



EXerts-
Yachts

Jean SANS
Expert honoraire près la cour d'Appel de Rennes
7 rue du Lidy Bourelly - BSM de Kéroman, 56100 LORIENT - France
+33 (0)6 07 10 24 03 - Jean.Sans@wanadoo.fr - www.experts-yachts.fr
Expertises Maritimes (Privées ou Judiciaires) - Consultant technique
Arbitrage - Relevés de carènes (Photogrammétrie)
Mesures et calculs de stabilité - Jauge IRC

OCTOBRE 2019 : Les Acteurs entrent en scène.

Acte 1 La présentation

Cela a d'abord commencé par l'AC75 NZ lors d'une cérémonie de lancement avec Champagne, Musique et Discours, puis l'AC 75 USA avec plus de discrétion, en utilisant le site Internet, où sont présentées quelques photos et des images de synthèse (très bien réalisées) d'AMERICAN MAGIC. Mais les Américains ne souhaitant pas rester sur le bord de la route, ils présentent rapidement un lancement très Bostonien, à NEWPORT.

Après une très (très) courte vidéo anonyme d'AMERICAN MAGIC qui a aussi circulé sur Internet (voir Sailing Anarchy), le team US met en ligne une « vraie » vidéo. Quelques jours plus tard, les NZ suivent. Petite régate à la communication.

Début Octobre les Italiens se lancent à CAGLIARI. Cérémonie grandiose dans la tradition du Yachting Italien, accompagnée d'une très belle vidéo, mais pas d'image en navigation.

Quelques jours plus tard à Portsmouth, INEOS TEAM UK présente son bateau et le baptise « BRITANNIA » en hommage au CLASS J ayant appartenu au Roi GEORGE V. Une cérémonie plus discrète mais qui permet de découvrir le bateau. Une vidéo très technique, résume le travail préparatoire de 18 mois où l'on découvre que l'équipage s'est même entraîné au test « réel » de l'immersion de la cabine d'un hélicoptère en piscine. Quelques dessins, notamment des foils sont rapidement présenté dans cette vidéo.

Voilà pour le décor....

Un Défendeur et 3 Challengers (à ce jour).

AC75 NZ (Défendeur)



Chaque Team a le droit de construire deux bateaux, certains Teams ont testé des démonstrateurs d'une dizaine de mètres, mais le passage à 75', soit environ 20 mètres de coque et 7,5 tonnes de déplacement, ne se résume pas à multiplier par deux les dimensions du démonstrateur.

AC75 USA (Challenger)



L'impression est que l'AC75 des Américains vole plus haut que celui des Néo-Zélandais. Il faut toutefois se méfier des prises de vues photos ou des extraits instantanés de vidéos, car ces bateaux contrairement aux monocoques archimédiens ont une très faible stabilité horizontale lorsqu'ils sont en vol.

Vingt centimètres de perte ou de gain d'altitude ne sont pas un handicap, si la période d'oscillation longitudinale est grande.

AC75 ITA (Challenger)



Les Italiens innovent (?) en dessinant un aileron (Bustle) devant le safran. C'est assez étonnant car cette forme de carène ne peut avoir d'intérêt que durant la période archimédienne qui à priori ne sera pas ce qui assurera la victoire.

Les Italiens utilisent aussi des bulbes assez volumineux à la liaison entre les Foils et les Bras. Ils ne sont pas les seuls, on reviendra sur ce type de dessin.

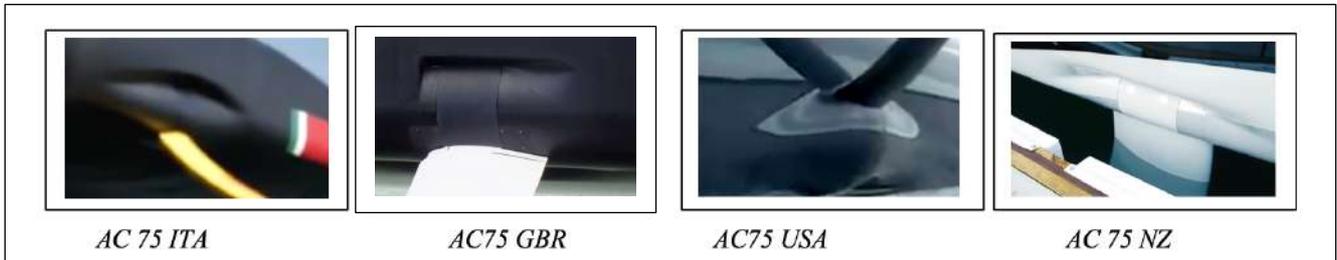
AC75 GBR (Challenger)



