

Optimisation de la vitesse d'un catamaran grâce à l'ajustement de l'incidence du foil

Titouan GROSS-TREFOIS 25422



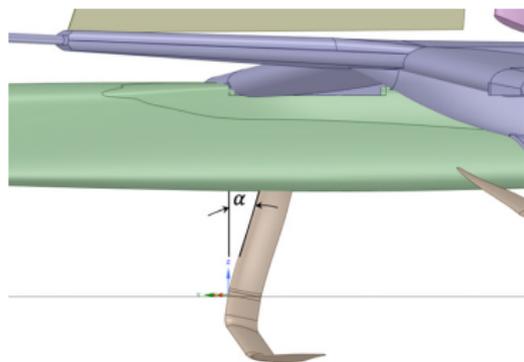
Formules de la Portance et de la Traînée

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_P$$

$$T = \frac{1}{2} \rho v^2 S' C_T$$

- S : surface qui porte $\approx 0.42m^2$

- S' : surface qui engendre la traînée $\approx 0.075m^2$



Source : Johan von Matern
(grabcad.com)

- Maximiser la portance

$$S' = S \cdot \cos(\alpha)$$

Portance du bateau $\approx 30\,000\text{N}$

- Eviter le décrochage

- Hypothèses

Pas de gîte

Phénomènes négligés

Problématique

Comment ajuster l'angle d'incidence d'un foil afin de maximiser la vitesse et la stabilité d'un catamaran ?

❶ Étude numérique

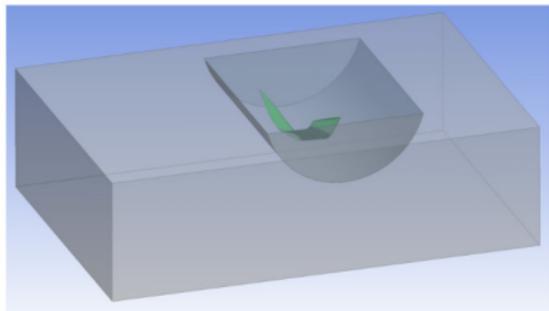
- Méthodologie
- Résultats

❷ Étude approfondie

- Compréhension
- Adaptation des résultats

❸ Mise en cohérence

- Avec mon binôme
- Avec les résultats utilisés en course



- **Modéliser le déplacement**

Volume global

Volume local

- **Définir les conditions de simulation**

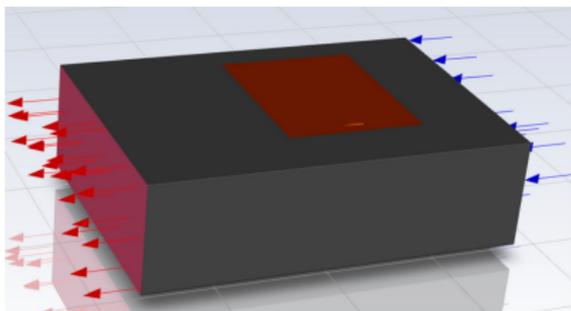
Vitesse d'entrée

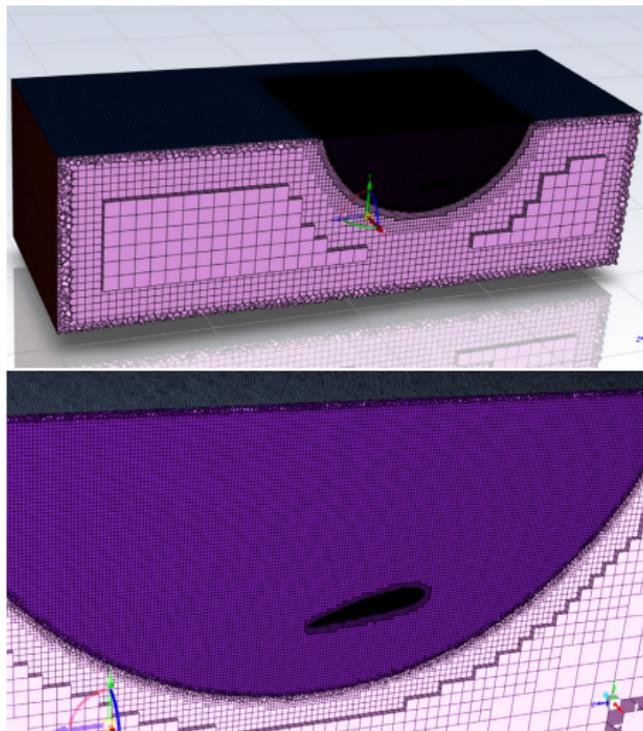
Pression de sortie

- **Définir la plage d'étude**

Incidence de -5° à 20°

Vitesse de 8.3 m/s
à 27.7 m/s



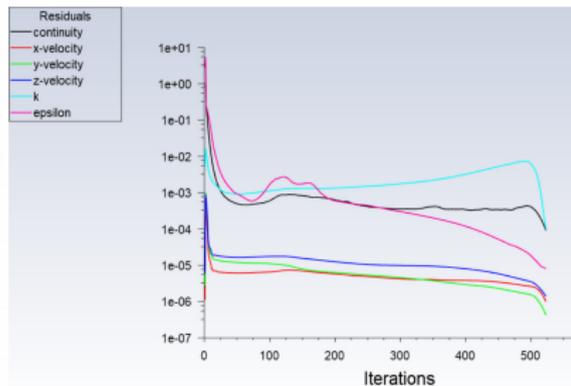
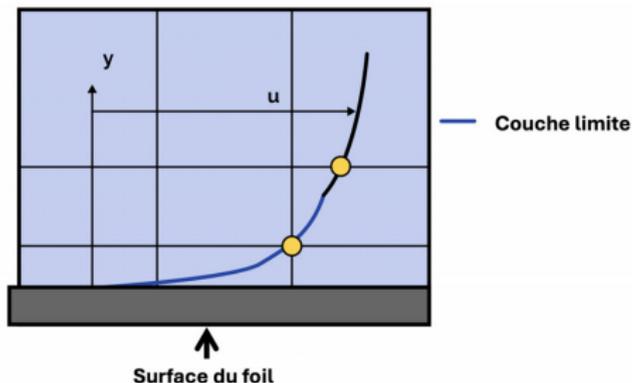


