

ESSAI EN BASSIN DE TRACTION D'UN HYDROFOIL EN PROXIMITÉ IMMÉDIATE DE LA SURFACE LIBRE

TANK TESTING OF A HYDROFOIL IN CLOSE VICINITY OF THE FREE SURFACE

F. HAUVILLE⁽¹⁾, P. BOT⁽¹⁾, P. PLOÉ^(1,3)

B. MALAS⁽²⁾, A. MERRIEN⁽²⁾, A. LEVESQUE⁽²⁾

frederic.hauville@ecole-navale.fr ; patrick.bot@ecole-navale.fr ; patrick.ploe@ecole-navale.fr

bertrand.malas@ec-nantes.fr ; arnaud.merrien@ec-nantes.fr ; anne.levesque@ec-nantes.fr

⁽¹⁾ Arts et Métiers Institute of Technology, IRENav, CC600 29240 BREST Cedex 9, France

⁽²⁾ Centrale Nantes, LHEEA, 1 rue de la Noë 44321 Nantes, France

⁽³⁾ VPLP Design, 18 allée Loïc Caradec 56000 Vannes, France

Résumé

Les hydrofoils, qui équipent désormais de nombreux engins nautiques et bateaux, évoluent à proximité immédiate de la surface libre. Si le comportement des ailes dans un milieu mono-fluide est bien connu, les effets de la surface libre sur les foils, en revanche, ne le sont pas précisément. Diverses méthodes numériques ont été mises au point afin de prendre en compte la proximité de l'interface air-eau. La précision des méthodes dites de haute fidélité peut conduire à un coût de calcul élevé qui constitue souvent un frein à leur utilisation à grande échelle, comme cela est nécessaire, par exemple, pour construire un modèle de substitution d'efforts hydrodynamiques destiné à alimenter un programme de prédiction de vitesse (VPP) dont les paramètres d'entrées sont multiples. Un modèle de correction d'effort, construit à partir de mesures expérimentales, associé à un code de calcul potentiel permettrait de résoudre ce problème. Les données expérimentales sur les hydrofoils proches de la surface libre dans des conditions réalistes sont rares dans la littérature, en particulier pour les nombres de Froude élevés. Le présent travail expose une campagne d'essais d'un hydrofoil dans le bassin de traction de Centrale Nantes. Les mesures réalisées dans différentes configurations d'immersion, gîte, assiette et Froude, permettent d'explorer le fonctionnement de l'hydrofoil et l'impact de la proximité de la surface libre sur ses performances, et d'élaborer des modèles d'effort destinés à alimenter des VPP.

Summary

Hydrofoils fitted on numerous boats and crafts are working in close vicinity of the air-water interface. While the behavior of thin wings in a single fluid is well known, the effects

of the free surface on hydrofoils are not well understood nor predicted. Various numerical methods have been developed in order to account for the proximity of the free surface on foils. The precision of the high-fidelity methods can lead to a high numerical burden, which is often a barrier to a systematic application for optimization or to build a surrogate model of hydrodynamic forces to feed a Velocity Prediction Program (VPP) with a high number of input parameters. A force model based on experimental measurements, combined with a potential flow solver, would solve this problem. Experimental data on hydrofoils close to the free surface in realistic conditions is scarce in the literature, particularly for high values of Froude number. The present work describes a test campaign of a hydrofoil in the Centrale Nantes towing tank. Measurements taken in different immersion, heel, trim and Froude configurations, enable us to explore the behavior of the hydrofoil and the impact of the free surface on its performance, with the aim of building force models as inputs for VPPs.

I – Introduction

Les hydrofoils équipent désormais de nombreux engins et bateaux à foils. Ils évoluent à proximité immédiate de la surface libre, voire la percent, il est donc important d'évaluer l'impact de la surface libre sur les efforts hydrodynamiques développés par ces foils. Diverses méthodes numériques ont été mises au point afin de prendre en compte la proximité de l'interface air-eau. Parmi ces méthodes, on peut citer l'utilisation d'un plan de (anti)symétrie simple ou d'une condition de Neumann-Kelvin linéarisée dans les solveurs fluide potentiel [7, 6], et la résolution bi-fluide avec suivi de l'interface dans les solveurs RANS [8, 5]. Ces dernières méthodes sont généralement considérées comme la référence, mais leur coût de calcul élevé constitue souvent un frein à leur utilisation à grande échelle, comme cela est nécessaire, par exemple, pour construire un modèle de substitution d'efforts hydrodynamiques destiné à alimenter un programme de prédiction de vitesse (VPP) dont les paramètres d'entrées sont multiples.

Par ailleurs, ces méthodes dites de haute-fidélité gagneraient à être comparées à des mesures expérimentales pour valider et affiner les paramètres numériques des modèles. Les données expérimentales sur les hydrofoils proches de la surface libre dans des conditions réalistes sont rares dans la littérature [1, 2], en particulier pour les nombres de Froude élevés. Or il existe un réel besoin de plus de travaux expérimentaux pour mesurer les variations d'efforts développés par un hydrofoil en fonction de l'immersion.

Le présent travail expose une campagne d'essais d'un hydrofoil dans le bassin de traction de Centrale Nantes. Dans le but de mieux comprendre l'impact de la surface libre et de se concentrer uniquement sur celle-ci, une aile de géométrie simplifiée est utilisée. Celle-ci possède une géométrie de base : une forme en plan elliptique sans flèche ni dièdre, un profil de section de type H105¹, (proche de nombreuses sections utilisées pour les hydrofoils), sans vrillage. L'aile est fixée à un mât lui-même fixé à une plate-forme Stewart (ou hexapode) permettant de régler rapidement différentes valeurs de profondeur d'immersion, d'angle d'attaque de l'aile et d'angle de gîte. Un capteur de force 6 composantes à jauge de déformation est conçu et construit pour mesurer les efforts de l'hydrofoil à partir du haut du mât qui supporte l'aile. Des mesures des forces exercées sur le mât seul, sans l'aile, sont également réalisées afin d'isoler la contribution de l'aile.

Les mesures réalisées sont analysées afin d'explorer le fonctionnement de l'hydrofoil et l'impact de la proximité à la surface libre sur ses performance et d'élaborer des modèles

1. La section H105 a été dessinée par Tom Speer <http://www.tspeer.com/Hydrofoils/h105/h105.htm>

d'effort destinées à alimenter des programmes de prédiction de performance.

Les conditions expérimentales et la méthodologie utilisée sont décrites dans la section II. Dans la section III sont mentionnés, d'abord les résultats pour les cas sans gîte (section III – 1) pour différentes conditions de fonctionnement (incidence de l'aile et vitesse du chariot) et différentes profondeurs d'immersion. Puis les résultats pour une gîte non nulle avec l'aile complètement immergée ou partiellement immergée (section III – 2). Dans la section IV, après analyse et discussion des résultats, les premiers modèles de comportement sont évoqués. La dernière section reprend les principaux résultats et les perspectives à ces travaux.

II – Description des moyens expérimentaux

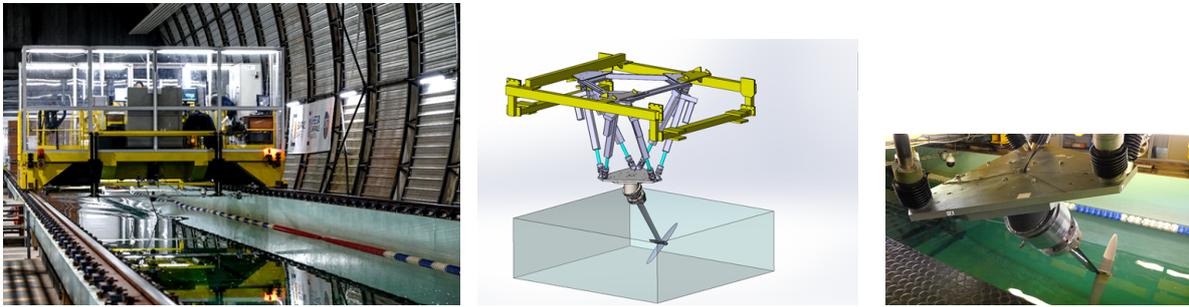


FIGURE 1 – Vue du dispositif expérimental.