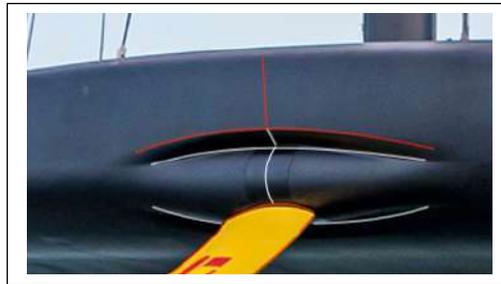
Pour les formes avant de la coque, c'est plus que de l'innovation, c'est presque de la provocation. INEOS (BRITANNIA) opte aussi pour les bulbes aux extrémités des Bras, mais ils sont implantés sous la jonction des foils sur le bras.

Voilà pour les premières impressions au moins visuelles.

Il faut ajouter que les 4 bateaux présentent une déformation « anormale » et très limitée des œuvres mortes autour de la zone où est implanté l'axe de rotation (Docking, Position basse, Position haute) des bras des Foils.



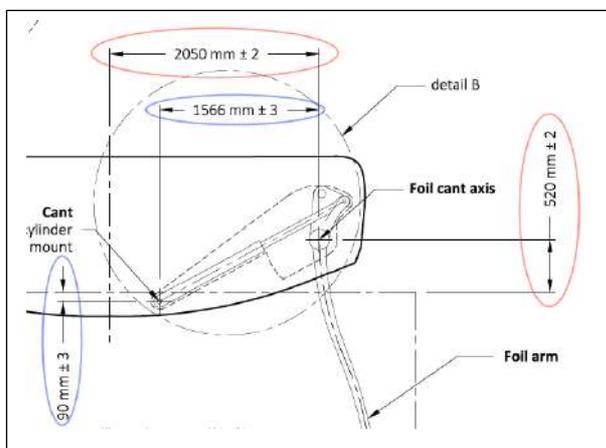
La raison de cette déformation locale du bordé est directement liée aux critères dimensionnels imposés par les Règles de Classe et par la cinématique de la rotation du bras qui impose une rotation du bras de quelques 143° entre le Docking et la Position haute.



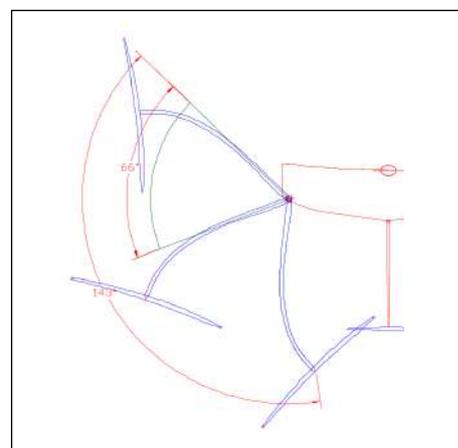
La position de l'axe de rotation du bras étant imposée par la Règle de Classe, elle gêne les architectes car ils doivent adapter localement le bordé à la structure qui soutient cet axe. Dans ces conditions, il est nécessaire de déformer le bordé afin que les bielles de commande des bras puissent évoluer durant la rotation du bras. Seul l'AC75 GBR montre les axes de rotation franchement en retrait du bordé, ce qui signifie qu'il utilise une coque assez large.

Il faut préciser que les Règles de Classe n'imposent pas de largeur pour la coque, mais une succession de prescriptions dimensionnelles qui contrôle indirectement la largeur.

Toutefois ces « bosses profilées » n'ont pas de conséquence négative sur l'aptitude à voler. Suivant les formes de carènes choisies par les Teams la « bosse » évolue un peu.



La Règle de Classe



La cinématique des Foils

Finalement, on reste dans l'esprit « AMERICA CUP » où une Règle de Classe très stricte impose une architecture, tout en laissant quelques libertés, pour au final produire des bateaux dont les potentiels de vitesses sont très proches.