- **Comment définir les conditions de maillage ?**

Précision du modèle
Temps de calcul

- **Comment vérifier la pertinence de notre maillage ?**

Valeur du Y^+
Convergence des valeurs

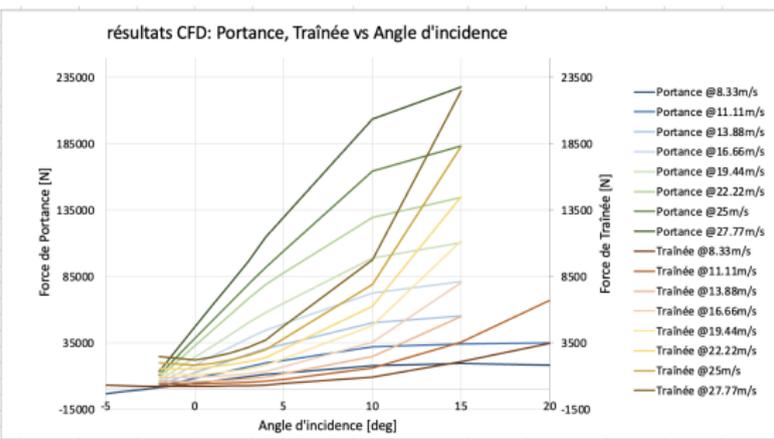


Y^+ et modèle de turbulence $k - \varepsilon$

$$Y^+ = \frac{yu}{\nu}$$

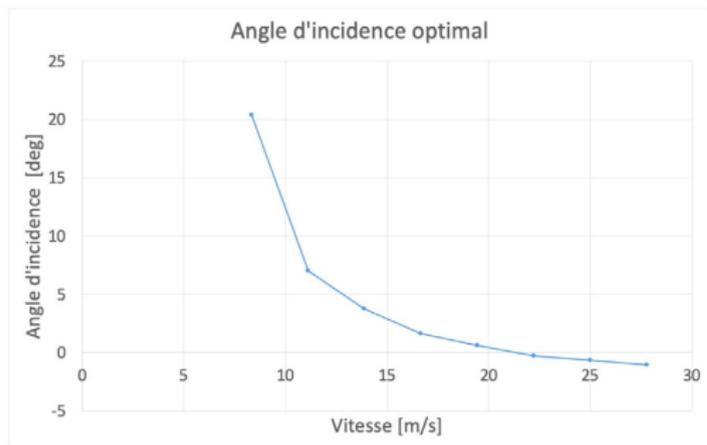
- Valeurs industrielles entre 30 et 300 assurent la pertinence

Vitesse			Angle foi deg	Portance N	Trainée N	Y+ avg	
m/s	km/h	noeuds					
8,33	30	16,2	-30	-12652	7119	113	
			-5	-3209	311	144	
			-4	-1755	256	154	
			-3	-225	235	156	
			-2	1214	223	157	
			-1	2902	225		Pb maillage ?!
			0	4589	226	158	
			1	6249	241	159	
			2	7899	264	158	
			3	9625	292	158	
			4	11140	335	158	
			5	12256	429	154	
			10	17838	899	145	
			15	19542	2071	135	
			20	18422	3464	126	
11,11	40	21,6	-2	2160	397		1,779
			0	8208	387	204	1,789
			1	11116	429		1,779
			2	14051	470		1,779
			3	17121	519		1,779
			4	19816	596		1,779
			5	21837	761	200	1,782
			10	31938	1589	188	1,790
			15	34162	3540	174	1,748
			20	35247	6692	164	1,913



Objectif : Créer une courbe d'angles optimaux

- Récupération de l'angle créant 30 000N de portance pour chaque vitesse



- **Pertinence des résultats ?**

Vu de loin

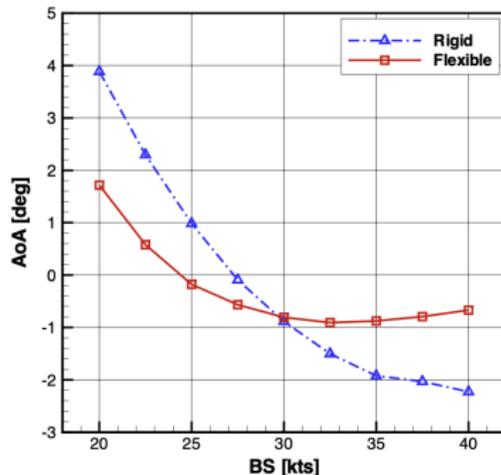
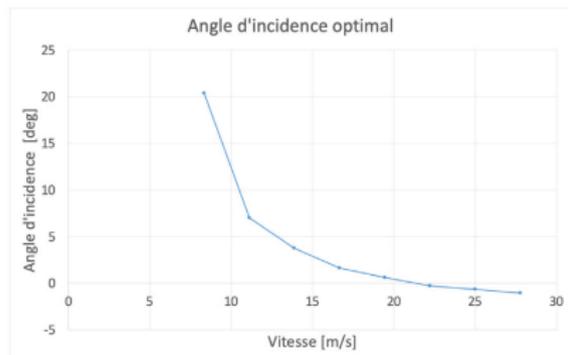
Vu de plus près

- **Explication des aberrations**

Portance du bateau

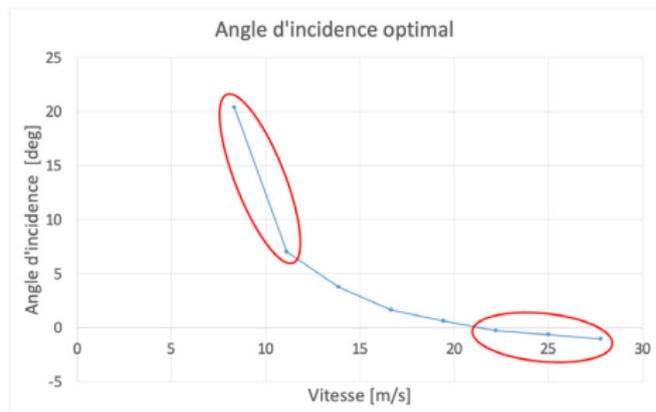
$\approx 100N$

Profil du foil inexact



Source : Olivier Le Maître (CNRS)

Peut-on prendre en compte la flexibilité du matériau ?