Les expériences ont été réalisées dans le bassin de traction du laboratoire LHEEA de Centrale Nantes, en France. Le bassin a une longueur de $140m$, une largeur de $5m$ et une profondeur constante de $3m$. Le chariot de remorquage a une vitesse maximale théorique de $8m.s^{-1}$. Le bassin est également équipé d'un générateur de houle à clapet hydraulique à une extrémité du bassin et une plage d'amortissement à l'autre extrémité pour limiter la réflexion des vagues. Au cours de ce projet, tous les essais ont été effectués en eau calme (sans houle).

Un hexapode² de marque SYMETRIE et de type MISTRAL est fixé « la tête en bas » sur le cadre « Monte & Baisse » (M&B) du chariot (cadre jaune sur la Figure 1 du centre). L'hexapode comporte deux plaques. La plaque de base est fixée au M&B et la plaque mobile est reliée par six actionneurs linéaires électriques à la plaque de base. Les plaques et les actionneurs sont reliés par des joints de Cardan qui permettent de déplacer la plaque mobile dans les six degrés de liberté. L'hexapode est contrôlé par un PC et peut soit déplacer la plaque mobile jusqu'à une position et une attitude cible donnée (cas d'utilisation pour les trois campagnes du projet), soit exécuter des scénarios de mouvement définis par l'utilisateur. Les actionneurs sont contrôlés en temps réel pour garantir l'adéquation entre la position requise instantanée et la position du résolveur de moteur. La capacité de charge est de $1000kg$ et la fréquence de mouvement maximale autorisée est de $3Hz$. Les limites de vitesse linéaire sont de $1m.s^{-1}$ dans les directions horizontales et de $0.6m.s^{-1}$ verticalement, tandis que les limites de vitesse angulaire sont de $50°.s^{-1}$ et $70°.s^{-1}$ respectivement. Le cadre M&B permet d'augmenter la course suivant la verticale Z du chariot. Une balance de forces 6 composantes est fixée sur la plaque

2. <https://symetrie.fr/hexapodes/mistral/>

| | Hexapode | Monte & Baisse | Cale de gîte | Total |
|------------------|----------|----------------|--------------|-----------|
| TX (<i>mm</i>) | ±460 | 0 | 0 | ±460 |
| TY (<i>mm</i>) | ±460 | 0 | 0 | ±460 |
| TZ (<i>mm</i>) | ±400 | ±700 | 0 | ±1100 |
| RX (°) | ±30 | 0 | +35 | -30 à +65 |
| RY (°) | ±30 | ±5 | 0 | ±35 |
| RZ (°) | ±40 | 0 | 0 | ±40 |

TABLE 1 – Mouvements permis par le dispositif expérimental.

| | Sixaxes FX2.6 N° 1287 | HBK-MCS10BG2-025 |
|------------|-----------------------|------------------|
| $F_X(N)$ | ±400 | ±5000 |
| $F_Y(N)$ | ±2000 | ±5000 |
| $F_Z(N)$ | ±2000 | ±25000 |
| $M_X(N.m)$ | ±1200 | ±350 |
| $M_Y(N.m)$ | ±240 | ±350 |
| $M_Z(N.m)$ | ±100 | ±250 |

TABLE 2 – Étendues de mesure des capteurs utilisés pour les essais.

mobile de l’hexapode (partie cylindrique sous le plateau de l’hexapode sur la Figure 1) et le mât du foil est fixé sous la balance par serrage.

L’orientation et l’immersion du foil sont modifiées par combinaison des mouvements de l’hexapode et du M&B - Table 1. Une cale de gîte de 35° a également été fabriquée afin de pouvoir atteindre des angles de gîte plus importants. Les valeurs « Hexapode » précisés dans la Table 1 sont uniquement valables pour chaque degré de liberté pris séparément et sont limités en cas de combinaisons.

Au total, 1088 essais de traction (RUNs) ont été réalisés au cours de trois campagnes de mesure, avec différentes configurations de foil : première campagne du 16 au 27 janvier 2023 (RUN 1 à 282), deuxième campagne du 25 avril au 16 mai 2023 (RUN 283 à 752), troisième campagne du 22 janvier au 5 février 2024 (RUN 753 à 1088). Seuls les résultats obtenus avec l’aile simplifiée elliptique et le mât seul sont présentés ici (soit 478 RUNs). Pour la première campagne de mesure, une balance 6 composantes « custom », spécialement conçue pour cette expérience fabriquée par la société Sixaxes (modèle FX2.6 N° 1287), est utilisée. Ce capteur à jauges de déformations permet de mesurer les six composantes du torseur des efforts avec une incertitude élargie ($k=2$) inférieure à 0.4% de l’étendue de mesure, intervalles compris. Le corps d’épreuve est composé de 4 poutres élastiques en inox à haute limite élastique, et équipé de jauges « semis » en nombre optimisé afin de maximiser chaque mesure et minimiser les intervalles. Cette même balance est utilisée pour la deuxième campagne. Cette balance ayant été endommagée entre ces deux campagnes dans le cadre d’un autre projet de recherche, pour la troisième campagne, une balance « sur étagère » HBK-MCS10BG2-025³ est utilisée. Cette dernière entraîne des limites dans le chargement en M_x et même si la précision du capteur est de 0.2% de l’étendue de mesure, les gammes d’effort de cette dernière étant nettement supérieures, la précision absolue est moindre - Table 2.

Cette étude a pour but de mieux comprendre et modéliser l’influence de la surface libre sur les efforts générés par les foils en général, et non pas pour un foil en particulier.

3. <https://www.hbm.com/fr/5626/capteur-multi-composants-mcs10-mesurer-6-forces-et-couples>

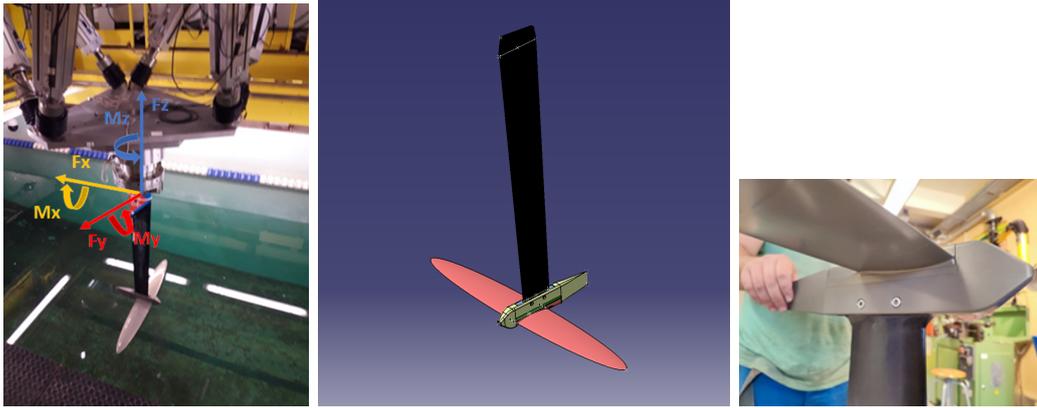


FIGURE 2 – Montage de l'aile elliptique et repère associé.

C'est pourquoi il a été choisi de tester une aile générique, usinée pour cette étude avec une géométrie bien connue et simplifiée : section classique H105, forme plane elliptique, sans dièdre, ni sweep, ni vrillage, plus facile à caractériser théoriquement et à simuler numériquement. Cette aile est à une échelle correspondant aux foils utilisés par les Kitefoils et les planches à voile olympiques iQFoil (envergure $\approx 1m$, corde $\approx 0.1m$), et la vitesse de traction de 7 m/s est de l'ordre de la moitié ou le tiers de la vitesse réelle. Des mesures ont également été réalisées avec les foils réels de ces supports olympiques mais ne sont pas présentées ici.

L'aile utilisée pour les expériences a les caractéristiques suivantes :

- aile en aluminium anodisée ;
- section H105 d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = 12.6\%$;
- portance nulle de la section 2D à $AoA = -2^\circ$ (Calcul Xfoil) ;
- forme en plan elliptique ;
- pas de sweep ni dièdre ni vrillage ;
- corde au centre : $c = 125mm$;
- envergure : $b = 949mm$;
- surface : $S = 931.7cm^2$;
- aspect Ratio $AR = \frac{b^2}{S} = 9.67$.

L'aile est mise en place sur un fuselage spécialement dessiné pour l'expérience (Figure 2). Il permet de placer l'aile juste en dessous du bras support qui le relie à la balance afin de limiter le moment M_y et rester dans la gamme de la balance. Ce bras support est le mât en carbone standard du foil de la planche à voile iQFOIL de 1011mm d'envergure. Le repère utilisé est représenté sur la Figure 2.

