



J. SANS (03/03/2019)

Version V4
36th AMERICA CUP 2021
Le nouvel AC 75 NZ.



Vidéo de lancement https://www.youtube.com/watch?v=rx2qG_YMrDs

ANALYSE de la STABILITE

En navigation, un Foiler est en équilibre sous 4 systèmes de forces.

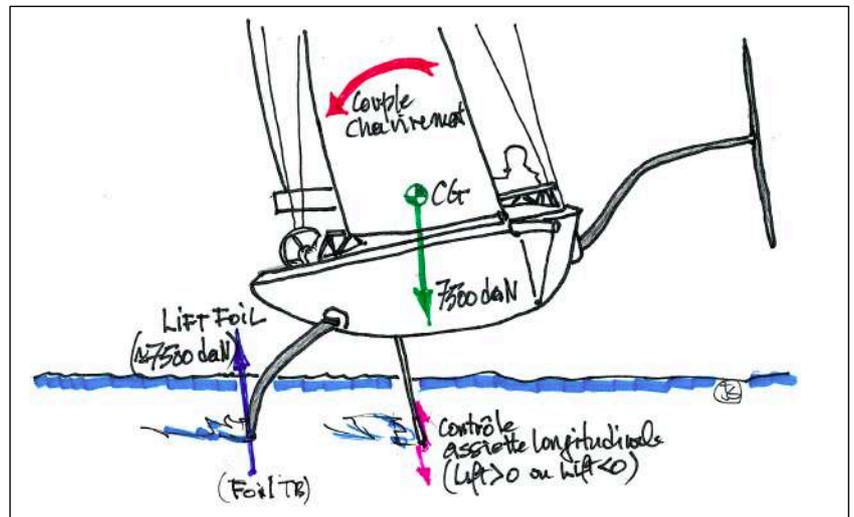
Chaque force est un vecteur 3D, qui évolue durant la navigation en intensité et en direction. Seul le vecteur représentant la masse du bateau et de son équipage est toujours vertical et constant en intensité.

Le bateau se déplace dans un environnement orthonormé, c'est-à-dire :

Oz : Direction longitudinale (le cap du bateau)

Oy : direction verticale

Ox : Direction latérale (Dérive latérale).



Chacune des 3 forces possède dont trois composantes sur (Ox, Oy, Oz) :

Force Vélique : Elle est produite par la portance des voiles, elle évolue en fonction du vent, de l'orientation de la voile, du type de voile et de la gîte.

- Composante sur Ox : la dérive, le bateau glisse généralement sous le vent.
- Composante sur Oy : elle se traduit par une poussée vers le bas (le bateau s'enfonce légèrement)
- Composante sur Oz : c'est la force qui assure la propulsion vers l'avant

Force produite par le Foil : Elle est produite par la portance du foil.

Elle dépend du :

- ✓ Réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur (Nommé « CANT »)
- ✓ Réglage de l'angulation d'avant en arrière (Nommé « RAKE »)
- ✓ Réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur (Nommé « CANT »)
- ✓ Réglage d'orientation (axe vertical), (Nommé « YAW »).

Cette force est orientée vers le haut, sa composante verticale (parallèle et opposé au vecteur POIDS du bateau) se nomme habituellement le LIFT.
 En fait cette composante soulève le FOILER et lui permet de quitter le mode Archimédien pour évoluer dans le mode Foiler.

L'intensité de cette force est le facteur prépondérant d'un Foiler.
Que le foil décroche et tout l'édifice s'effondre.