- **Angle au décollage $\approx 5^\circ$**

Problème de
compréhension

- **Angle jamais négatif**

Angle réel $\approx 0.5^\circ$
Problème de symétrie
de la géométrie du foil

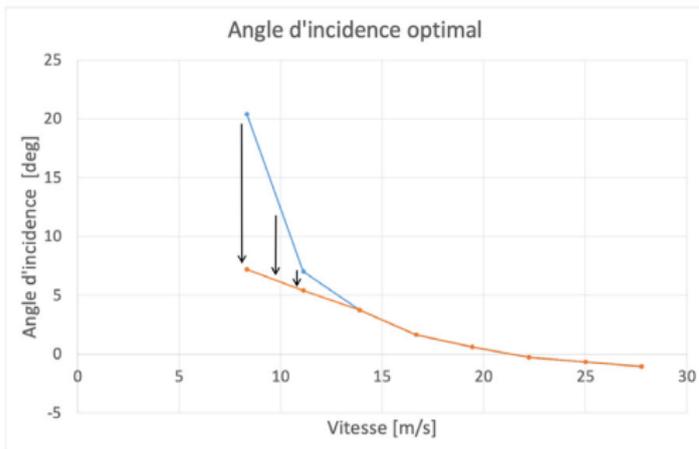
Fin de la première étude

Comment réduire les écarts avec la réalité ?



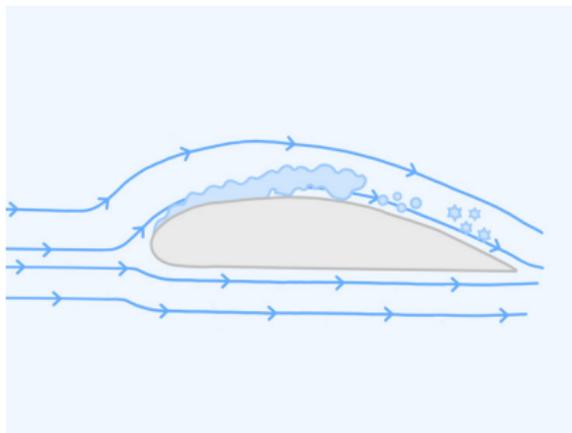
Prendre en compte le décollage du bateau

- 2 foils immergés ($\approx 15\,000\text{N}$ chacun) puis 1 seul foil ($\approx 30\,000\text{N}$)
- décollage autour de 11m/s

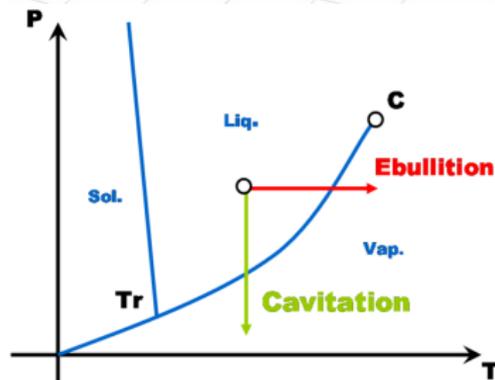
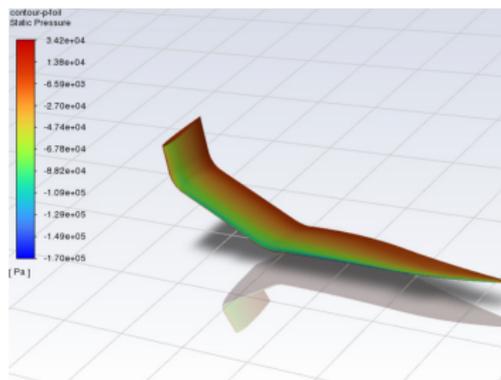


- Séparation en phases
- Apporte de la précision sur les faibles vitesses

		décollage avec les 2 foils	phase de relevage du foil au vent	navigation avec le foil au vent relevé					
		30	40	50	60	70	80	90	100
Vitesse	km/h	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44	22,22	25	27,77
Vitesse	m/s	2,31	3,05	3,83	4,63	5,39	6,17	7,0	7,72
% masse bateau par foil		50%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Angle foil		7,20	5,38	3,76	1,64	0,61	-0,28	-0,66	-1,05
Trainée totale		1272	769	762	914	1077	1529	1872	2350



- **Changement d'état de l'eau**
Densité divisée par ≈ 1000
- **Dégâts sur le foil**
Implosion des bulles d'air
- **Apparaît lors de la vaporisation**
Pression trop faible

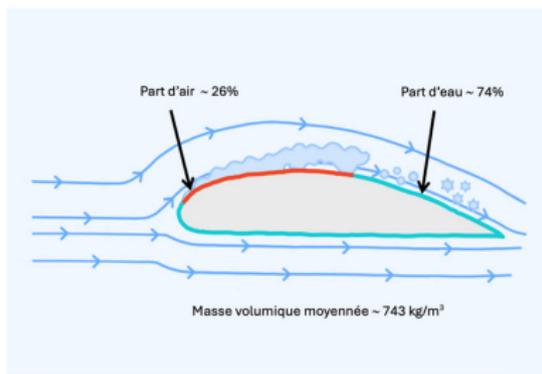


- Relevé de la pression statique sur le foil
- Comparaison avec la pression saturante

$$P_s \approx 20 \text{ mbar} = 2000 \text{ Pa}$$

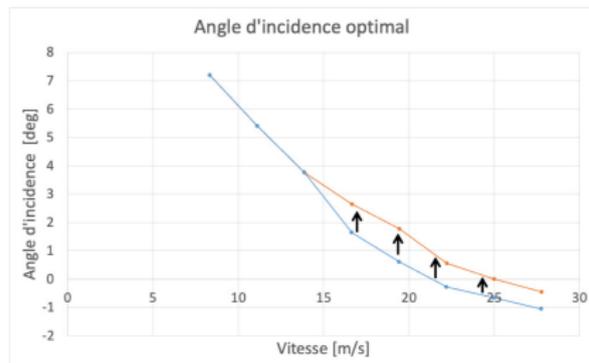
- Conclusion sur l'absurdité de certaines valeurs de portance