Afin d'avoir une bonne précision et une répétabilité des mesures, seule la moyenne temporelle des efforts mesurés sur la phase de vitesse stabilisée du chariot est conservée. Pour chaque configuration testée (attitude, immersion, vitesse), deux essais sont réalisés. Un premier en montage complet avec l'aile sur le fuselage (Figure 2) et un deuxième avec le mât et le fuselage, sans aile, pour lequel, l'aile est remplacée par une pièce pour combler l'empreinte de l'aile dans le fuselage et avoir un fuselage « lisse ». Tous les résultats présentés ici sont obtenus après soustraction des efforts mesurés sans aile aux efforts mesurés en montage complet, dans la même configuration, afin d'isoler la contribution de l'aile uniquement.

Un premier offset hexapode est mesuré pour s'assurer que le plateau mobile est dans le repère du chariot (compenser une erreur de positionnement du plateau fixe sur le M&B) et un deuxième offset est mesuré pour compenser un défaut d'orientation du repère « aile » par rapport au repère « plateau mobile » (aile « à plat » et fuselage aligné avec la direction x du bassin). Les défauts d'orientation en R_x et R_y sont mesurés avec un niveau de précision ($\pm 0.05^\circ$) et un télémètre laser. Le défaut R_z est mesuré, pour le premier offset avec le télémètre laser et le deuxième en effectuant des RUNs pour annuler l'effort F_y . La hauteur de référence (centre O du repère « aile » au niveau de la surface libre) est calée au milieu du bassin, chariot posé sur ses roues, par construction géométrique et repérage des ménisques d'extrémité d'aile pour deux gîtes positive et négative.

III – Résultats

Tous les résultats présentés dans cette section correspondent à l'« aile seule. » On note :

- $\frac{h}{c}$, la hauteur de vol ou la profondeur d'immersion du foil h , adimensionnée par la corde c de l'aile au centre. h représente la hauteur entre le centre O du repère lié à l'aile situé à mi-corde de l'aile dans le plan de symétrie de l'aile et la surface libre ;
- $Fr_c = \frac{U}{\sqrt{gc}}$, le nombre de Froude rapporté à la corde c de l'aile. U correspond à la vitesse du chariot en $m.s^{-1}$, $g = 9.81m.s^{-2}$ l'accélération de la gravité ;
- AoA , l'angle d'incidence de l'aile exprimé en $^\circ$. Correspond également à l'angle d'assiette du fuselage ;
- α , l'angle d'incidence de l'aile exprimé en rad : $\alpha = \pi AoA / 180$;
- $C_L = \frac{L}{0.5\rho S U^2}$, le coefficient de portance, avec L l'effort de portance en N perpendiculaire à la vitesse U du chariot dans le plan de la section du foil, normal à l'envergure, dirigé vers la balance, S la surface portante de l'aile et $\rho = 1000kg.m^{-3}$ la masse volumique de l'eau du bassin ;
- $C_D = \frac{D}{0.5\rho S U^2}$, le coefficient de traînée, avec D l'effort de traînée en N parallèle et opposé à la vitesse U du chariot.

III – 1 Gîte nulle - Aile complètement immergée

On observe que le champ de vagues est en opposition de phase si le foil est dans un cas de portance ($AoA > -2^\circ$) ou de déportance ($AoA < -3^\circ$). On peut remarquer aussi, dans le cas du foil portant, que l'amplitude de la surface libre atteint son maximum pour une immersion $\frac{h}{c} = 1.5$. Dans le cas du foil déportant, l'amplitude du champ de vagues est plus importante pour les faibles immersions et tend vers zéro quand l'immersion augmente.

III – 1.1 C_L et C_d vs AoA pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à gîte = 0°

Sur la Figure 3 sont représentées les évolutions des coefficients de portance (gauche) et traînée (droite) en fonction de l'angle d'incidence AoA pour plusieurs immersions $\frac{h}{c}$ à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. On observe que le coefficient de portance C_L a un comportement linéaire au-dessous de 5° (surtout pour les grands $\frac{h}{c}$), mais que la pente varie avec l'immersion. Pour les grandes immersions, la pente est légèrement inférieure à la théorie linéaire sans surface libre (2π en rad^{-1}) et cette pente décroît avec la proximité de la surface libre. Pour toutes les incidences, la portance diminue lorsque le foil se rapproche de la surface libre. L'angle de portance nulle $AoA_0 = -2.6^\circ$ est peu sensible à l'immersion, sauf pour les valeurs très faibles (pour $\frac{h}{c} = 0.25$).

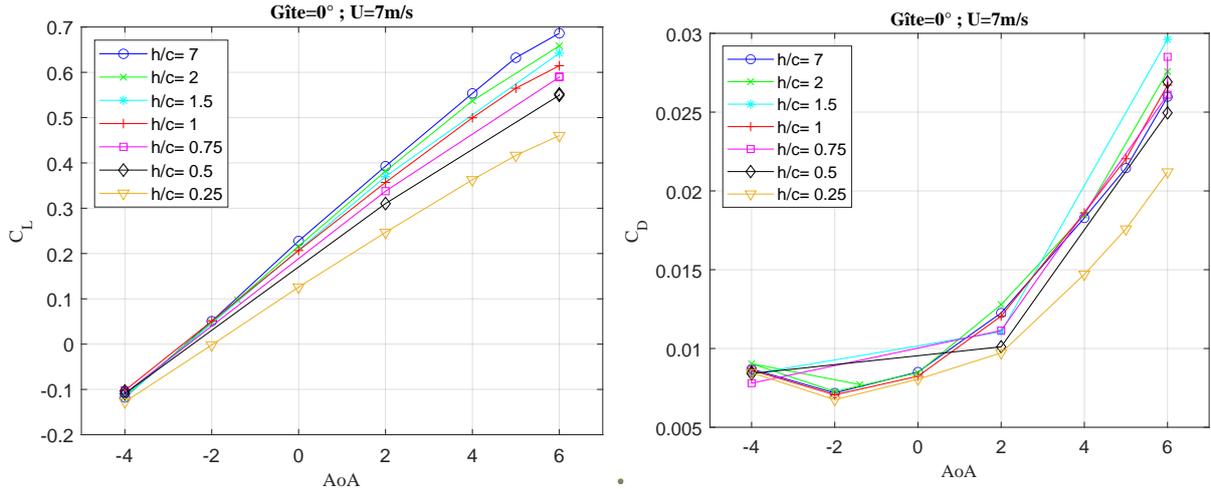


FIGURE 3 – C_L et C_d vs AoA pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à gîte = 0° et $U = 7m.s^{-1}$.

Le comportement du coefficient de traînée C_D varie selon une parabole avec l'incidence AoA conformément à la théorie sans surface libre. Le coefficient de traînée le plus faible pour tous les AoA est obtenu pour l'immersion la plus faible ($\frac{h}{c} = 0.25$).

III – 1.2 C_L et C_d vs $\frac{h}{c}$ pour plusieurs AoA à gîte = 0°

Sur la Figure 4 sont représentées les évolutions des coefficients de portance (gauche) et traînée (droite) en fonction de l'immersion $\frac{h}{c}$ pour plusieurs angles d'incidence AoA à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. On observe que le coefficient de portance C_L a un comportement monotone pour les incidences supérieures à l'angle de portance nulle (-2.6°). Le coefficient de portance est minimal pour une immersion minimale et il augmente quand l'immersion augmente. Le coefficient de portance se stabilise pour les immersion $\frac{h}{c} > 2-3$. Pour les incidences inférieures à l'angle de portance nulle (déportance), le comportement n'est plus tout à fait monotone. La déportance est maximale pour une immersion minimale et diminue lorsque l'immersion augmente en passant par un minimum de déportance à $\frac{h}{c} = 0.5$.