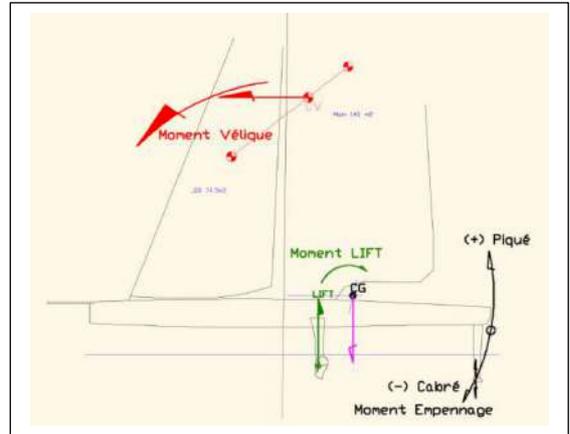
Force verticale produite par le plan horizontal arrière.

Ce plan horizontal est un profil symétrique car sa portance doit pouvoir être alternée, c'est-à-dire dirigée vers le haut ou vers le bas.

C'est cette portance qui permet de réguler l'assiette horizontale du Foiler.

Il ne faut pas oublier qu'un foiler comme l'AC75 est à « centrage AR », c'est-à-dire que son centre de gravité est situé en arrière de la poussée des foils avant.

Dans ces conditions l'empennage arrière, suivant son angle d'incidence produit un couple (+) ou un couple (-), soit « cabré » ou « piqué ».

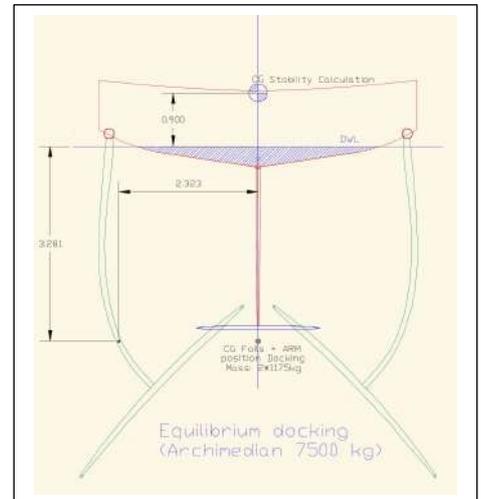


La masse du bateau génère une force verticale appliqué à son centre de gravité CG.
 Le CG est pratiquement invariant en navigation **dans une configuration définie.**

L'étude de la stabilité, va porter sur 3 configurations :

- « **DOCKING** », le bateau sort de son « stand » et est remorqué jusqu'à la sortie du port. Les deux foils sont repliés sous la coque.

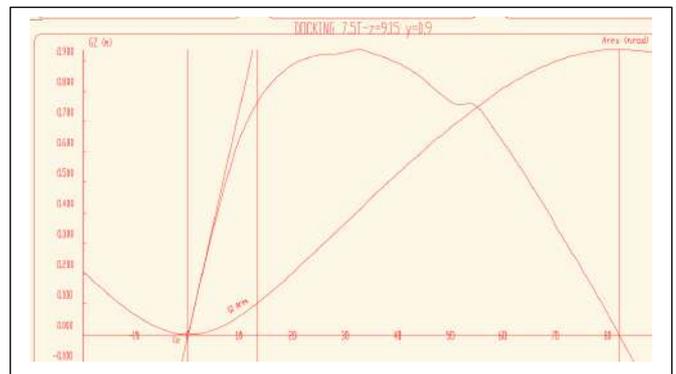
Description	masse (Kg)	Ass (x)	Ref (y)	AR (z)	m ² x	m ² y	m ² z
Foil Port	1150	2.323	-3.281	8.77	2871.45	-3773.15	10088
Foil Starboard	1150	-2.323	-3.281	8.77	-2871.45	-3773.15	10088
HULL Renfort / équipement technique Foils / Bowsprit / équipement technique Foils / Mast / Main Sail / Rudder	3720	0	2.9	10	0	10788	37200
Foc	55	0	8.53	13.41	0	489.13	738
Equipage	1150	0	1.8	6	0	1840	8900
Code 0	100	0	8	15	0	900	1500
Accastillages / électronique / Media	175	0	1.8	9	0	315	1875
Total Déplacement mesurés	7500				0	8765.85	88084
CG (x lateral, y vertical DWL Foil, Z Longi)		0.00	0.90	9.08			
Jean SANS www.experts-yachts.fr		Ref = DWL Foiler					