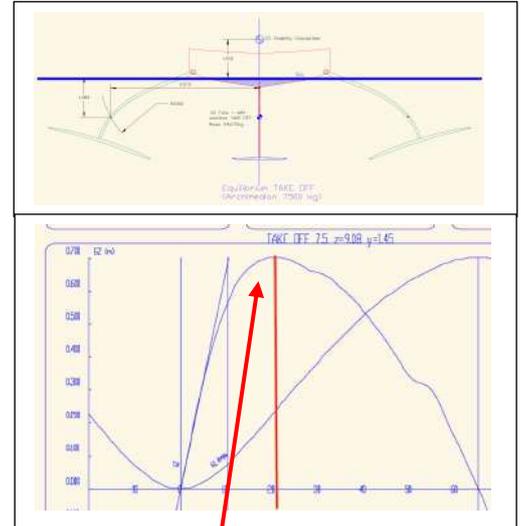
Ce fut, avec succès, l'esprit des Class J, 12mJI, CLASS AMERICA, AC72, AC 45.

Les formes des coques

Peut-être pour la première fois dans l'histoire de la COUPE, on constate que les observateurs s'intéressent plus aux **formes des œuvres mortes** qu'à celles des œuvres vives à l'exception des formes avant.

Avant d'envisager de voler, il faut évidemment décoller, cela conduit obligatoirement les Teams à respecter les règles Archimédiennes. Comme le bateau n'est pas très lesté (grossièrement c'est un « biquille » Archimédien) il faut nécessairement dessiner une coque assez large, dans les limites des Règles de Classe. Cela permet d'obtenir une stabilité de forme suffisante et une trainée minimale pour acquérir le plus vite possible la vitesse de décollage imposée par la somme des surfaces actives des 2 Foils.

Les bras sont déployés depuis la position Docking (l'AC 75 ne peut pas naviguer sous voile en position Docking), le Centre de Gravité final de l'AC75 passe alors de 0.90 m à 1.45m / au-dessus de la DWL.

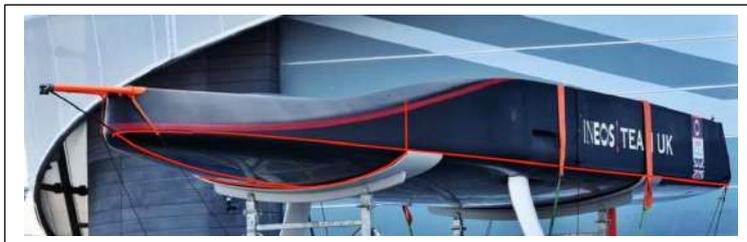


La stabilité transversale devient délicate d'autant plus que dans cette phase de « TAKE OFF » la surface de voile est obligatoirement maximale.

Le GZ (bras de levier) maximal 0.704m à 22° soit un Righting Moment maximum de 7.5 * 0.704 = 5.28 T.m.

Le bateau chavire à 62° de gîte (ces calculs sont des évaluations basées sur un modèle personnel).

Les formes avant présentent deux options architecturales opposées, la forme en « V profond » ou « U très arrondi » ou la forme dite « SCOW » très plate et largeur maximale autorisée.



AC 75 GBR



AC75 USA



AC 75 NZ



AC 75 ITA

Ce qui est intéressant, c'est de connaître quel est le but recherché par les Architectes lors de leur choix de ces options.

Dans un environnement Archimédien, où le bateau navigue en permanence du près au portant, les options architecturales carènes planantes ou à déplacements se comprennent et respectent des théories.

Pour les AC 75, c'est plus complexe, en effet le temps de navigation **en mode réellement Archimédien** sera à priori très court et sûrement en dehors du « mode course ». En fait dès que les voiles seront bordées, les Foils (et les bras totalement immergés) apporteront de la portance et de la trainée. Rapidement la trainée des Bras et des Foils sera inférieure à la portance fournie par les Foils. Alors la coque s'élèvera progressivement, son volume immergé diminuera, la carène déjaugera et la vitesse augmentera jusqu'au décollage complet.

On peut en conclure que les choix Architecturaux des formes avant auront très peu d'importance sur l'obtention de la vitesse nécessaire au décollage.

Quelle qu'en soit les formes avant, les AC 75 décolleront.

La réalité lors des régates sera tout autre, elle se situera dans les « **TOUCH and GO** », **évidemment non volontaires du plan d'eau**.

Ces « **TOUCH and GO** » se produiront quelque fois lors des phases de transition (bouées, virement de bord, etc.) ou autres événements (erreur de l'équipage, perte subite de portance : ventilation, cavitation).

Cette période de transition entre le mode Vol et le mode « presque » Archimédien doit être obligatoirement très courte si l'équipage souhaite rester dans le match.