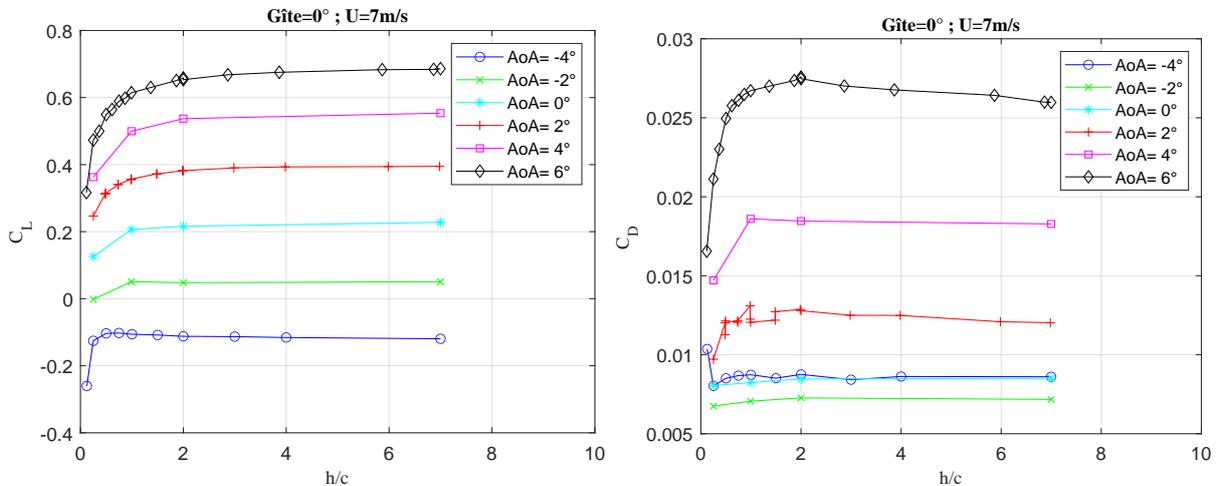


FIGURE 4 – C_L et C_d vs $\frac{h}{c}$ pour plusieurs AoA à gîte = 0° et $U = 7m.s^{-1}$.

Même si le coefficient de traînée semble se stabiliser pour les immersions supérieures à $\frac{h}{c} = 3$ pour toutes les incidences, son comportement n'est pas monotone. Il augmente avec l'immersion, passe par un maximum avant de se stabiliser. Lorsque l'aile se rapproche

de la surface libre, elle modifie le champ de pression et crée des vagues et donc de la traînée de vague. C'est pour cela qu'en se rapprochant de la surface libre on observe une croissance de la traînée (avec un maximum autour de $\frac{h}{c} = 1$ ou 2) avant la chute de traînée due à la baisse de portance (moins de traînée induite). La traînée est minimale à $AoA = -2^\circ$, proche de l'angle de portance nulle pour toutes les immersions. Lorsque l'aile est en déportance, la traînée est maximale pour l'immersion minimale qui correspond au maximum de déportance (traînée induite). D'une façon générale, lorsque l'aile porte vers le bas ($AoA < -2.6^\circ$), l'impact de la surface libre sur les efforts est moindre que pour l'aile portant vers le haut.

III – 1.3 C_L et C_d vs Fr_c pour plusieurs AoA et pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à Gîte = 0°

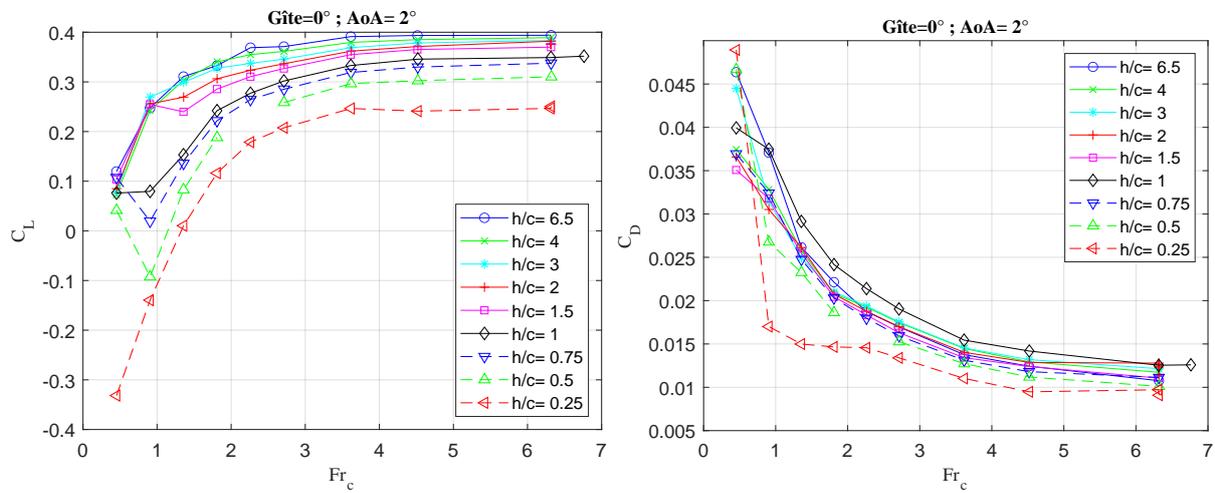


FIGURE 5 – C_L et C_d vs Fr_c à $AoA = 2^\circ$ pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à gîte = 0° .

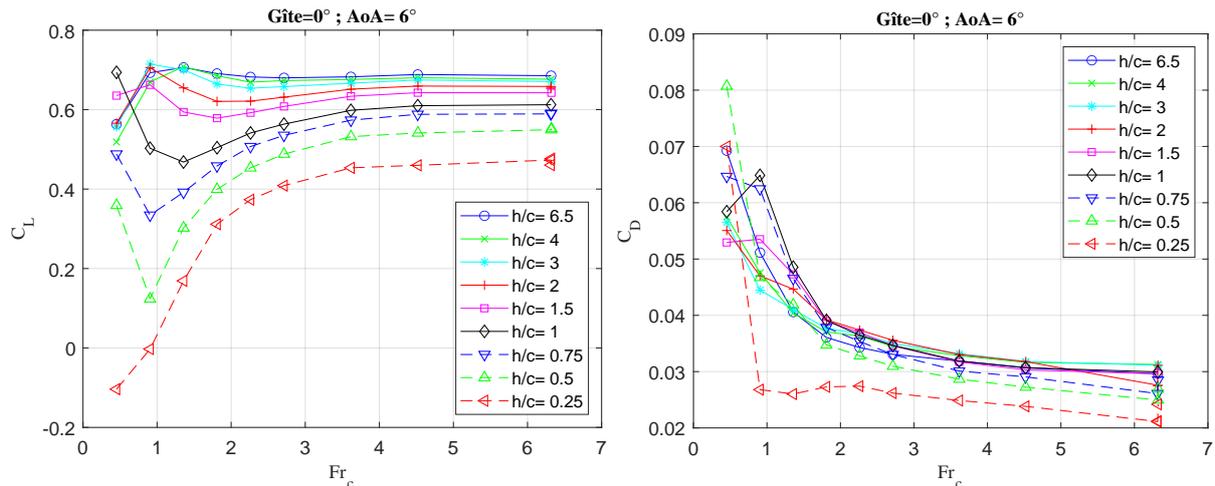


FIGURE 6 – C_L et C_d vs Fr_c à $AoA = 6^\circ$ pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à gîte = 0° .

Sur la Figure 5 sont représentées les évolutions des coefficients de portance (gauche) et traînée (droite) en fonction du nombre de Froude rapporté à la corde, Fr_c , pour plusieurs immersions $\frac{h}{c}$ pour un angle d'incidence $AoA = 2^\circ$. On observe que le coefficient de portance C_L a un comportement monotone pour les immersions supérieures à $\frac{h}{c} = 2$. Le coefficient de portance augmente avec la vitesse et se stabilise pour les Froude supérieurs

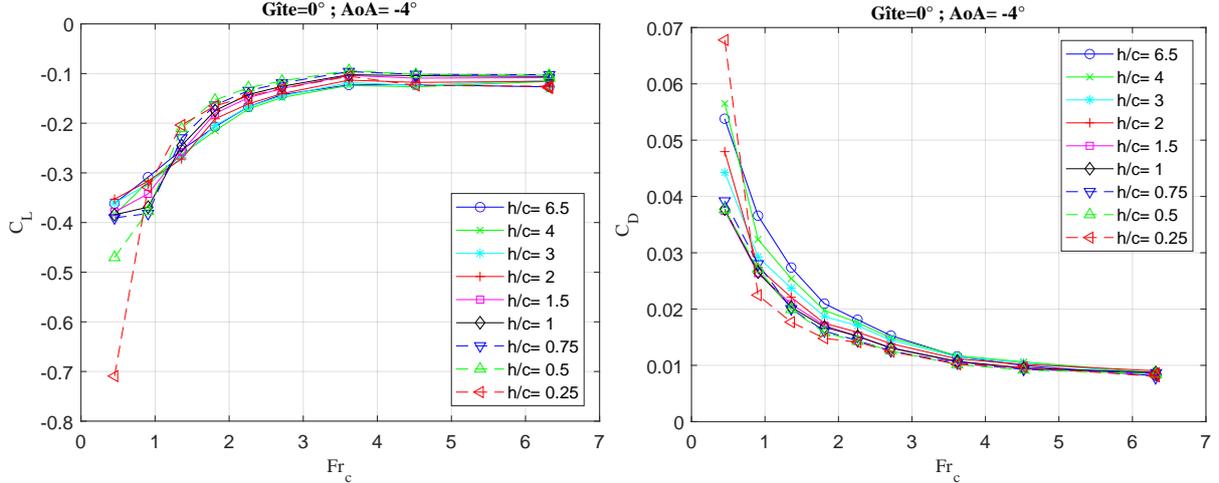


FIGURE 7 – C_L et C_d vs Fr_c à $AoA = -4^\circ$ pour plusieurs $\frac{h}{c}$ à gîte = 0° .