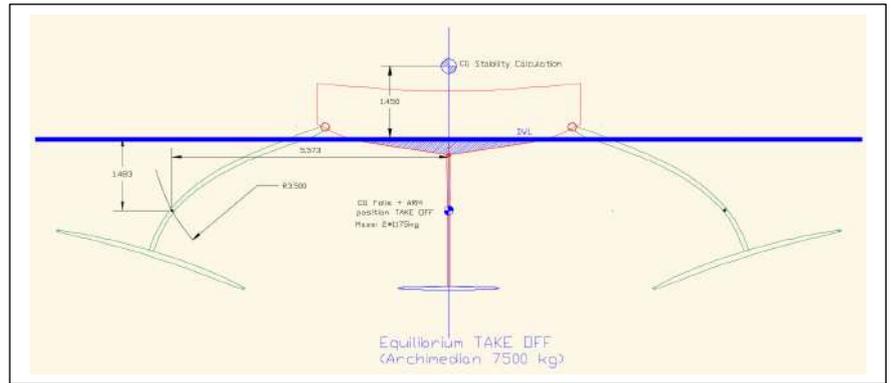
Dans cette configuration, la plateforme est relativement stable, avec GZ (bras de levier) max 0.936 m soit un Righting Moment maximum de $7.5 * 0.936 = 7 \text{ T.m}$

Le bateau chavire à 82° de gîte.

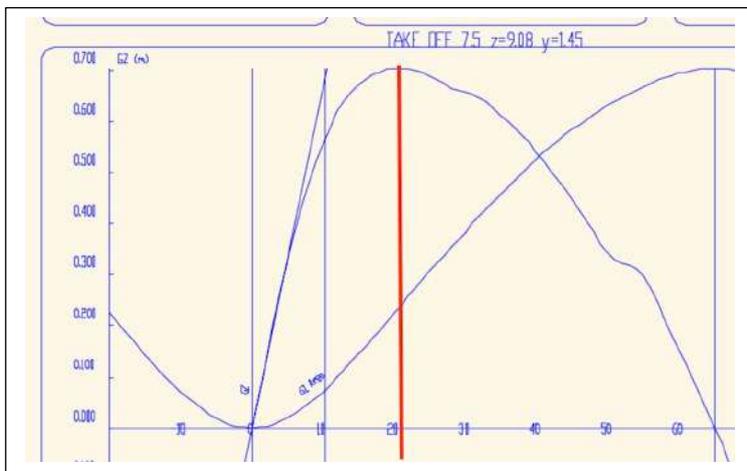
Sans vouloir caricaturer, disons que dans cette configuration, l'AC75 est « biquille ».



- « **TAKE OFF** »
Afin de préparer le décollage, l'équipage quitte le mode DOCKING et installe mécaniquement les foils en mode archimédien afin de « rouler sur la piste » et passer ainsi en mode « FOILER ».



Les bras s'étant déployés depuis la position Docking, le CG final de l'AC75 est passé de 0.90 m à 1.45m / DWL



Description	masse (Kg)	/Axe (x)	/Ref (y)	/AR (z)	m*x	m*y	m*z	
Foil Port	1150	3.973	-1.483	8.77	6408.95	-1705.45	10088	
Foil Starboard	1150	-3.953	-1.483	8.77	-6429.45	-1705.45	10088	
HULL Renfort / équipement technique Foils / Bowsprit / équipement technique Foils / Mast / Main Sail / Rudder	3720	0	2.9	10	0	10788	37200	
Foc	55	0	8.83	13.41	0	469.15	738	
Equipage	1150	0	1.6	8	0	1840	6900	
Code 0	100	0	9	15	0	900	1500	
Accastillage / électronique / Media	175	0	1.8	8	0	315	1575	
Total Déplacement mesurés	7500					-11.5	10801.3	88064
CG (x lateral, y vertical DWL, Z Longi)		0.00	1.45	9.08				
masses		/Axe (x)	/DWL (y)	/PPAR (z)				
Jean SANS www.experts-yachtis.fr		Ref = DWL Foiler						

La stabilité transversale doit être sérieusement contrôlée en navigation.
Le GZ (bras de levier) max 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.

