

Pourquoi les Foilers IMOCA n'étaient pas beaucoup plus rapides que les autres bateaux lors du Vendée Globe 2020-2021 et comment améliorer la situation.

Auteur **Robert Lainé**, article publié dans RORC Seahorse Magazine de décembre 2021

Traduction et mise en page de **Jean Sans**, 06/11/2021

Introduction

On a beaucoup débattu des foils sur les monocoques et de leur utilisation dans la navigation au large, mais on a rarement vu une comparaison équitable des performances réelles sur un parcours offrant un large éventail de conditions de navigation. Le Vendée Globe est l'une de ces occasions à ne pas manquer car les bateaux ont des dimensions de coque, de gréement et de quille très similaires, et leurs équipages sont compétitifs.

Analyse des 10 premiers IMOCA

La longueur du parcours du Vendée Globe (orthodromie) est de 24 365,7 nm. Le tableau ci-dessous (source : site internet du Vendée Globe) donne les données des 10 premiers bateaux.

Boat	Foils	Racing time (hours)	Distance Course Over Ground (COG nm)	Speed Over Ground (SOG Knots)	Apparent speed over orthodromy (Knots)
Maître Coq	yes	1 923,746	28 583,8	14,86	126,66
Apivia	yes	1 926,263	29 135,0	15,13	126,49
Bureau Vallée	yes	1 930,420	28 650,0	14,84	126,22
Yes We Cam	no	1 933,749	27 501,5	14,22	126,00
Seaexplorer Yacht Club Monaco	yes	1 934,996	28 448,5	14,70	125,92
Linkedout	yes	1 935,367	29 175,5	15,07	125,90
Groupe Apicil	no	1 941,972	27 512,3	14,17	125,47
Prysmian Group	yes	1 942,706	28 489,9	14,67	125,42
Omia – Water Family	no	1 963,756	27 832,5	14,17	124,08
V and B - Mayenne	no	1 982,504	27 346,9	13,79	122,90

Il est à noter que la vitesse apparente sur le parcours théorique de 24 365,7 miles (orthodromie) des 5 premiers bateaux est très proche, avec seulement 0,6 % de différence.

Examinons maintenant la vitesse sur le fond (SOG), qui est une mesure du véritable potentiel de vitesse des yachts.

- Tous les « Foilers » sont plus rapides que les « non-Foilers ».
- Les 3 premiers « Foilers » ont une vitesse SOG qui va de 14,84 Nœuds pour Bureau Vallée à 15,13 Nœuds pour Aivia (différence de 2 %).
- Les 3 premiers « non-Foilers » ont une vitesse allant de 14,17 Nœuds pour Omia Water Family à 14,22 Nœuds pour Yes We Can (0,3% de différence) ce qui est un très petit écart et ici le bateau le plus rapide est bien le premier de la classe.

La différence de vitesse moyenne entre les 3 premiers « Foilers » (14,94 Nœuds) et les 3 premiers « non-Foilers » (14,19 Nœuds) est de 0,75 Nœuds (5% de différence). Un écart de 5 % de SOG est apparemment un avantage significatif en faveur des « Foilers », mais cela vient au prix d'une route plus longue autour du globe, route faite dans des conditions de vent allant de zéro à plus de 40 nœuds et d'états de mer allant de mer belle à mer très agitée.

A la fin, sur la ligne d'arrivée, la véritable différence de vitesse autour du monde n'est que de 0,6 %, ce qui signifie que seulement 12 % du gain de 5 % de SOG est convertie en gain réel sur le parcours de la course, pourquoi cela ? La raison réside dans le comportement des foils par mer agitée et le manque d'adaptabilité de ces foils IMOCA aux conditions de vent et de mer très variables.

Foils dans un environnement dynamique

Pour comprendre pourquoi les foils IMOCA ne sont pas beaucoup plus performants dans les courses en haute mer, il faut revenir aux facteurs de portance et de traînée de ces foils.

Contrairement aux foils de la Coupe de l'America, la règle de l'IMOCA interdit toute modification du profil du foil au moyen de volets. Les foils sortent de la coque par une ouverture fixe (gate) et le seul degré de liberté laissé au skipper est la longueur du foil qui dépasse, le "rake" qui fait tourner le foil autour de son axe et le "cant" qui soulève ou abaisse la pointe du foil. Ces 3 degrés de liberté sont réglés manuellement par des mécanismes simples, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas être réglés en continu par le skipper qui ne peut que chercher un réglage moyen valable pour les prochaines heures.