à 4. On retrouve le même comportement pour une immersion $\frac{h}{c} = 0.25$ avec un niveau de portance plus faible. Pour les immersions intermédiaires, le coefficient de portance n'est pas monotone. Il passe par un extremum pour un Froude égal à 1. Il est remarquable que la portance change de sens ($C_L < 0$) pour un Froude inférieur à 1.25 pour les plus faibles immersions. Notons tout de même que l'incertitude sur les coefficients d'effort à la vitesse la plus basse de $0.5m.s^{-1}$ est élevée, de l'ordre de 50%.

L'évolution du coefficient de traînée est monotone décroissante pour toute les immersions avec l'augmentation de la vitesse. Le coefficient de traînée diminue quand la vitesse augmente et se stabilise pour les Froude supérieurs à 4. Par ailleurs, on peut supposer qu'à l'immersion maximale $\frac{h}{c} = 6.5$ la surface libre n'a plus d'effet, et par conséquent les variations des coefficients d'efforts avec la vitesse sont davantage dus à des effets de nombre de Reynolds, et non à des effets de Froude, car la surface libre est peu déformée. En particulier, le comportement à basse vitesse est probablement dominé par des phénomènes de transition.

Sur la Figure 6 sont représentées les évolutions des coefficients de portance (gauche) et traînée (droite) en fonction du nombre de Froude rapporté à la corde, Fr_c , pour plusieurs immersions $\frac{h}{c}$ pour un angle d'incidence $AoA = 6^\circ$. On observe que pour une aile fortement chargée en portance, il n'y a pas de comportement monotone en fonction de la vitesse à part pour le cas à très faible immersion $\frac{h}{c} = 0.25$. Pour les faibles immersions $0.5 \leq \frac{h}{c} \leq 1$ le coefficient de portance passe par un minimum à $Fr_c \approx 1$ avant de se stabiliser et de converger vers un même niveau pour les Froude supérieurs à 4. Inversement, pour les fortes immersions $1.5 \leq \frac{h}{c} \leq 6.5$ le coefficient de portance passe par un maximum à $Fr_c \approx 1$ avant de diminuer et remonter pour se stabiliser et converger vers un même niveau pour les Froude supérieurs à 4.

Le comportement en traînée est similaire pour une aile fortement chargée ($AoA = 6^\circ$) à une aile moyennement chargée ($AoA = 2^\circ$) avec néanmoins une traînée et un gradient pour les faibles vitesses plus importants. En revanche, pour cette forte incidence, même à l'immersion maximale, la surface libre est déformée et affecte les efforts. On a donc à la fois un effet du nombre de Reynolds et du nombre de Froude.

Sur la Figure 7 sont représentées les évolutions des coefficients de portance (gauche) et traînée (droite) en fonction du nombre de Froude rapporté à la corde, Fr_c , pour plusieurs immersions $\frac{h}{c}$ pour un angle d'incidence $AoA = -4^\circ$. On observe que le coefficient de

portance a un comportement monotone et fortement similaire pour toutes les immersions. Plus la vitesse est faible, plus le coefficient de déportance ($|C_L|$) est fort. La portance est stabilisée pour les Froude supérieures à 3.

Le comportement en traînée est similaire pour une aile en déportance à une aile en portance avec une variation du coefficient de traînée monotone décroissante avec la vitesse avec un réseau de courbes très resserrées. La traînée et le gradient pour les faibles vitesses sont plus importants en comparaison du cas de l'aile en portance.

III – 2 Gîte non nulle

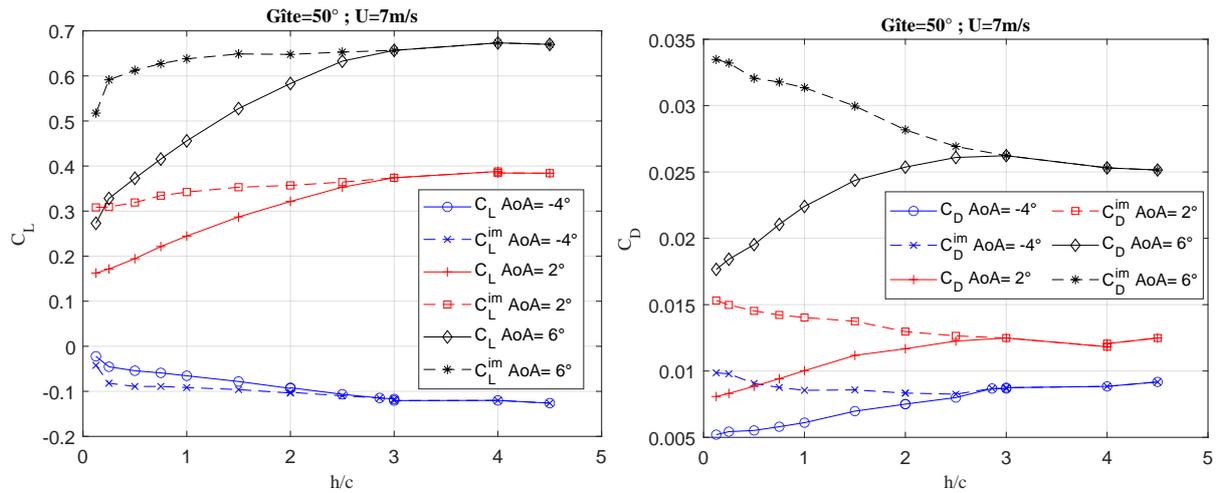


FIGURE 8 – C_L et C_d vs $\frac{h}{c}$ pour plusieurs AoA à Gîte = 50° et $U = 7m.s^{-1}$; trait plein : C_i définis par rapport à la surface totale de l'aile; trait pointillé : C_i^{im} définis par rapport à la surface immergée de l'aile.

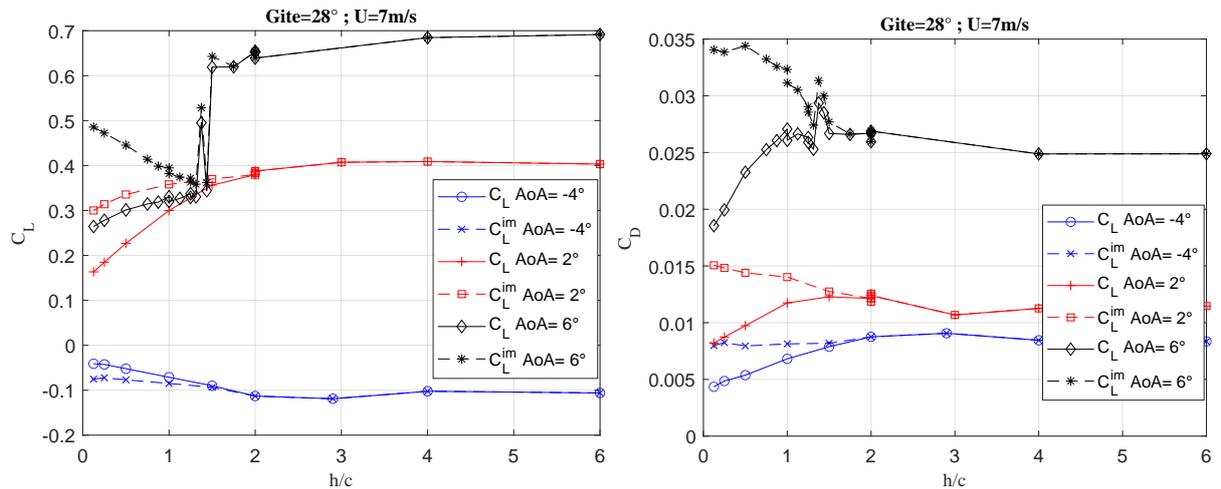


FIGURE 9 – C_L et C_d vs $\frac{h}{c}$ pour plusieurs AoA à Gîte = 28° et $U = 7m.s^{-1}$; trait plein : C_i définis par rapport à la surface totale de l'aile; trait pointillé : C_i^{im} définis par rapport à la surface immergée de l'aile.