Deux, même trois écoles se dessinent, mais aucune n'a vraiment de recul en mode régate au sujet des « TOUCH and GO ».

Avec la forme en « SCOW », on espère **pratiquement rebondir sur la surface de l'eau** (le plan d'eau des régates est très protégé, la vitesse est élevée), comme le skieur sur une bosse, et malgré le coup de frein inéluctable lié au contact, on espère retrouver le mode VOL très rapidement.

Avec la forme plus creuse (« V » où « U »), les Italiens étant les plus extrêmes, les Néozélandais ayant choisi un dessin intermédiaire, on espère limiter le coup de frein (la carène s'enfonce doucement) et **ressortir en utilisant la poussée hydrostatique générée par l'immersion de la partie avant de la carène**. Toutefois je suis un peu dubitatif, mais Italiens et Néozélandais ont sûrement des arguments.

Impossible d'arbitrer aujourd'hui laquelle de ces écoles aura raison, il faut attendre les premières régates.



Une vidéo de l'AC 75 USA, montre que sur un empannage, lors du changement de Foil actif (passage de 1Bâbord à 2 Foils puis 1Tribord) le bateau perd rapidement de l'altitude et devient Archimédien pendant 15 secondes. A 30 nœuds, c'est 15m/s, si la vitesse tombe à 8/10 nœuds durant 15 secondes, on perd 150 mètres...

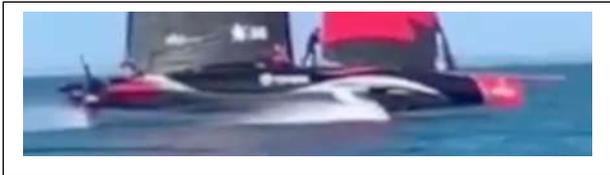
L'aérodynamisme

Les formes des œuvres mortes et du pont étonnent, **pourtant cela me paraît logique pour un mobile qui doit voler**, même si ce n'est qu'à 75 à 80 km/h au maximum.

Nous ne sommes plus dans le domaine Archimédien, même si le bateau plane.



Le premier constat en regardant les vidéos, par mer plate, met en évidence que les AC75 sont très rapides malgré une masse de 7500 kg. Le vol est stable, les trajectoires horizontales sont très coulées. L'AC75 NZ paraît voler plus bas que l'AC75 US, c'est toutefois difficile d'être affirmatif, car on ne peut pas voir si les NZ volent sur un ou deux foils comme les Américains.



Un point commun : les bateaux utilisent actuellement des gréements de type conventionnel. Le mât profilé, les voiles à double profil ce sera pour plus tard.

L'AC75 US et l'AC75 GBR montrent que le paramètre pénétration dans l'air a été très étudié.

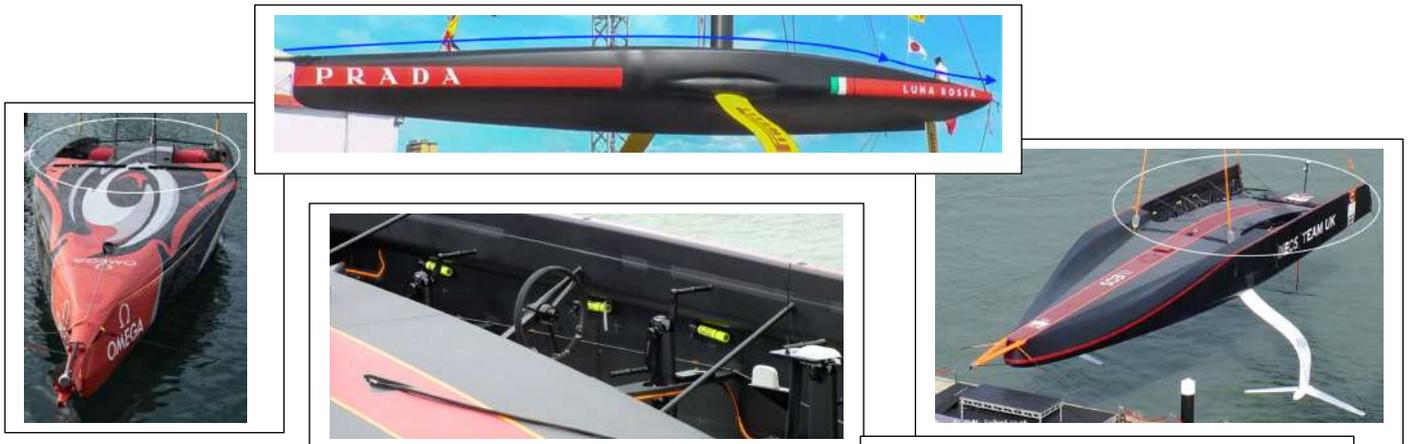
Le nez est plongeant, comme en F1 ou en LMP1, la surface frontale est fluide. Au niveau de l'encastrement du bout dehors, il n'y a pas d'aspérité. Les sorties des filets d'air à l'arrière des bateaux sont aussi canalisées latéralement afin de réduire la traînée.