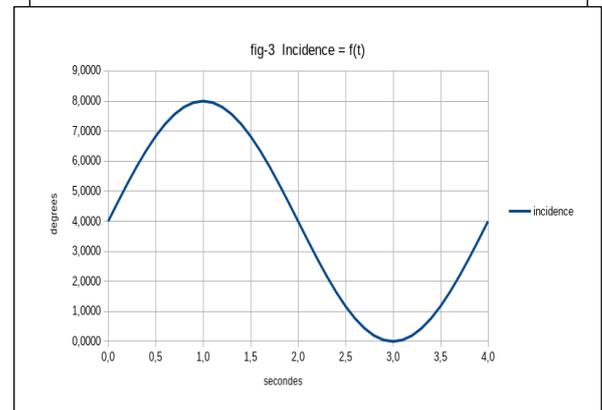
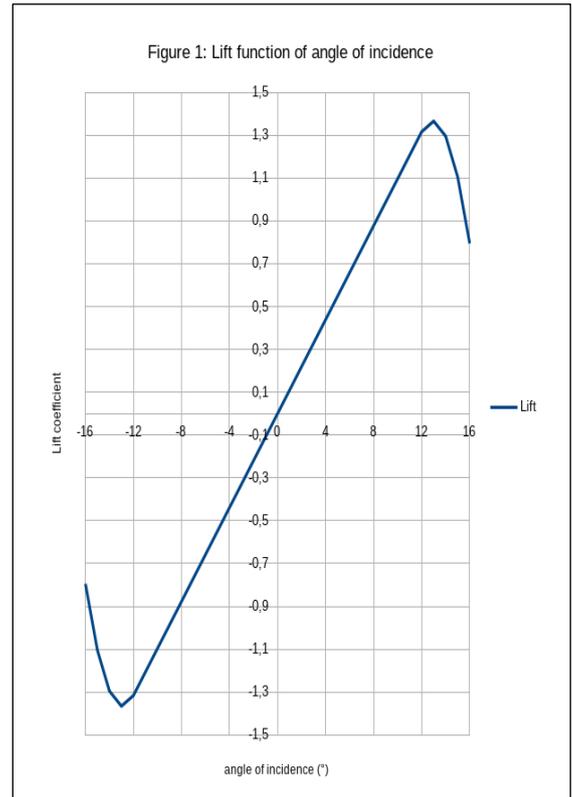
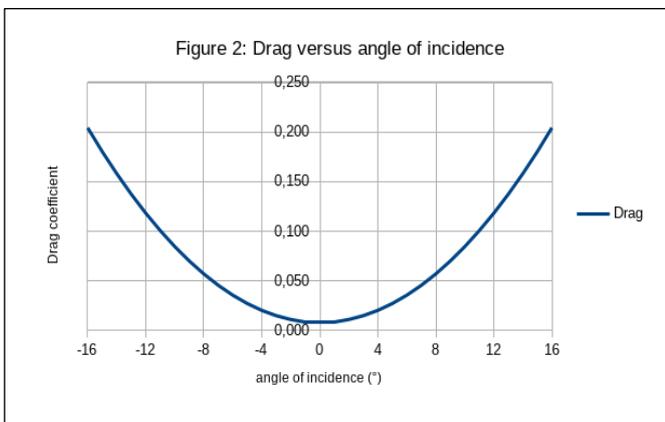
Pendant cette période, entre deux réglages consécutifs, le foil sous le vent verra une incidence variable de l'écoulement de l'eau en raison des vagues, du tangage, du roulis et du tangage du bateau, donc la portance générée variera et cela générera la traînée supplémentaire illustrée plus loin.

Dans ce contexte, il faut se rappeler que ces bateaux ont une poupe très large et plate, ce qui signifie que la variation du tangage sera essentiellement constituée de rotations autour du point du tableau arrière, induisant une vitesse verticale élevée au niveau du foil situé à environ 11 m devant. Cette vitesse verticale équivaut à elle seule à une variation dynamique significative de l'angle d'incidence du flux sur le foil. Rappelons que sur un bateau navigant à 10 m/s, 1 m/s de vitesse verticale du foil veut dire une variation d'incidence de 6°.