Sur la Figure 8 sont représentées en traits pleins les évolutions du coefficient de portance (gauche) et du coefficient de traînée (droite) en fonction de l'immersion $\frac{h}{c}$, pour plusieurs AoA , pour une gîte de 50° à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. On constate une nette diminution de tous les coefficients (en valeur absolue) lorsque l'immersion diminue au-dessous de $\frac{h}{c} = 3$. Or il se trouve qu'à cet angle de gîte important, l'extrémité

| Gîte (°) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{h}{c}$ émerge | 0.66 | 1.30 | 1.90 | 2.44 | 2.91 | 3.29 |

TABLE 3 – Valeur de $\frac{h}{c}$ au-dessous de laquelle l’aile émerge, en fonction de la gîte.

supérieure de l’aile émerge dès que $\frac{h}{c} < 2.91$. Ces coefficients d’effort étant définis par rapport à la surface totale de l’aile, leur diminution est donc majoritairement imputable à la diminution de la surface immergée. Il est alors plus pertinent de définir de nouveaux coefficients par rapport à la surface portante immergée, S^{im} pour chaque valeur de gîte et $\frac{h}{c}$:

$$C_L^{im} = \frac{L}{0.5\rho S^{im}U^2} \quad ; \quad C_D^{im} = \frac{D}{0.5\rho S^{im}U^2}$$

L’évolution de ces nouveaux coefficients est tracée en pointillés sur la figure 8. Les coefficients de portance ainsi définis diminuent faiblement avec la diminution de la profondeur d’immersion, de façon à peu près similaire aux cas sans gîte. A l’inverse, les coefficients de traînée ainsi définis augmentent avec la diminution de la profondeur d’immersion. Ceci peut se comprendre, d’une part par la diminution de l’allongement de la partie immergée de l’aile, qui entraîne plus de traînée induite, et d’autre part par l’augmentation de la section qui coupe la surface libre (traînée de spray et de vague).

Tant que l’aile n’émerge pas, la gîte n’a pratiquement aucun effet sur les efforts, sachant que la portance est définie dans le repère gîté (*cf.* section II)-

Sur la Figure 9 sont représentées les évolutions du coefficient de portance (gauche) et du coefficient de traînée (droite) en fonction de l’immersion $\frac{h}{c}$, pour plusieurs AoA , pour une gîte de 28° à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. les mêmes observations peuvent être faites pour les angles d’incidence $AoA = 2^\circ$ et $AoA = -4^\circ$. En revanche, on observe un comportement très différent lorsque l’aile est fortement chargée ($AoA = 6^\circ$), avec une chute brutale de la portance lorsque l’aile émerge ($\frac{h}{c} \approx 1.5$). L’observation montre une forte ventilation sur la demi-aile supérieure dans ces cas-là -Figure 10. Il a été remarqué que la ventilation ne se propage le long de l’aile, jusqu’au mât de support, que lorsque la gîte est inférieure à environ 40° . Au-delà de cet angle, la baisse de l’interface air-eau sur l’extrados reste limitée, et aucune ventilation significative n’est observée le long de l’envergure de l’aile. La Table 3 précise la valeur d’immersion au-dessous de laquelle une partie de l’aile émerge, pour chaque valeur de gîte.

IV – Analyse et discussion

La vitesse relative du foil dans un écoulement provoque une différence de pression entre l’intradros et l’extrados de l’aile. Cette différence de pression induit une portance et une traînée induite par cette portance. Une autre partie de la traînée est due à des forces visqueuses exercées par l’eau sur l’aile en mouvement. L’écoulement autour d’un foil est de plus influencé par la présence de la surface libre. La liste suivante présente les quatre effets majeurs de la surface libre auxquels on peut s’attendre [3, 4] :

- le champ de pression : celui-ci est affecté par la proximité de la surface libre. L’écoulement au dessus du foil est limité par l’extrados et par la surface libre, modifiant ainsi la dépression. Cela induit une perte de portance pour les Froude supérieurs à 1 ;

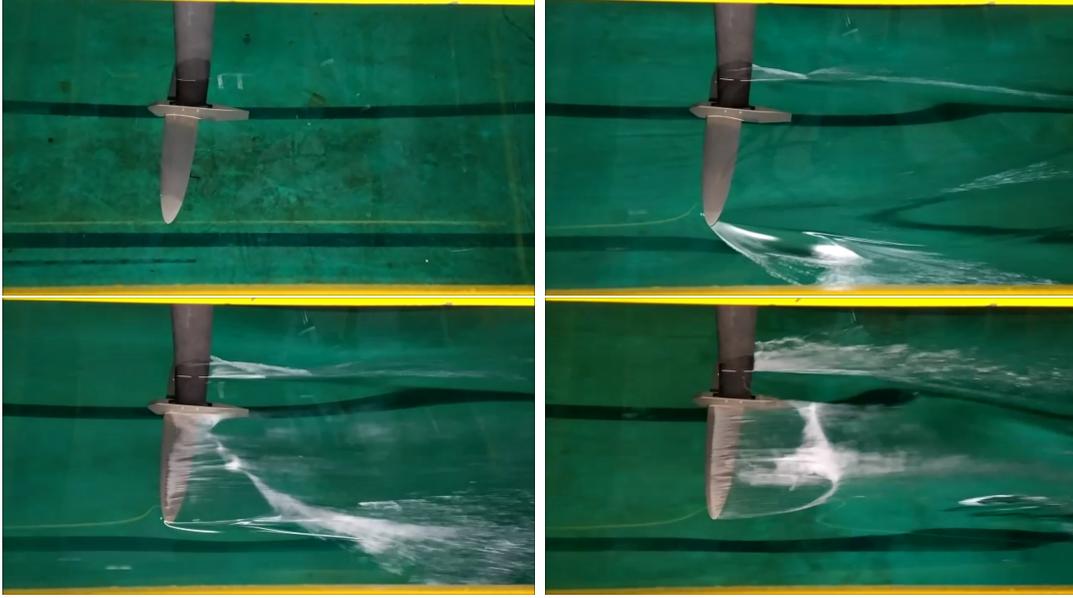


FIGURE 10 – Cas de ventilation sur l’aile elliptique ($G\acute{i}te = 28^\circ$; $\frac{h}{c} = 0.375$; $AoA = 6^\circ$: $U = 7m.s^{-1}$.

- le champ de vagues : le champ de pression autour du foil va provoquer une déformation de la surface libre et cette déformation va générer une traînée de vague, qui dépend de l’immersion, l’incidence, la gîte et le Froude ;
- l’embrun : dans le cas où l’aile perce la surface libre, des projections se produisent et entraînent une traînée supplémentaire dite de spray ;
- ventilation : la pression sur les faces de l’aile peut atteindre une valeur inférieure à la pression atmosphérique dans des cas où le foil est proche de la surface. Il peut en résulter une aspiration formant une poche d’air recouvrant une partie de l’extrados. Cette ventilation occasionne une chute de la portance et une augmentation de la traînée.

Tous ces phénomènes ont bien été observés en fonction des combinaison de gîte, d’incidence et d’immersion. Les cas de ventilation ne sont pas traités ici, et nécessitent plus de travail. L’analyse qui suit vise à synthétiser les évolutions des efforts mesurés avec les différents paramètres, dans la perspective d’établir, in fine, un modèle d’efforts prenant en compte la proximité de la surface libre.