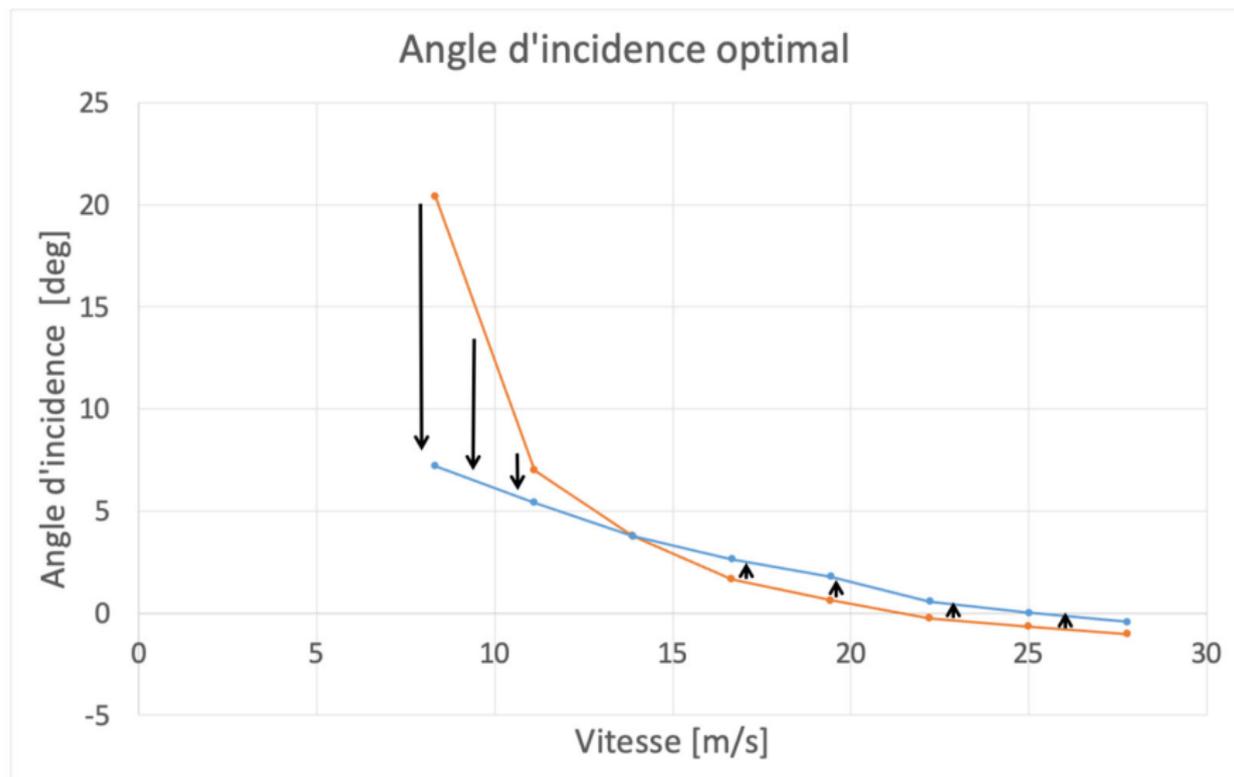
- **Besoin de portance modifié**
- Nouvelle portance = 39 600 N
- Changement de l'angle d'incidence nécessaire

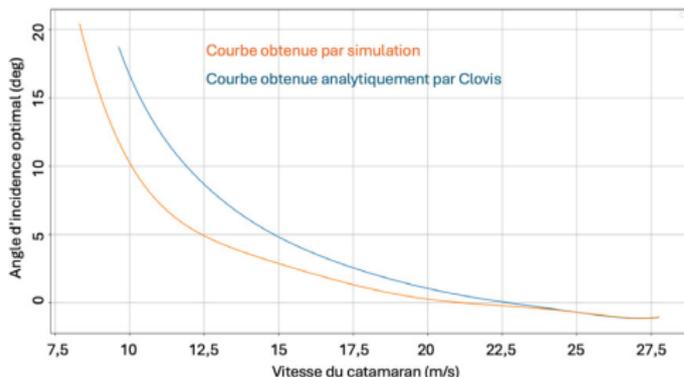


- **Calcul de la masse volumique moyennée**

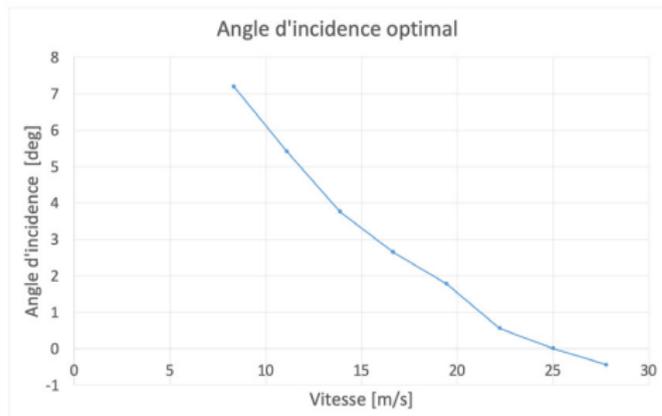
- $\rho_{\text{moy}} = 0.26 * \rho_{\text{vap}} + 0,74 * \rho_{\text{liq}}$







- **Vu de loin**
Même tendance
- **Phase de décollage**
Écart avec la méthode analytique
- **À grande vitesse**
Résultats convergents

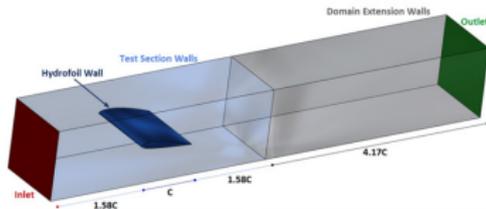
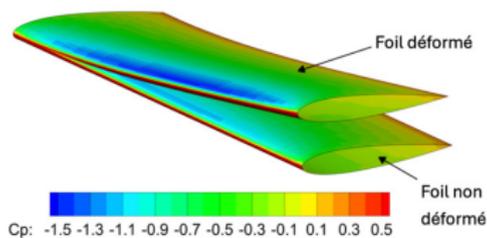


- **Phase de décollage**
Écart de 2 degrés
Géométrie imparfaite
- **Phase intermédiaire**
Très proche de la réalité
- **À grande vitesse**
Valeurs simulées
cohérentes

Résultats empiriques
nécessaires

Problématique

Comment ajuster l'angle d'incidence d'un foil afin de maximiser la vitesse et la stabilité d'un catamaran ?