Le « **TAKE OFF** » est la phase la plus sensible. En effet le creux de carène étant relativement faible (environ 0.370 m), dès que le bateau va prendre de la vitesse et se créer du « LIFT » sur ces deux foils, la carène va rapidement complètement sortir de l'eau et quitter le domaine Archimédien.

Les calculs basés sur la flottabilité, le centre de carène, n'ont plus aucun sens. Le foiler devient un avion avec ses deux ailes et son empennage arrière.

Sa stabilité de vol dépend alors de la dextérité du pilote et de l'équipage qui règle les foils et le « moteur », les voiles.

Cela va se traduire par le cabrage de la plateforme afin d'augmenter l'angle d'incidence des foils, puis par un retour à une assiette horizontale ou l'angle d'incidence diminue, puisque la vitesse s'est stabilisée.



Les deux photos ci-dessus, qui montrent la progression du foiler sont prises avec un seul foil actif, mais le « TAKE OFF » sur deux foils procède de la même évolution du vol.

A regarder, tout paraît simple..... et facile.

Il est peut-être possible de décoller sur un seul foil, le foil au vent étant en position haute, donc hors de l'eau en régime Archimédien. Mais l'opération demandera un sérieux savoir-faire à cause de l'effet dissymétrie des plans porteurs.

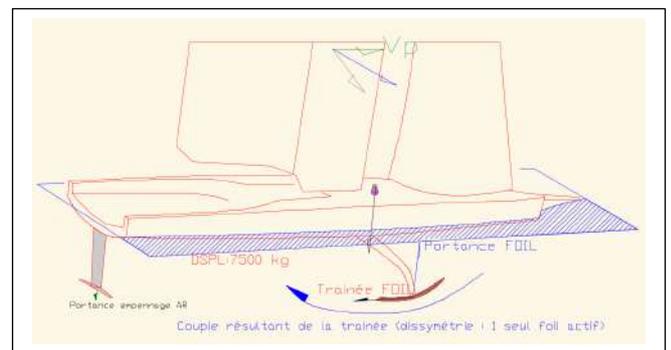
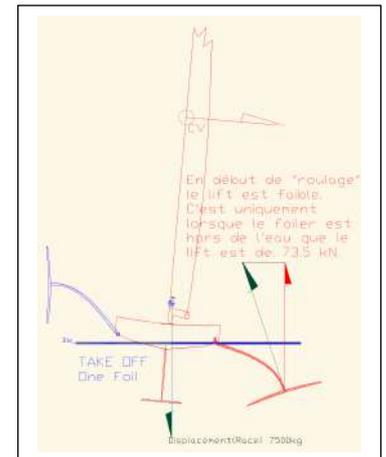
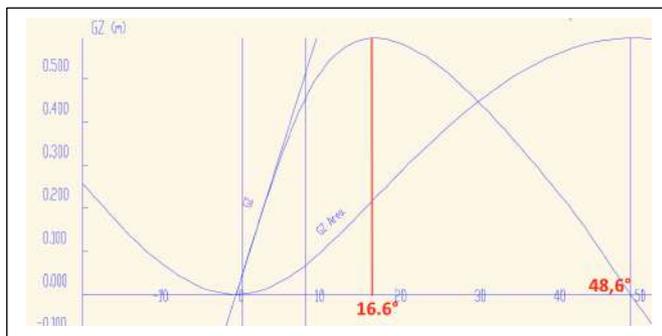
En effet cette dissymétrie génère un déséquilibre du « LIFT » sous le vent, à environ 6m du centre de carène lorsque le bateau est encore en archimédien.