Les précédents résultats montrent que, pour toutes les conditions dans les gammes de paramètres étudiées, $C_L(\alpha)$ est une fonction linéaire pour des angles d’incidence inférieurs à 5° et $C_D(C_L)$ est une fonction polynomiale du second ordre. On peut écrire :

$$C_L = \frac{dC_L}{d\alpha}(\alpha - \alpha_0) \quad (1)$$

$$C_D = C_{D_{min}} + \frac{(C_L - C_{L_{md}})^2}{\pi AR_{eff}} ; \quad AR_{eff} = e AR_{geo} \quad (2)$$

La méthode développée par Lance W. Traub [9] permet de décrire les coefficients d’effort pour chaque valeur de gîte et d’immersion, par les paramètres suivants qui représentent fidèlement les tendances : la pente $\frac{dC_L}{d\alpha}$ et l’angle de portance nulle α_0 sont déterminés par régression linéaire de $C_L(\alpha)$ pour les incidences entre -4° et 5° ; le coefficient de traînée

minimale $C_{D_{min}}$, le coefficient de portance pour la traînée minimale $C_{L_{md}}$, et le rapport d'aspect effectif AR_{eff} , ou de façon équivalente le coefficient d'Oswald e , sont déterminés par un fit quadratique sur $C_D(C_L)$. Le rapport d'aspect géométrique est celui de la partie immergée de l'aile, défini par $AR_{geo} = \frac{(b^{im})^2}{S^{im}}$. On obtient les coefficients :

$$C_D \approx B_1 C_L^2 + B_2 C_L + B_3 \quad (3)$$

Ce qui nous donne :

$$C_{L_{md}} = \frac{B_2}{-2B_1} \quad ; \quad C_{D_{min}} = B_3 - \frac{B_2^2}{4B_1} \quad ; \quad AR_{eff} = \frac{1}{\pi B_1} = e AR_{geo} \quad (4)$$

Sur la Figure 11 sont représentées les évolutions de l'angle de portance nulle, AoA_0 (gauche) et de la pente du coefficient de portance, $\frac{dC_L}{d\alpha}$ (droite) en fonction de l'immersion $\frac{h}{c}$, pour plusieurs angles de gîte à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. On peut remarquer que l'angle de portance nulle est quasiment constant ($AoA_0 = -2.7^\circ \pm 0.15^\circ$), peu dépendant de l'immersion et de la gîte dès que $\frac{h}{c} > 0.5$. Pour les très faibles immersions, à gîte nulle, AoA_0 tend à augmenter ($AoA_0 = -2^\circ$), alors qu'il a tendance à diminuer pour les fortes gîtes ($AoA_0 = -3.2^\circ$). La pente du coefficient de portance est quant à elle nettement plus dépendante de l'immersion et de la gîte. On remarque que, quelle que soit la gîte du foil, les évolutions de $\frac{dC_L}{d\alpha}$ ont toutes les mêmes tendances avec une partie croissante pour $\frac{h}{c}$ compris entre $[0.125 : 3]$ et une partie constante entre $[3 : 7]$. Sur cette même figure, sont représentées en pointillés, les pentes théoriques des profils minces : $\frac{dC_L}{d\alpha} = 2\pi \frac{AR_{geo}}{2 + \sqrt{AR_{geo}^2 + 4}}$

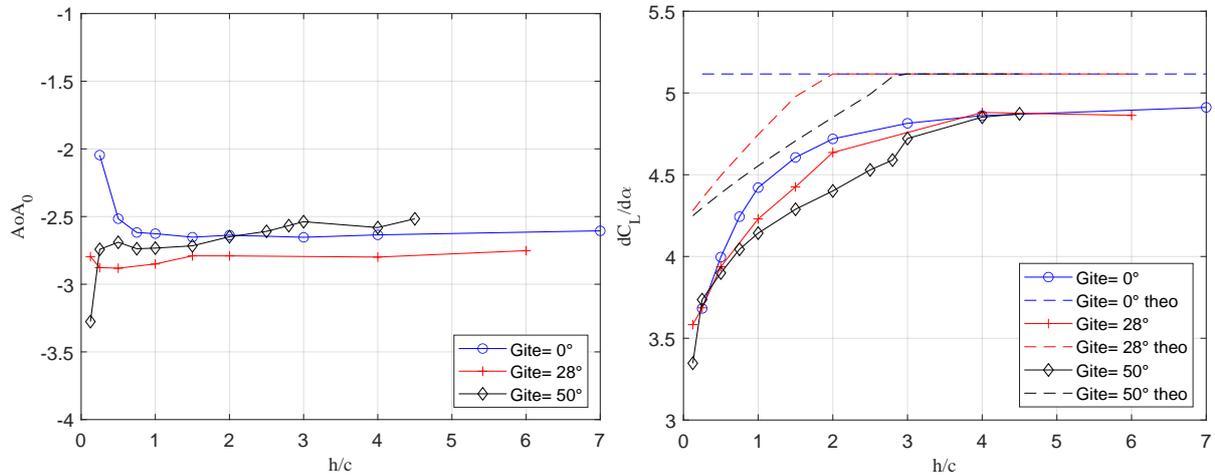


FIGURE 11 – AoA_0 et $\frac{dC_L}{d\alpha}$ en fonction de $\frac{h}{c}$ pour plusieurs angles de gîte et $U = 7m.s^{-1}$. En pointillés la pente théorique $\frac{dC_L}{d\alpha} = 2\pi \frac{AR_{geo}}{2 + \sqrt{AR_{geo}^2 + 4}}$.

Sur la Figure 12 sont représentées les évolutions du coefficient de traînée minimum, $C_{D_{min}}$ (gauche) et du coefficient de portance au minimum de traînée, $C_{L_{md}}$ (droite) en fonction de l'immersion $\frac{h}{c}$, pour plusieurs angles de gîte à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. On observe que ces coefficients ne varient pas significativement avec l'immersion ni l'angle de gîte, et valent respectivement $C_{D_{min}} = (7.5 \pm 1)10^{-3}$ et $C_{L_{md}} = (4 \pm 2)10^{-2}$.

Sur la Figure 13 sont représentées les évolutions du rapport d'aspect effectif, AR_{eff} (gauche) et du coefficient d'Oswald, e (droite) en fonction de l'immersion $\frac{h}{c}$, pour plusieurs angles de gîte à la vitesse chariot $U = 7m.s^{-1}$. Les valeurs du rapport d'aspect géométrique de la partie immergée de l'aile sont tracées en pointillés. Pour l'aile gîtée, la

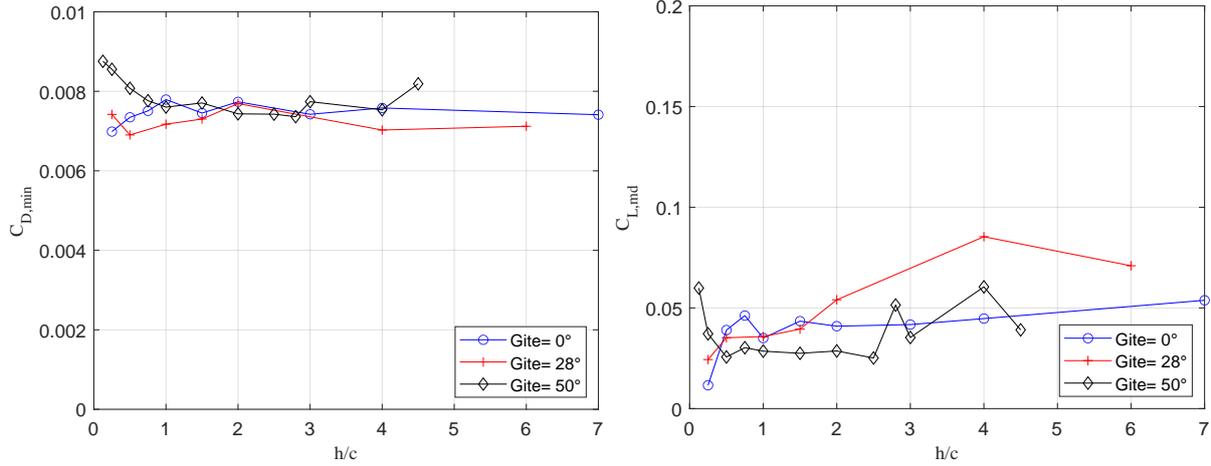


FIGURE 12 – $C_{D_{min}}$ et $C_{L_{md}}$ en fonction de $\frac{h}{c}$ pour plusieurs angles de gîte et $U = 7m.s^{-1}$.

pente $\frac{dC_L}{d\alpha}$ et le rapport d'aspect effectif suivent bien les tendances de la pente théorique et du rapport d'aspect géométrique immergé, ce qui indique que l'impact de l'immersion sur une aile gîtée est dominé par le fait que l'aile émerge. En l'absence de gîte, le rapport d'aspect géométrique reste inchangé car l'aile n'émerge pas. Cependant, la pente $\frac{dC_L}{d\alpha}$ et le rapport d'aspect effectif chutent tout de même fortement avec la diminution de l'immersion, car c'est alors la totalité de la surface de l'aile qui se trouve proche de la surface. A l'inverse pour une aile gîtée, seule la partie supérieure de l'aile se trouve à proximité immédiate de la surface, voire la perce et émerge, le reste de l'aile étant peu affecté par la surface libre, tant qu'il n'y a pas de phénomène de ventilation.