La surface des voilures autorisée par les règles de Classe se traduit par des bateaux surpuissants en mode Foiler, car ce mode demande beaucoup moins de puissance qu'en mode Archimédien.

Conséquences : L'aérodynamisme des coques lorsqu'elles sont en vol devient un paramètre non négligeable, d'autant que la vitesse finale de l'AC 75 est asymptotique au foil non cavitant. Donc autant s'approcher le plus vite et le plus près de cette vitesse.

Cela est visible sur les ponts avant qui sont très dépouillés et sur la zone de travail de l'équipage. Tous les Teams ont séparé en deux parties cette zone de travail afin de canaliser le flux d'air. Pour cela les équipages sont « encastrés », seuls pratiquement les casques dépassent du livet.



Sur l'AC75 GBR, les équipiers, le barreur sont installés dans de véritables cockpits d'avion... Les petites bouteilles jaunes sont des réserves d'oxygène en cas de Capsize.

On peut en déduire que **les études pour réduire la trainée de la coque dans l'air** ont été très approfondies.

La trainée augmentant avec le carré de la vitesse, il est important de la réduire au maximum... c'est toujours quelques dixièmes de nœuds de grappillé.



Mais revenons à l'expression de la trainée en vol, physiquement c'est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide. Son expression est donnée par la formule :

$$\text{Trainée} = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, C_x le coefficient de trainée qui dépend des formes plus ou moins aérodynamiques du mobile, de la *rugosité* de la surface et du nombre de *Reynolds*, S la surface frontale maximale (maître couple pour une voiture) et V la vitesse du mobile. La masse volumique ρ de l'air est de l'ordre de 1,20 kg/m³.

Les AC75 ont une surface de maître couple de l'ordre de 7.7m².

Par contre le vent n'est jamais de face comme sur une voiture. Si on considère que le vent apparent est orienté de 45° à 50°, la surface exposée au vent vitesse est de 14m*1,80m = 25 m².

A 35 nœuds la Trainée en vol de la coque est de 1652 N (avec un C_x de 0.40, la trainée des voiles, du mat) n'est pas prise en compte, elle baisse de 13% avec un C_x de 0,36.

L'expérience des Foilers et les limites physiques des profils des Foils (non cavitant) nous ont montré que la vitesse maximale possible accessible sera de l'ordre de 40 nœuds (20 m/s).

Le C_x de ces quatre Foilers sera à quelques décimales près identique, de l'ordre de 0,40 (le C_x est un nombre sans unité). La trainée des voiles et du mat sera quasiment identique pour tous les bateaux.

Dans ces conditions, le gain possible en C_x restera toujours très faible. Diminuer cette trainée demandera une énergie intellectuelle assez importante, mais ce sera quelques dizaines de secondes gagnées.

Lorsque l'on voit la « carrosserie » de l'AC75 GBR mais aussi du bateau Américain, il ne fait aucun doute qu'il y a eu des essais sur des maquettes (soufflerie ?).

Les deux plans verticaux qui forment le bordé ($10\text{m} * 1.5 = 15\text{m}^2$ chacun) canalisent les filets d'air, améliorent la stabilité de route, réduisent les turbulences arrière et contribuent à diminution du C_x .