Ensuite, avec deux plans porteurs, les 7500 kg du bateau sont répartis sur chacun des 2 foils, ce qui permet de décoller à une vitesse plus basse, donc sur une longueur de « piste » moins importante.

Foil :

Envergure : 3,9 m – Corde moyenne : 0,55 - Surface évaluée : 2,14 m²

Hypothèse du centrage des poids (100% sur les foils, un ou deux)



Le GZ (bras de levier) max 0.535 m à 16.6° soit un Righting Moment maximum de $7.5 * 0.535 = 4.0$ T.m
Le bateau chavire à 48.6° de gîte.

Il est évident qu'à « l'allumage » des moteurs, la stabilité est équivalente à celle d'un catamaran comme le TORNADO.

Mais dès que le foil immergé produira de la portance et le Righting Moment augmentera. Cela permettra d'assurer un compromis acceptable.

Toutefois seuls les essais permettront de réellement vérifier les calculs et les modèles.

Par contre les conditions de décollage sont différentes entre la configuration **2 foils actifs** ou **1 seul foil actif**.

- ✓ **Phase de décollage, lorsque le bateau s'appuie sur les deux foils : 39000 N sur chaque foil.**

Les foils ne sont pas horizontaux en navigation, mais possède une géométrie en « V ». L'angle est d'environ 18°, ce qui nécessite une portance réelle du foil supérieure à celle du poids du bateau. Dans la configuration géométrique de ce foiler, pour soulever le déplacement de 7500 kg, il faut une portance totale de 78000 N.

$$\text{Portance (en N)} = 0,5 * 1025 * C_x * \text{Surface active (m}^2) * V^2 \text{ (vitesse en m/s)}$$

$$C_x = 0,38 \text{ (évaluation du coefficient de portance des foils de bateaux)}$$

$$1025 \text{ kg} = \text{masse volumique d'un m}^3 \text{ d'eau de mer}$$

On en déduit :

$$V^2 = 39000 / (0,5 * 1025 * 0,38 * 2,14) = 93.57$$

$$\text{Soit } V = 9.67 \text{ m/s ou } 18.8 \text{ Nds}$$

- ✓ **Phase de décollage, lorsque le bateau s'appuie sur un seul foil : 78000 N sur le foil.**

$$V^2 = 78000 / (0,5 * 1025 * 0,38 * 2,14) = 187$$

$$\text{Soit } V = 13.68 \text{ m/s ou } 26.6 \text{ Nds}$$

On peut ajouter que dans la configuration TAKE OFF sur un seul foil, la traînée du foil actif étant proportionnelle à la portance (et donc à la vitesse), le couple résultant de cette traînée augmentera, ce qui rend le pilotage très sensible lors de cette phase du passage Archimédien à la phase Foiler.

Ci-contre, le devis de poids de l'AC75 avec un seul foil immergé. Cela illustre les conditions physiques du Foiler (CG : 2.06m /DWL) durant le décollage sur un seul foil.

