.5}}{l} \quad \omega = \frac{0.09k}{\beta\nu} \quad \omega = \frac{\epsilon}{k}$$

8 RESUME :

Le projet windsurf a été développé en coordination avec l'équipe de Segula Technologies à La Rochelle. Cette équipe a pour but d'optimiser le foil destiné aux hautes vitesses. Notre équipe se concentrat sur l'optimisation de la voile. Ces travaux sont en partenariat avec le projet Zephir visant à battre le record du monde de vitesse en windfoil.

Les objectifs de ce projet étaient dans un premier temps de développer une méthodologie permettant de simuler des voiles en fluide-structure avec le logiciel ADINA. Le second objectif était de développer une méthode d'optimisation de ces voiles.

Des simulations ont été effectuées sur des profils de voiles de windsurf en s'inspirant de concepts de l'America's Cup pour à terme trouver le profil le plus aérodynamique. Une méthode de CAO a ensuite été développée pour créer des voiles à partir de ces profils.

Des travaux en fluide-structure ont été réalisés afin d'étudier le comportement des voiles souples, rigides, minces et épaisses.

Une voile de type America's Cup avec un profil épais a des performances plus aérodynamiques qu'une voile simple. La rigidité de celle-ci ne semble pas influencer significativement les résultats aérodynamiques.

9 ABSTRACT :

The windsurfing project was developed in coordination with the Segula Technologies team in La Rochelle. This team's goal was to optimize the foil for high speeds. Our team focused on optimizing the sail. This work is in partnership with the Zephir project, which aims to break the world windfoil speed record.

The goals of this project were first to develop a methodology to simulate sails in fluid-structure with the ADINA software. The second one was to develop an optimization method for these sails.

Simulations were carried out on windsurfing sails profiles inspired by America's Cup concepts in order to find the most aerodynamic profile. A CAD method was then developed to create sails from these profiles.

Fluid-structure work was carried out to study the behavior of flexible, rigid, thin and thick sails.

An America's Cup type sail with a thick profile has more aerodynamic performance than a simple sail. The stiffness of the latter does not seem to significantly influence the aerodynamic results.