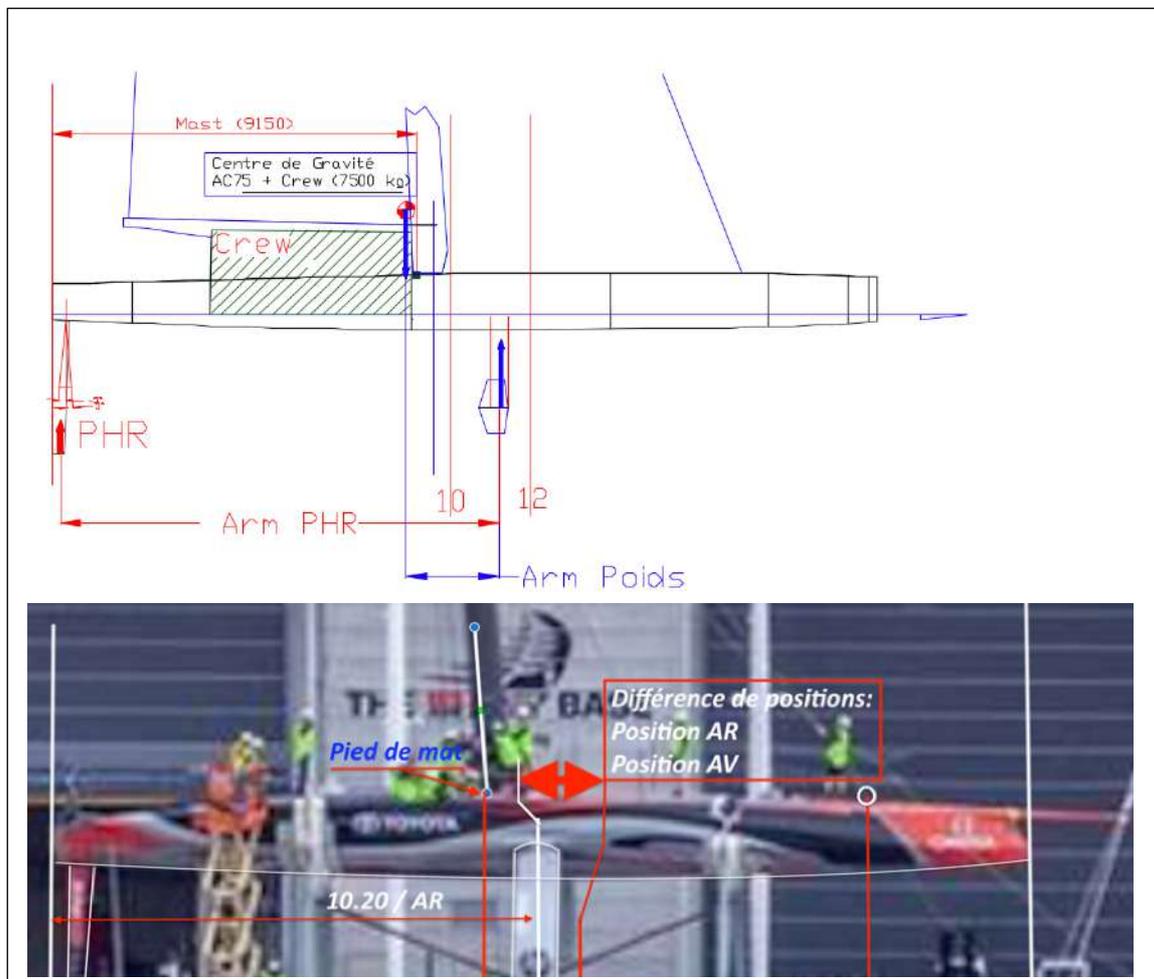
Les paramètres dimensionnels de l'AC75 NZ et de l'AC75 US

D'abord un rappel des éléments mobiles qui entrent dans de la conception de ces AC75 (en fait les Règles de Classe).



Les positions longitudinales du mat (9.150 m /AR), comme celle de l'étai (8.2 m /base du mat) sont imposées par les règles de classe.

Seule la position longitudinale de l'ancrage des Foils bénéficie d'un degré, mais est toutefois limitée entre 10 et 12 mètres de l'arrière. Cela laisse le choix entre plus de stabilité de route ou plus de d'évolutivité.



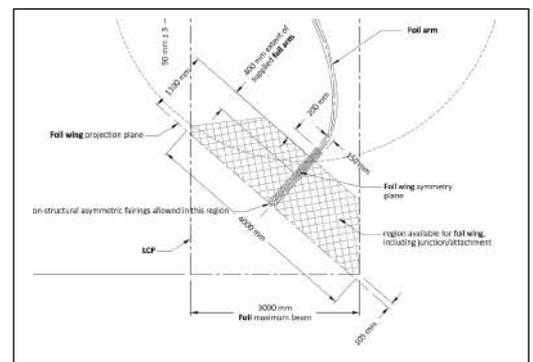
Les bras, les foils

Les deux bras sont fabriqués sur une base monolithique carbone. Ils sont fournis par le Défendeur. La seule liberté laissée aux Teams, se situe dans le carénage et sa forme. Comme je l'ai précisé précédemment, la position du centre de rotation des bras dans le plan transversal est imposée par les Règles de Classe.