- **Calculs d'interactions fluide/solide**

Ansys Mechanical

- **Travail sur le matériau**

Tissage des fibres de carbone

- **Expérimentation**

Tube de cavitation

-  A. Johan von Matern, *Americas Cup ETNZ AC50*, grabcad.com, 2018
-  B. Hugo Stubler, Data scientist chez SailGP
-  C. David Rey, Data analyst chez SailGP
-  D. Raphaël Censier, Ingénieur naval pour l'America's Cup et SailGP
-  E. Olivier Le Maître, *Flexible hydrofoil optimization for the 35th America's Cup with constrained EGO method*, CNRS, 2018.

- Voir le maillage
- Voir le rassemblement des données
- Voir la vue d'ensemble
- Voir la ventilation
- Voir le modèle $k - \epsilon$
- Voir les géométries
- Voir le ratio portance traînée
- Voir l'impact de alpha sur Cl
- Voir la transformation de Jukovski
- Voir le choix du foil relevé
- Voir le critère de convergence
- Voir le $Y+$
- Voir les vecteurs vitesses
- Voir la pression statique

Annexe 1 : Qualité du maillage pour Fluent cpge-paradise.com

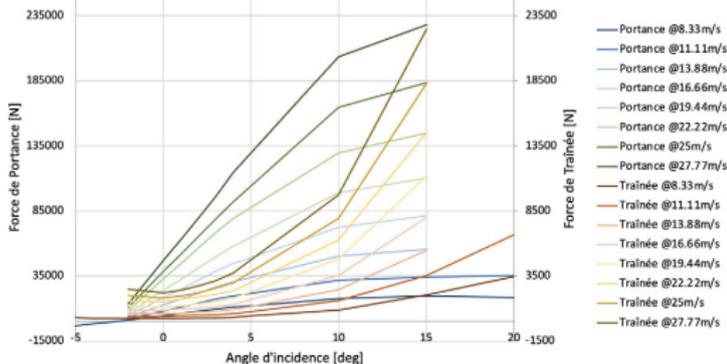
Boîte	Foil	Couche limite	Reste	nbCell	Portance	Trainée	Y+	Y+			
	mm	nb	mm	kelts	N	N	Moyenne sur la surface	max			
C	2	0	-		2954	226		257			
D	2	0	-		2928	225		257			
C	2	3	-	2817	3421	257	69	182			
D	2	5	-	3505	3427	252	49	192			
E	2	10	-	5215	3255	243	20	168			
	2	20	-	pb mesh							
	1	10	-	pb mesh							
	1	20	10	pb mesh							
G	2	0	20	3387	3034	225	156	255			
H	2	0	10	7910	3595	224	156	276			
I	2	0	8	8389	3608	224	156	264			
J	2	0	5	48685	3542	225	156	262			
G	2	5	20	4381	3377	253	48	194			
H	2	5	10	10232	3529	247	48	181			
I	2	5	8	10941	3524	248	49	198			
K	2	10	20	5796	3519	240	20	188			
L	2	10	10	10877	3523	240	20	192			
M	2	10	8	11354	3550	238	20	178			
valeurs asymptotiques (limites)				3540	240	comparatifs : meilleurs résultats avec une boîte de raffinement					
Maillage Optimum :				2	5	8	comparatifs : meilleurs résultats avec taille 8mm dans la boîte				

retour à la page générale

Annexe 2 : Rassemblement des résultats de Ansys

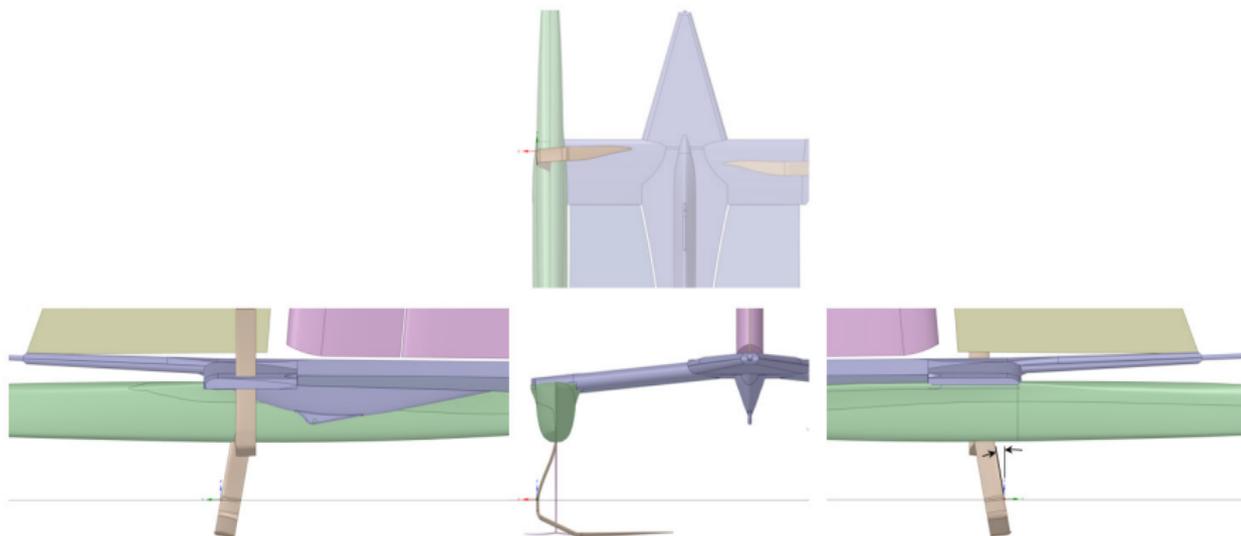
Vitesse			Angle foil	Portance	Trainée	Yr avg					
m/s	km/h	nœuds	deg	N	N						
8,33	30	16,2	-30	-12652	7119	113					
			-5	-3209	311	144					
			-4	-1755	256	154					
			-3	-225	235	156					
			-2	1214	223	157					
			-1	2902	225		Pb maillage ?!				
			0	4589	226	158					
			1	6249	241	159					
			2	7899	264	158					
			3	9625	292	158					
			4	11140	335	158					
			5	12256	429	154					
			10	17838	899	145					
			15	19542	2071	135					
			20	18422	3464	126					
			11,11	40	21,6	-2	2160	397		1,779	
0	8208	387				204	1,789	1,779			
1	11116	429						1,779			
2	14051	470						1,779			
3	17121	519						1,779			
4	19816	596						1,779			
5	21837	761				200	1,782	1,779			
10	31938	1589				188	1,790	1,779			
15	34162	3540				174	1,748	1,779			
20	35247	6692				164	1,913	1,779			
13,88	50	27,0				-2	3371	619		2,776	
						0	12692	589	249	2,766	2,776
						1	17141	635	250	2,743	2,776
						2	21718	704	250	2,749	2,776
						3	26493	785	249	2,753	2,776
						4	30593	918	248	2,746	2,776
			5	33849	1177	244	2,762	2,776			
			10	50130	2470	230	2,810	2,776			
			15	55503	5477	215	2,840	2,776			