Pour illustrer le cas, examinons la réponse d'un foil à un angle d'incidence variable du flux. Les figures suivantes sont prises comme exemple :

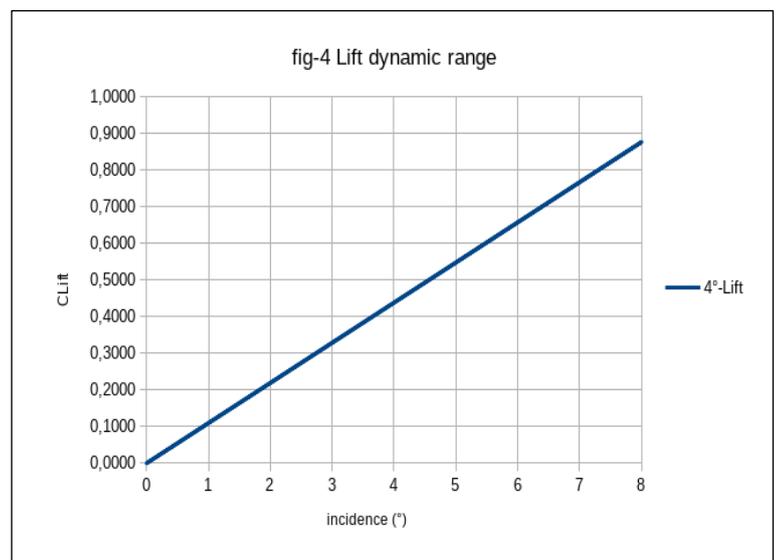
- Les **figures 1 et 2** montrent respectivement le coefficient de portance et de traînée d'un profil symétrique typique en fonction de l'angle d'incidence dans la plage de -16° à $+16^\circ$.

Notez que lorsque l'angle d'incidence est supérieur à 12° , l'écoulement commence à se détacher du profil et la portance n'augmente plus, et chute au-dessus de 13° - 14° . A une incidence de 4° , prise comme référence, le coefficient de portance est de 0.433 et le coefficient de traînée de 0.0129.

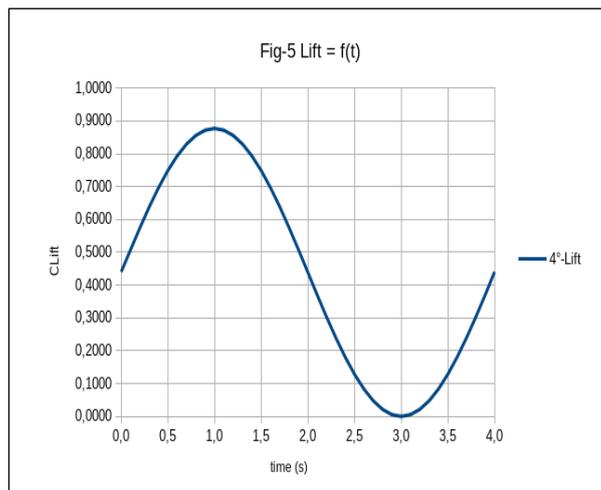


- La **figure 3** montre la variation de l'angle d'incidence de l'écoulement sur le foil en fonction du temps. Le réglage initial du foil est de 4° d'incidence, l'amplitude de la variation est de $\pm 4^\circ$ et la période de la fonction sinusoïdale est de 4 secondes.