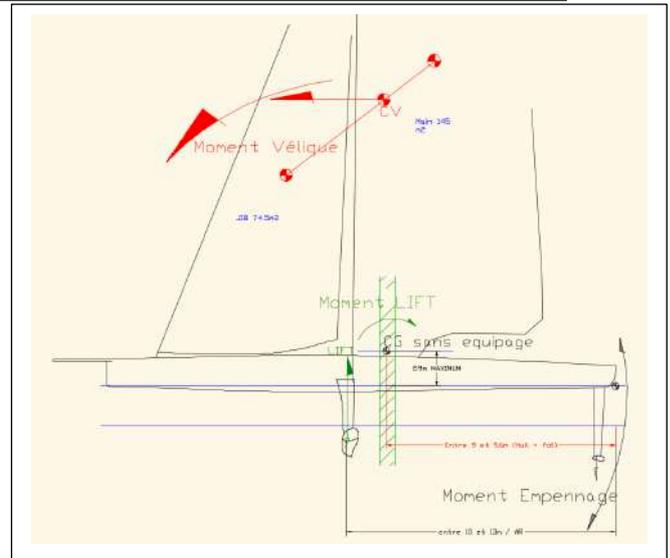
Description	masse (Kg)	X/Axe (x)	Y/Ref (y)	Z/AR (z) m'x	m'y	m'z
Foil Port	1150	5.226	2.442	8.77	8009.8	2868.3
Foil Starboard	1150	-5.383	-1.483	8.77	-6420.45	-1705.45
HULL Renfort / équipement technique Folts / Bowsprit / équipement technique Folts / Mast / Main Sail / Rudder	3720	0	2.8	10	0	10788
Foc	55	0	8.83	13.41	0	489.15
Equipe	1150	0	1.8	8	0	1840
Code 0	100	0	9	15	0	900
Accastillage / électronique / Media	175	0	1.8	8	0	315
Total Déplacement mesurés	7500				410.58	13419
CG (x lateral, y vertical DWL, Z Long)		-0.05	2.06	9.08		
masse		X/Axe (x)	Y/Ref (y)	Z/AR (z)		

Jean SANS www.experte-yachts.fr

Mais en vol, de nature instable, les équilibres peuvent dégénérer...

Un foiler sur 2 appuis et un plan régulateur arrière présente une assise de stabilité beaucoup plus importante et surtout moins instable que ce qui se produira sur l'AC75 qui doit voler sur un point d'appui sous le vent et dont l'assiette longitudinale est contrôlée par le plan porteur du safran.

En mode « VOL », il n'est plus question de centre de carène, de flottabilité, de lois Archimédiennes. Tout se passe autour du centrage du Foiler, centrage qui étant obligatoirement un centrage arrière.



Dans ces conditions de vol, le chavirage est possible par contre il y a peu de chance que le chavirage soit uniquement latéral.

En effet, le chavirage résultera d'une chute de la portance sur un foil, chute d'autant plus brutale qu'il sera très compliqué, voir impossible, d'associer le décrochage du foil, même repéré avec des capteurs, avec le temps de réaction pour agir sur la gouverne arrière (plan porteur du safran) afin de retrouver de la portance.



Le bras de levier (15 mètres) de la portance vélique est très grand. J'ajoute que ce n'est pas la composante transversale qui provoque le chavirage mais la composante propulsive dirigée vers l'avant mais la causalité du chavirage reste le décrochage du foil sous le vent.

L'équilibre sur un foil est de l'ordre de :
 (Lift de 7800 daN) * (Distance horizontale entre l'appui du foil et le centre de gravité du bateau)
 = **Force propulsive** * 15 m (voir le dessin ci-dessus)

Des configurations suite à un chavirage.

Il certain que contrairement aux AC45 et AC72, les nouveaux AC75 ne resteront pas chavirés (à 90°) l'étrave immergée jusqu'à la base du mat (approximativement).

La raison est simple, l'AC75 est un monocoque qui sera totalement instable dans cette position.

Dans l'hypothèse où il sancirait, cette configuration sera très temporaire et très rapidement l'AC75 se retrouvera chaviré comme un 505 ou un simple Dinghy.

Il faut préciser qu'il est prévu que le tube profilé du mat soit étanche. Cela empêche en théorie de faire un Capsize.

Chavirage avec les deux foils en position basse.

C'est la configuration qui apparait comme la plus facilement récupérable, pour revenir « Upright ».

En effet dans cette configuration (bateau à 90°), le centre de gravité de l'AC75 se situe sensiblement en avant du centre de carène, environ 300 mm.

Bien sûr le moment de redressement n'est pas favorable puisque le CG du bateau a dépassé la verticale du centre de carène, mais avec la flottabilité du mat (partie haute), l'AC75 se stabilisera vers 95°.