La position spatiale des foils doit se situer dans la zone hachurée ci-contre.

L'envergure totale des deux Foils est limitée à 4 m. Les valeurs des cordes des profils ne sont pas imposées, toutefois comme tous les Teams utiliseront des allongements (Aspect Ratio) identiques pour leurs dessins de foils, les surfaces effectives seront très proches.

En tout état de cause, pour voler en régate, il faut que la composante verticale du Lift soit égale au déplacement du bateau, soit pour une masse de 7500 kg, un Lift (sur un seul foil) de 73500 Newtons et cela avec une vitesse de vent « minimale ».



Le système de bras basculant interdit qu'il y ait un possible réglage mécanique de l'incidence du Foil (Rake) en jouant sur la position par rapport à l'horizontale de l'axe de rotation du bras. Toutefois, à priori, à la lecture des Règles de Classe (mais la rédaction est « tordue »), rien n'interdit de caler à la construction l'axe de rotation avec 2° ou 3° de Rake.

En conséquence, pour modifier la portance des Foils, il faut jouer avec un volet installé sur le bord de fuite. Sa corde est limitée à 25% de la corde du Foil au droit de la mesure.

La difficulté est de concevoir un système de commande pour assurer la rotation (Maximum 25° à 45°). D'abord par ce que le bras est courbe, ensuite parce qu'il décrit en navigation un angle de 64° environ et enfin parce que le système mécanique de commande doit « quitter le bras » pour « passer » dans le Foil et en plus des deux cotés du bras. L'équation est compliquée.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%

Une ingénierie électrique (moteur pas à pas par exemple) est possible. Cette méthode demande peu d'énergie, des circuits électriques simples, mais il faut loger le moteur entre les deux foils.



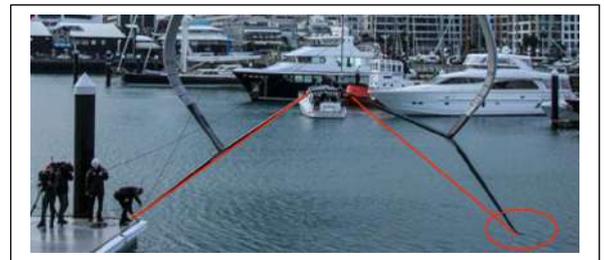
Le Bulbe en extrémité du bras permet, en plus de l'installation d'une commande (électrique) des volets, d'interrompre ou de limiter la propagation de l'effet de ventilation sur le Bas immergé (Voir V6 AC75 NZ 25/05/2019(JS/RL).

L'AC 75 NZ, ne possède pas de bulbe, en revanche sur le bateau

N°1, deux types de Foils avec des dièdres différents sont testés.

A l'exception de cet essai sur l'AC75 NZ tous les Foils possèdent un dièdre relativement important.

Je ne souscris pas au fait que ces bulbes (remplis de plomb ?) soient présents afin d'augmenter la stabilité en mode Archimédien. Certes ils représentent 300 kg, s'ils sont remplis de plomb, sur un déplacement total de 7500 kg en navigation, mais l'effet sur le CG final restera assez faible. De plus l'AC 75 NZ décolle sans difficulté sans ces bulbes, donc sans la traînée inhérente à ces bulbes et elle n'est pas négligeable.



Deux bateaux sont équipés de « Fences » (cloisons extérieures perpendiculaires au profil afin de créer une barrière au phénomène de ventilation et donc à une perte de portance subite.

C'est le cas de l'AC75GBR (3 par Foils sur l'intrados) et un sur chaque Foils de l'AC 75 ITA.

Le PHR (Plan Horizontal Régulateur)

C'est l'élément physique qui permet de voler horizontalement. C'est un profil symétrique qui suivant son incidence **positive ou négative** permet de faire **Piquer** le Foiler ou de le **Cabrer**.

Le PHR est assemblé en extrémité du safran. La Règle de Classe interdit à priori de commander sa portance et son sens (vers le haut ou vers le bas) avec un volet de bord de fuite (comme pour les foils).

L'inversion de portance sera ainsi obtenue en basculant le safran vers l'avant ou l'arrière de -8° à +8° autour d'un palier sphérique situé en fond de coque autour de la mèche de safran (commande par vérin hydraulique).