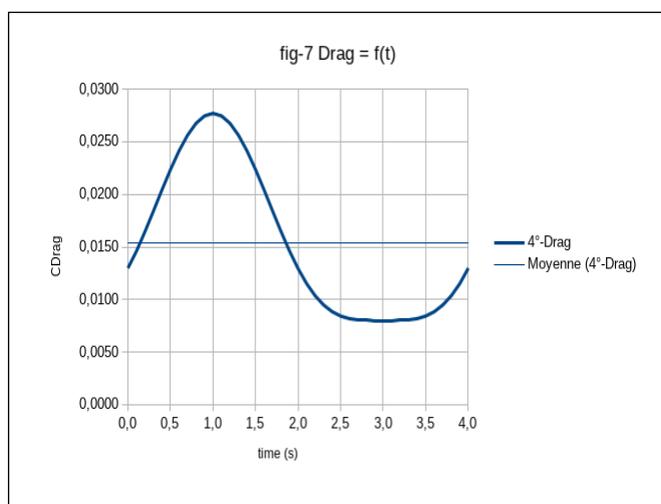
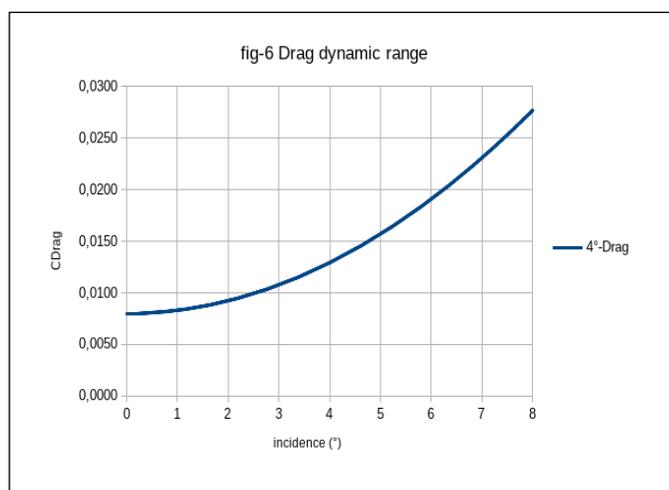
- La **figure 4** montre le coefficient de portance dans la plage d'incidence ci-dessus. Le coefficient de portance à une incidence de 4° est de 0,433 et il oscille entre 0 et 0,877.



- La **figure 5** montre la fonction de portance en fonction du temps, nous reconnaissons la fonction sinusoïdale de l'incidence en fonction du temps. La portance moyenne sur la période est la même que pour le foil travaillant statiquement à une incidence de 4° .



Examinons maintenant la **figure 6** qui montre le coefficient de traînée dans la même plage d'angle d'incidence et la **figure 7** qui montre le coefficient de traînée en fonction du temps. Nous constatons que la fonction de traînée en fonction du temps n'est plus une fonction sinusoïdale parfaite du temps et qu'elle présente un pic important à l'incidence maximale.



Nous constatons également que la traînée moyenne sur un cycle est de 0,0153, soit 18% de plus que la traînée de 0,0129 à 4° qui est l'angle d'incidence moyen sur la période !

Il est clair que sur la période, la traînée supplémentaire résultant de la variabilité temporelle de l'angle d'incidence sur le foil est une traînée pénalisante par rapport à celle d'un bateau sans foil. Ceci a 2 conséquences :

- La traînée supplémentaire du foil va demander plus de poussée aux voiles et pour l'obtenir il faut changer de cap,
- La traînée supplémentaire du foil, appliquée à plusieurs mètres sur le côté du bateau induira une impulsion de lacet variable dans le temps qui devra être corrigée cycliquement par le pilote automatique, induisant ainsi une traînée supplémentaire du gouvernail.

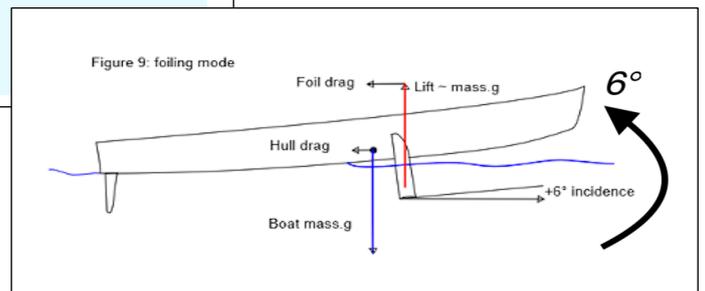
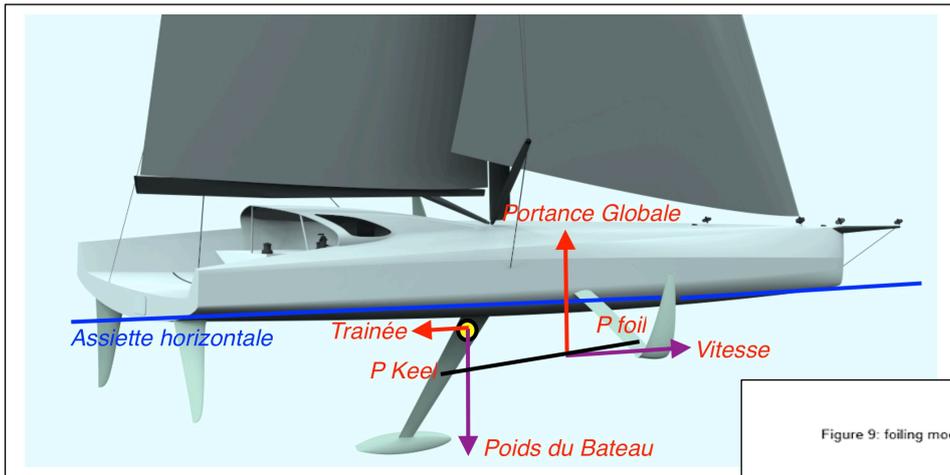
C'est la principale raison pour laquelle les Foilers en "mer agitée" ne fournissent pas les performances attendues au près comme au portant. Ils doivent générer plus de puissance à partir des voiles, ce qui signifie en général qu'ils doivent naviguer sur une plus longue distance.