résultats CFD: Portance, Trainée vs Angle d'incidence

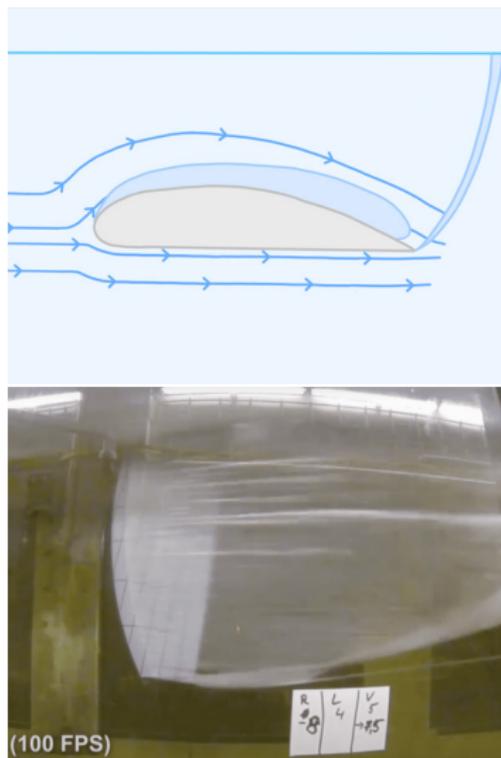


		décollage avec les 2 foils	phase de relevage du foil au vent	navigation avec le foil au vent relevé						
Vitesse	km/h	30	40	50	60	70	80	90	100	
Vitesse	m/s	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44	22,22	25	27,77	
% masse bateau par foil		50%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Angle foil		7,20	5,38	5,76	1,64	0,61	-0,28	-0,66	-1,05	
Trainée totale		1272	769	762	914	1077	1529	1872	2350	

retour à la page générale



[retour à la page générale](#)



- **Création d'un couloir d'air**

- **Changement de fluide**

Densité divisée par
 ≈ 1000

- **Prise en compte compliquée**

Changement de la
géométrie du foil

retour à la page générale

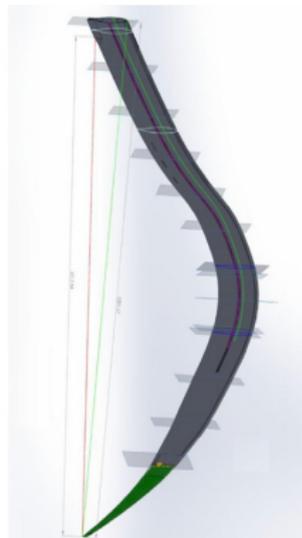
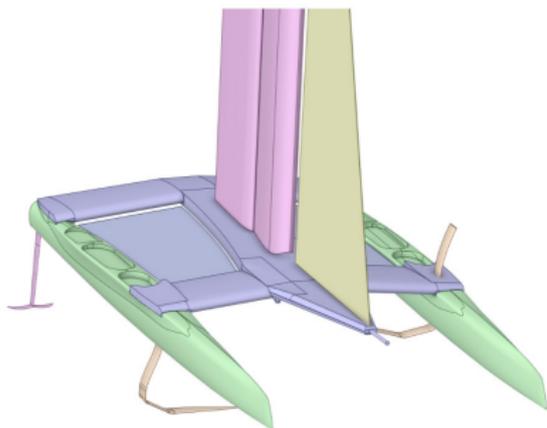
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\nu_t \frac{\nabla k}{\sigma_k} \right) + P_k - \epsilon$$

$$\underbrace{\frac{\partial \epsilon}{\partial t}}_{\text{Temporel}} + \underbrace{\mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon}_{\text{Convectif}} = \underbrace{\nabla \cdot \left(\nu_t \frac{\nabla \epsilon}{\sigma_\epsilon} \right)}_{\text{Diffusif}} + \underbrace{C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k}_{\text{Sources}} - \underbrace{C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}}_{\text{Pertes}}$$