L'AC75 GBR, tout comme l'AC75 USA a translaté le PHR vers l'arrière de l'extrémité du safran afin d'éviter que si le phénomène de ventilation (verticale), s'il se déclare, ne se propage pas sur l'extrados du PHR.

Une telle situation provoquerait une action à Piquer ou à Cabrer incontrôlable.



Conclusion

Les très nombreuses contraintes imposées par les Règles de Classe s'appliquent principalement au mode Archimédien.

Le mode Foiler n'est pas contrôlé directement par la surface et la forme générale des Foils.

Les règles de Classe laissent les Architectes et Ingénieurs développer la recherche des performances dans le mode Foiler.

Cela se voit sur la recherche dans l'optimisation de l'aérodynamisme, dans les différentes formes de foil (et non apparemment des profils), des carénages des bras et des jonctions avec les foils.

Reste une grande inconnue : La conception des interfaces entre la partie « contrôle des systèmes » qu'ils soient électroniques ou hydrauliques, les contraintes imposées par les Règles de Classe (et elles sont nombreuses) et le Pilotage.

Cette partie est totalement invisible pour les observateurs.

La première confrontation

Lors de l'**America's Cup World Series** qui devait se disputer à Cagliari sur quatre jours en Avril 2020, a été annulée à cause du COVID.

Pour autant chacun dans leur territoire, les quatre Teams, ont continué leurs essais, ce qui a abouti à la version 2 des bateaux :

- **America's Cup Defender:**
 - Emirates Team New Zealand,
- **Challenger of Record :**
 - Luna Rossa Prada Pirelli Team (ITA),
 - INEOS Team UK (GBR),
 - NYYC American Magic (USA)

ACTE 2 : Présentation de la VERSION 2 des Foilers

Avec les mesures de confinement et les restrictions de circulation dans le monde, l'ensemble du projet America' Cup est complètement stoppé.

Les teams réalisent leurs essais sur place et prépare le nouveau AC75 (version 2) pour une CUP en 2021.

Les évolutions visibles portent principalement sur la carène et sur les œuvres mortes.

Comme le montre les nombreuses vidéos disponibles réalisées avec le modèle AC75-V1 de chaque team, l'assiette de vol (Trim) est négative, cela avait été déjà constaté sur les deux générations précédentes de catamarans, et l'altitude de vol faible.

Que l'altitude de vol soit faible (< 1 mètre pour le fond de coque), ce n'est pas une réelle découverte, mais le Trim sur le nez pose problème en cas de perte momentanée de portance sur le foil. Le risque étant d'engager la carène dans un mode archimédien très pénalisant (vitesse).

Deux solutions apparaissent, la première étant d'avoir une sorte de double carène obtenue avec un retour de galbord. C'était déjà embryonnaire sur le modèle V1 de PRADA, c'est beaucoup plus marqué sur les versions V2 d'AMERICAN MAGIC (USA), de TE REHUTAI (NZ) et PRADA (ITA).

La seconde solution est plus radicale, puisqu'elle consiste à dessiner le bas des œuvres vives avec une spatule absolument plate (comme un Ski) afin de rebondir sur l'eau... visible sur INEOS (GBR).

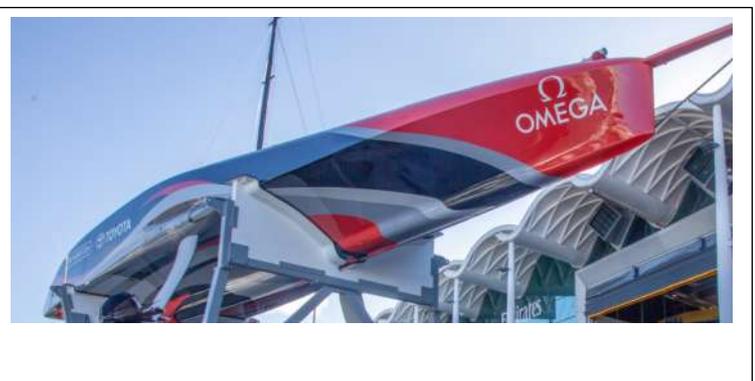
PRADA (ITA)



AMERICA MAGIC PATRIOT (USA)



TE REHUTAI (NZ)



INEOS (GBR)



INEOS présente l'architecture la plus extrême... Wait and See !!!

Reste que ces bateaux (?) sont capables de figures libres impressionnantes mais plutôt incontrôlées.



J. SANS (15/10/2019 & 19/11/2020)