Quelle(s) solutions(s)

Comme décrit ci-dessus, un problème important provient de la traînée supplémentaire induite par un foil soumis à une incidence d'écoulement variable.

Lorsque le bateau est essentiellement en mode archimédien (mode déplacement), sa vitesse est essentiellement limitée par le planning de la coque à quelque 16-18 nœuds et le tangage et le roulis dans une navigation sont limités à quelques degrés sur les IMOCA modernes avec un nez relativement gros.

La variation de l'angle d'incidence du flux est donc faible. Au-dessus de 20 Nœuds de vitesse, un IMOCA à foils génère suffisamment de portance pour commencer à monter sur son foil ; cependant, comme la règle IMOCA n'autorise pas les foils sur les gouvernails, son tableau arrière restera dans l'eau (**figures 8 et 9 ci-dessous**).



L'effet net est que l'angle d'incidence du flux sur le foil augmente, ce qui entraîne une nouvelle augmentation de la portance générée qui, à son tour, augmente l'angle d'incidence etc, jusqu'à ce que la surface immergée du foil soit suffisamment réduite pour maintenir l'équilibre nécessaire entre la force de portance du foil et la gravité agissant sur la masse du bateau.

Entre-temps, la traînée induite a également augmenté, ce qui a nécessité de changer de cap pour obtenir plus de poussée de la voile. Cependant, cette situation est instable dans une navigation sur mer agitée, car le bateau qui entre dans une vague verra la surface du foil immergé augmenter soudainement, ce qui générera une force supplémentaire faisant cabrer le bateau qui se retrouvera alors essentiellement dans l'air après la crête de la vague.

La gravité agissant toujours avec le foil à l'air, grâce à Newton, la vitesse de descente verticale du bateau atteindra facilement 7 m/s au niveau du foil. Pour un bateau se déplaçant à 30 Nœuds (15 m/s) lorsque le foil rentrera dans l'eau l'angle d'incidence sera de l'ordre de 25° ce qui signifie que l'écoulement sera totalement détaché (décrochage) et la traînée résultante énorme.

Le bateau va inévitablement ralentir, le flux va finalement se rattacher au foil qui sera alors complètement immergé, créant à nouveau une portance excessive qui fera remonter le bateau et ainsi de suite...

Pour améliorer la situation, nous devons trouver une solution pour limiter la rétroaction positive du bateau qui se soulève sur son foil qui entraîne à nouveau l'augmentation préjudiciable de l'angle d'incidence de l'écoulement du foil, avec pour conséquence une portance et une traînée excessives. En termes d'ingénierie, la meilleure solution serait un contrôle actif par le pilote automatique de la forme du foil (en changeant sa cambrure, par exemple avec un volet piloté) ou en faisant tourner le foil pour ajuster son angle d'incidence.

Cependant, la règle IMOCA limite l'utilisation du pilote automatique à une action sur le gouvernail uniquement. Néanmoins, la jauge autorise la rotation du foil autour de l'axe transversal afin de permettre au skipper de modifier le réglage du foil. L'autre degré de liberté disponible est la quantité de surface du foil qui s'étend à partir du bateau, mais son réglage est une tâche sérieuse.