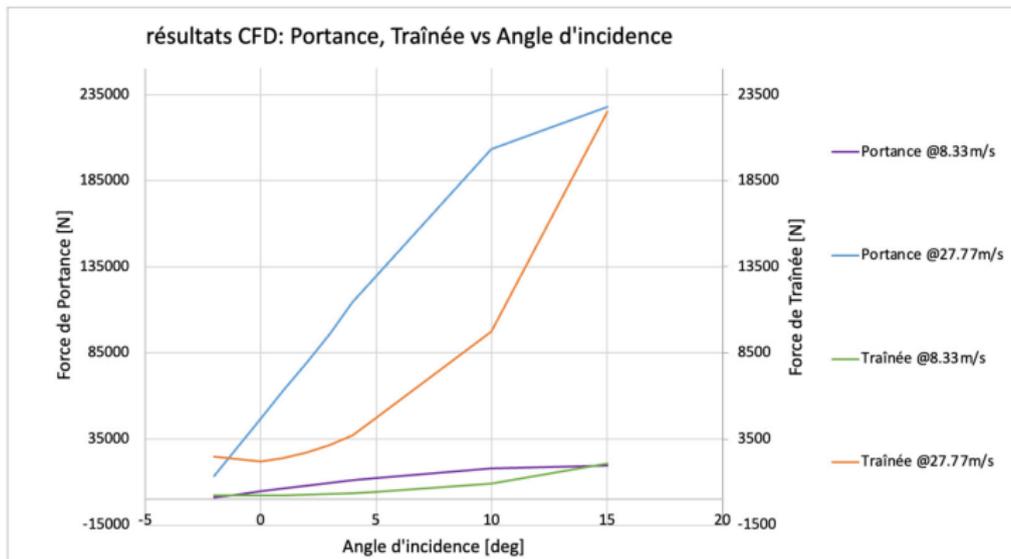
avec $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$.

- k : énergie cinétique turbulente
- ϵ : proportion de l'énergie cinétique dissipée turbulente
- ν_t : viscosité turbulente
- P_k : taux de production d'énergie cinétique turbulente
- \mathbf{u} : vecteur vitesse du fluide
- $C_{\epsilon 1}$ et $C_{\epsilon 2}$ sont des constantes du modèle.

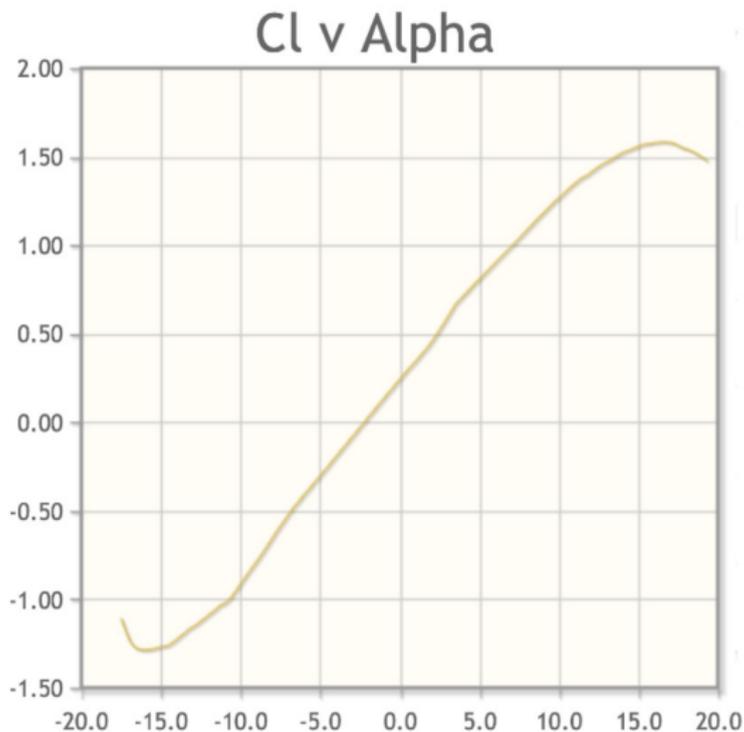
[retour à la page générale](#)



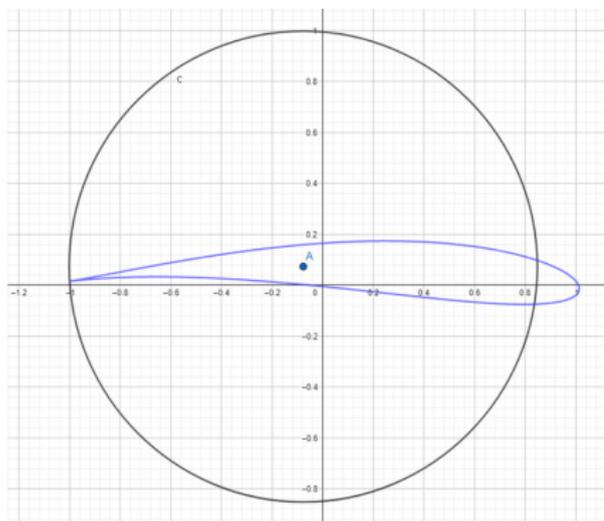
[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)