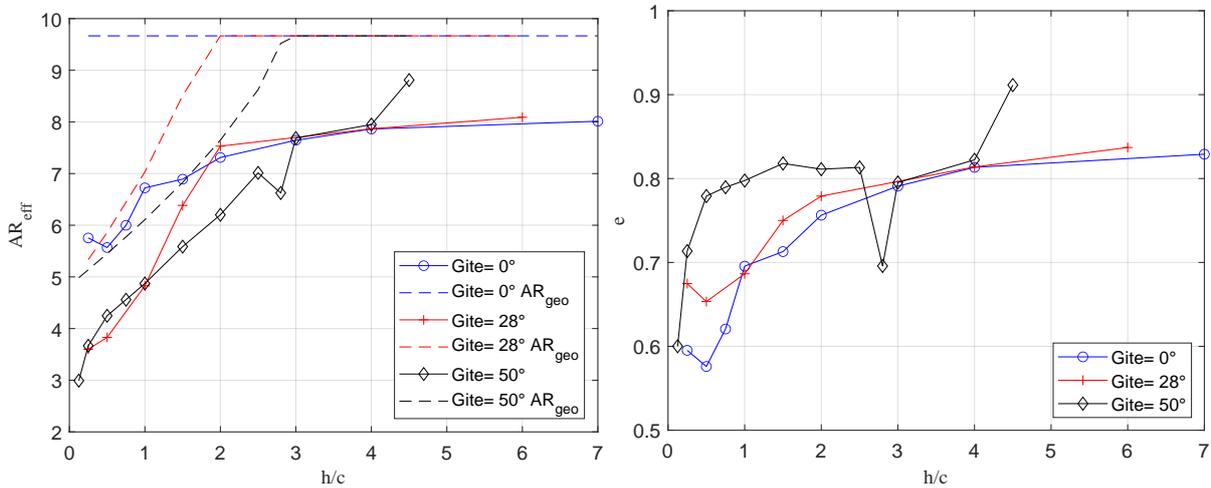


FIGURE 13 – AR_{eff} et e en fonction de $\frac{h}{c}$ pour plusieurs angles de gîte et $U = 7m.s^{-1}$. En pointillés le rapport d'aspect géométrique de la surface immergée AR_{geo} .

V – Conclusions et perspectives

Une campagne d'essais de traction d'un hydrofoil droit de forme plane elliptique, de section H105, et de rapport d'aspect égal à 9.67 est réalisée dans le bassin de traction de Centrale Nantes. L'aile étudiée est reliée à une balance hydrodynamique par un mât et un fuselage, formant un foil en T. Les effets de la surface libre sur une aile portante isolée sont obtenus en soustrayant aux efforts mesurés, ceux obtenus en répétant les essais en

l'absence de l'aile. Les efforts hydrodynamiques sur l'aile (portance et traînée) sont étudiés en fonction des angles d'incidence et de gîte, ainsi que la profondeur d'immersion, pour des nombres de Froude élevés ($Fr_c = 6.3$). Les mesures sont analysées afin d'explorer le fonctionnement de l'aile et l'impact de la proximité à la surface libre sur ses performance, et d'élaborer des modèles d'effort destinées à alimenter des programmes de prédiction de performance.

Premièrement, il est observé que la gîte de l'aile n'affecte pas les efforts de portance (définie dans la direction normale à l'envergure) et de traînée, tant que l'aile n'émerge pas.

Deuxièmement, pour les incidences entre -4° et 5° , le coefficient de portance évolue linéairement avec l'incidence, et le coefficient de traînée évolue de façon parabolique, conformément à la théorie des ailes minces.

On peut donc représenter les efforts hydrodynamiques par les coefficients suivants : la pente $\frac{dC_L}{d\alpha}$, l'angle de portance nulle α_0 , le coefficient de traînée minimale $C_{D_{min}}$, le coefficient de portance à la traînée minimale $C_{L_{md}}$, et le rapport d'aspect effectif AR_{eff} , ou de façon équivalente le coefficient d'Oswald e . Ces divers coefficients sont affectés par la proximité de la surface libre différemment selon l'angle de gîte.

En l'absence de gîte, la surface libre n'affecte pas les efforts tant que la profondeur d'immersion est supérieure à trois fois la corde, et les coefficients sont ceux d'une aile 3D en milieu infini. Lorsque l'immersion diminue, la portance et son taux de croissance avec l'incidence diminuent de façon monotone, d'abord progressivement puis fortement. La traînée commence par augmenter légèrement par un effet de traînée de vague, puis chute comme la portance, dominée par la traînée induite. Une aile qui porte vers le bas (déportance) est moins affectée par la proximité de la surface libre, avec une tendance inverse pour des immersions très faibles.

Pour une aile gîtée se rapprochant de la surface, le comportement des efforts est essentiellement dominé par le fait que l'extrémité supérieure de l'aile émerge. La simple prise en compte de la surface immergée et de son nouveau rapport d'aspect permet alors de représenter correctement l'effet de la surface libre sur les efforts.

Pour une aile fortement chargée, qui émerge avec un angle de gîte inférieur à 40° , l'impact de la surface libre est plus drastique, en raison d'une poche de ventilation qui se développe sur la demi-aile supérieure, de façon violente et dans certains cas instable.

Enfin, en pratique, pour un navire ou engin supporté par des hydrofoils, la traînée totale augmente avec la longueur de mât immergée. Il existe donc une immersion de finesse optimale qui dépend de la gîte et de l'incidence. Pour le foil en T étudié ici, à gîte nulle, la finesse maximale se situe à l'immersion $\frac{h}{c} = 1$ pour une incidence $AoA = 2^\circ$ et $\frac{h}{c} = 2.5$ pour une incidence $AoA = 6^\circ$.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet *Du Carbone à l'Or Olympique (CtoOR)* financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) par la subvention ANR-19-STHP-0002. Les auteurs remercient chaleureusement l'équipe technique de l'IRENav (SCEFER) pour la conception et la réalisation de l'aile elliptique et du montage expérimental.

Références

- [1] J. Binns, P. Brandner, and J. Plouhinec. The effect of heel angle and free-surface proximity on the performance and strut wake of a moth sailing dinghy rudder t-foil.

In *3rd High Performance Yacht Design Conference, Auckland*, December 2008.

- [2] M. Daskovsky. The hydrofoil in surface proximity, theory and experiment. *Ocean engineering*, 27(10) :1129–1159, 2000.
- [3] O. Faltinsen. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. *Cambridge University Press google schola*, 3 :386–391, 2005.
- [4] G. Hough and J. Moran. Froude number effects on two-dimensional hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 13(01) :53–60, 2022.
- [5] C. Jego. *CFD investigation of the impact of the free surface proximity on the performances of a T-shaped Olympic Class Kitefoil hydrofoil*. Msc. thesis, University of Southampton, 2022.
- [6] H. Nicolas, P. Perali, M. Sacher, and P. Bot. Boundary element method analysis of 3d effects and free-surface proximity on hydrofoil lift and drag coefficients in varied operating conditions. *Journal of Sailing Technology*, 8(01) :183–199, 2023.
- [7] P. Perali, M. Sacher, J.-B. Leroux, J. Wackers, B. Augier, F. Hauville, and P. Bot. Comparaison de conditions de surface libre linéarisées pour l’étude d’un hydrofoil submergé à l’aide d’une approche potentielle. *25ème Congrès Français de Mécanique*, 2022.
- [8] L. Pernod, M. Sacher, J. Wackers, B. Augier, and P. Bot. Free-surface effects on two-dimensional hydrofoils by rans-vof simulations. *Journal of Sailing Technology*, 8(01) :24–38, 2023.
- [9] L. W. Traub. Calculation of the oswald efficiency factor from drag polars : A critical assessment. *Journal of Aircraft*, 59(6) :1608–1615, 2022.