Si nous voulons réduire le couplage entre le soulèvement du bateau sur son foil et l'augmentation de l'incidence du flux sur le foil qui en résulte, nous devons sortir des sentiers battus (la règle).

L'essence de la solution pour améliorer le comportement des Foilers en navigation sur mer ouverte (IMOCA ou yacht avec des foils de type DSS) est de trouver un moyen de maintenir la force de levage du foil aussi constante que possible.

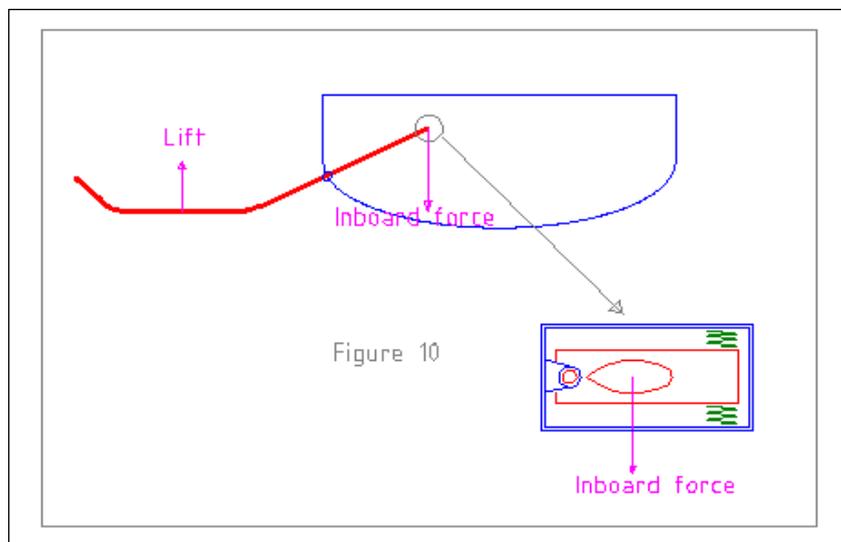
Pour y parvenir sans système actif, une solution consiste à concevoir la structure du foil de telle sorte que lorsque la charge de levage augmente, le foil se tord et réduit l'angle d'incidence sur le flux, ce qui réduit la portance. Cette solution présente l'inconvénient que la réponse du foil sera en quelque sorte "figée en usine" et ne pourra pas être ajustée par la suite. Sachant qu'une paire de foils coûte quelques centaines de milliers d'euros, il sera très coûteux d'expérimenter différentes flexibilités des foils pour trouver l'optimum pour un ensemble d'états de mer.

Compromis pas simple à trouver car dans une mer courte plus de souplesse permettra d'effacer les pics de traînée, alors que sur une houle longue plus de raideur aidera à suivre la surface de l'eau.

Une solution alternative consiste à utiliser les forces à l'extrémité intérieure des foils pour induire le tangage du foil par rapport à la coque.

Cela réduira son angle d'incidence à mesure que les forces de portance et de traînée augmentent.

Cela peut se faire en introduisant un élément flexible combiné à un pivot soigneusement positionné au niveau de la fixation de l'extrémité intérieure du foil. La **figure 10** montre comment la fixation flexible à l'extrémité intérieure du foil peut être disposée.



L'extrémité intérieure du foil est fixée de manière rigide dans un bloc de tête pivotant sur son côté arrière et maintenu par un ressort à l'extrémité avant, le pivot et les ressorts sont maintenus dans une boîte reliée de manière rigide à la structure interne de la coque.

Les ressorts sont calibrés pour supporter la force verticale intérieure nominale.

Lorsque cette force augmente, le bloc de tête tourne et incline le foil vers le bas, réduisant ainsi l'angle d'incidence du flux sur le foil. Le réglage différentiel de la tension des ressorts permet de modifier l'angle d'incidence moyen de la feuille.

Le réglage de la rigidité et de la précharge des ressorts permettra au skipper d'adapter le comportement dynamique du système de foil à différentes vitesses du bateau et à différents états de la mer.

Enfin, une solution passive telle que décrite ci-dessus peut également être utilisée sur les yachts IRC équipés de foils latéraux tels que le DSS, car cette solution est fondamentalement conçue pour limiter la traînée supplémentaire induite par le tangage cyclique du bateau dans une navigation sur une mer agitée.

RL