- **Définition des paramètres**

$$A (-0.0817 ; 0.0824)$$

$$R = 0,885$$

- **Application de la transformation**

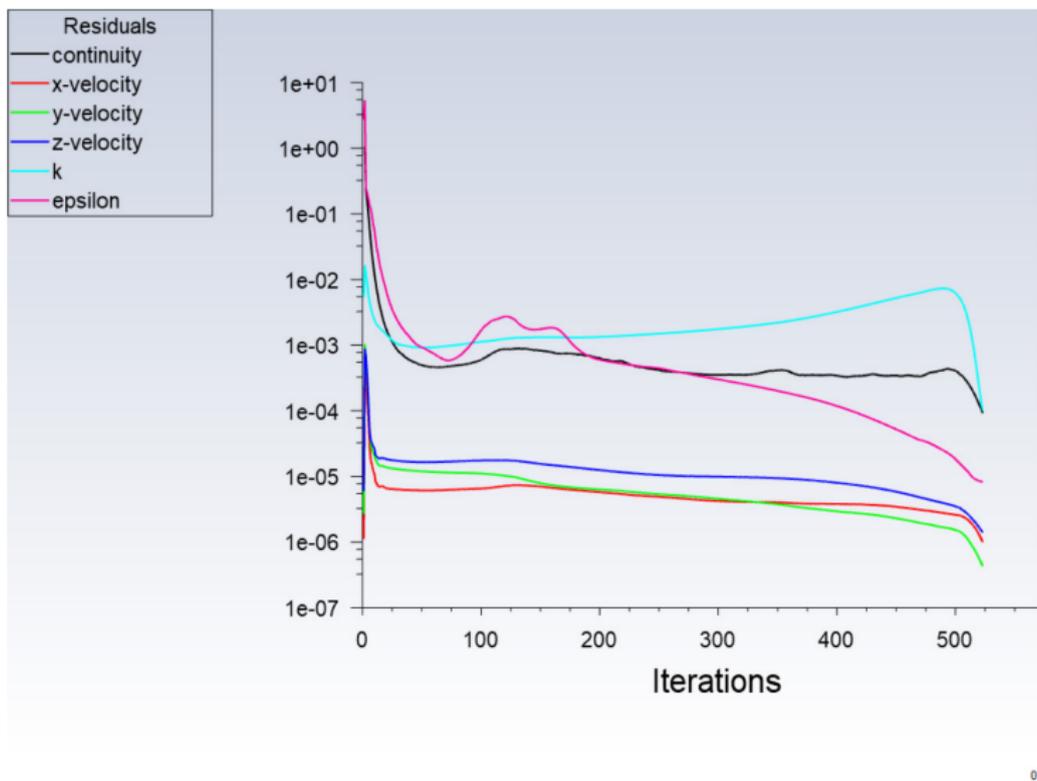
$$P = Z + \frac{1}{Z}$$

- **Obtention du profil du foil**

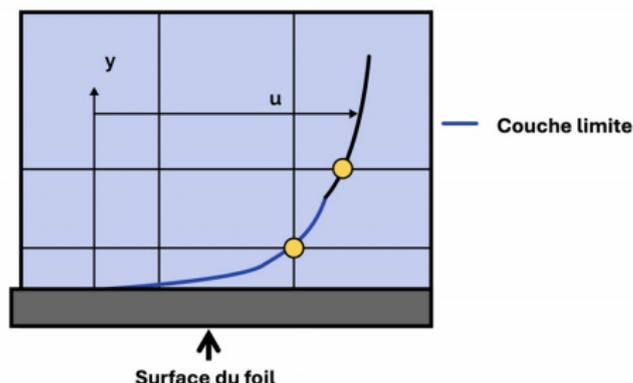
Mesure sur Python



[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)

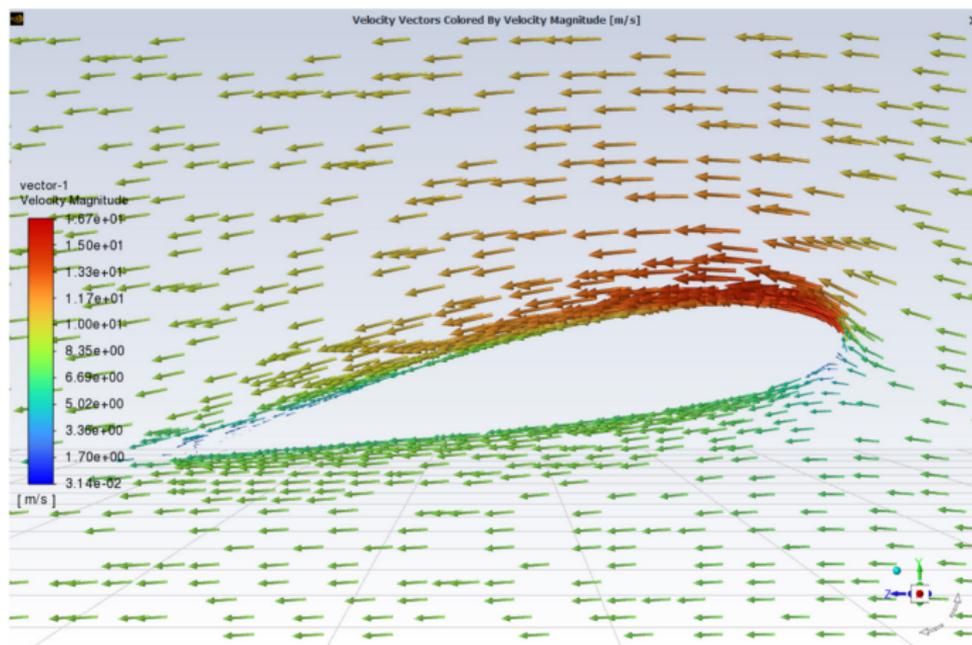


- **Similitude avec Reynolds**
- y la distance absolue au mur en m
- u la vitesse de frottement en m/s
- ν la viscosité cinématique en m^2/s
- Grandeur adimensionnelle
- Mesure la turbulence du fluide

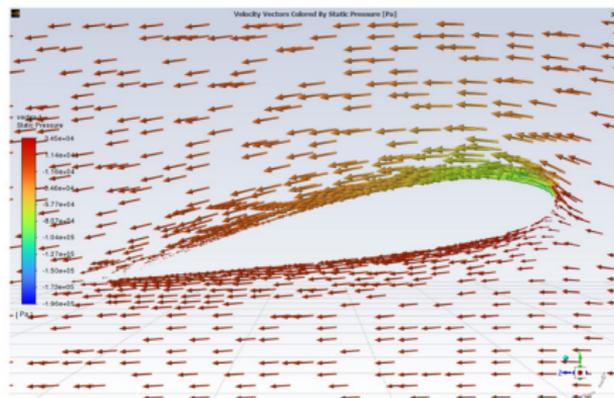
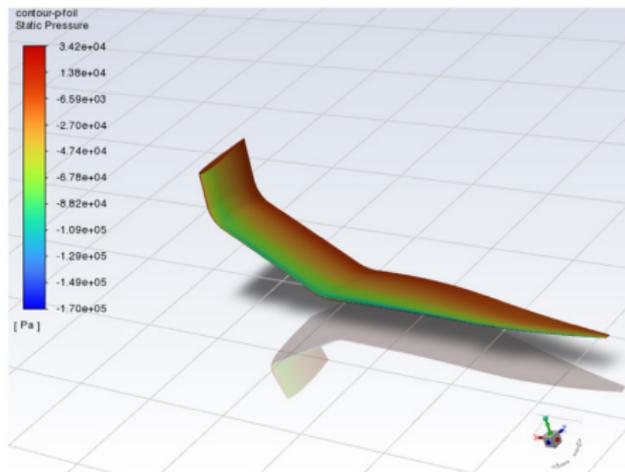
Y^+ et modèle de turbulence $k - \varepsilon$

$$Y^+ = \frac{yu}{\nu}$$

[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)



[retour à la page générale](#)