La coque gitée à 90° est enfoncée d'environ 900 mm.

Une méthode, déjà utilisée par Loïc PEYRON sur les AC45, pour redresser le bateau consistait à placer le catamaran face au vent avec l'aide d'un semi-rigide.

Dans cette position, le vent s'engouffre entre l'aile rigide et la surface de l'eau. Avec cet effet de « sol » combiné à la portance de l'aile dirigée vers le haut, un moment de redressement apparait et permet de remettre les bateaux « Upright » (en théorie).

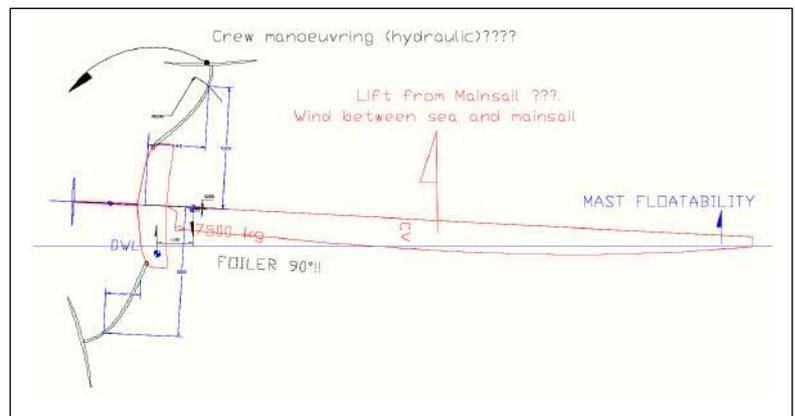
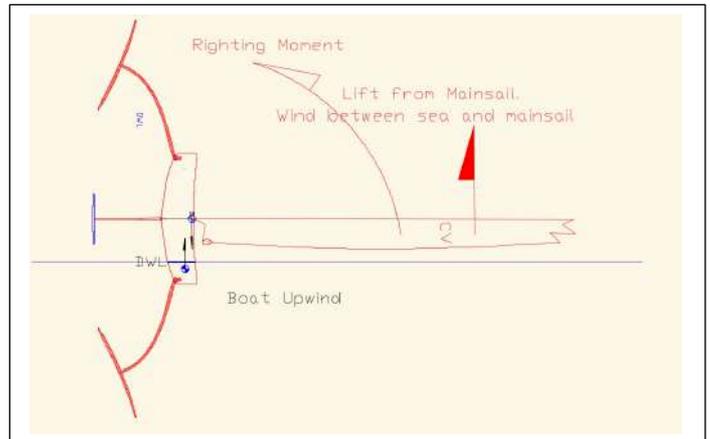
Mais il ne faut pas se leurrer, c'est une manœuvre de sauvegarde qui sous-entend que le bateau abandonne la régate.

Chavirage avec le foil au vent en position haute.

C'est la configuration qui apparait comme la plus difficilement récupérable, pour ramener le bateau en position « Upright ».

C'est aussi, lorsque le bateau est couché à 90°, la configuration des foils qui parait la plus dangereuse pour l'équipage.

En effet, le foil qui est en position haute se trouve entièrement au-dessus de la zone de travail de l'équipage (cockpits).



Cela représente 1.150 T d'acier (foil) articulé autour d'un point de rotation avec un bras de levier de 2.5 m, soit un couple vers le bas de $1.15 \times 2.5 = 2.87 \text{ T.m}$.
 Les efforts sur la structure du bateau sont moins importants que lorsque l'AC75 navigue sur un foil, mais cette configuration résulte de la rotation non contrôlée du bateau pendant le chavirage. Le choc du mat sur l'eau amplifie les sollicitations.
 On remarque la verticale du centre de gravité du bateau se situe à 1.5m de celle du centre de carène. Cela sous-entend qu'il faudra vaincre ce couple pour revenir en position Upright.

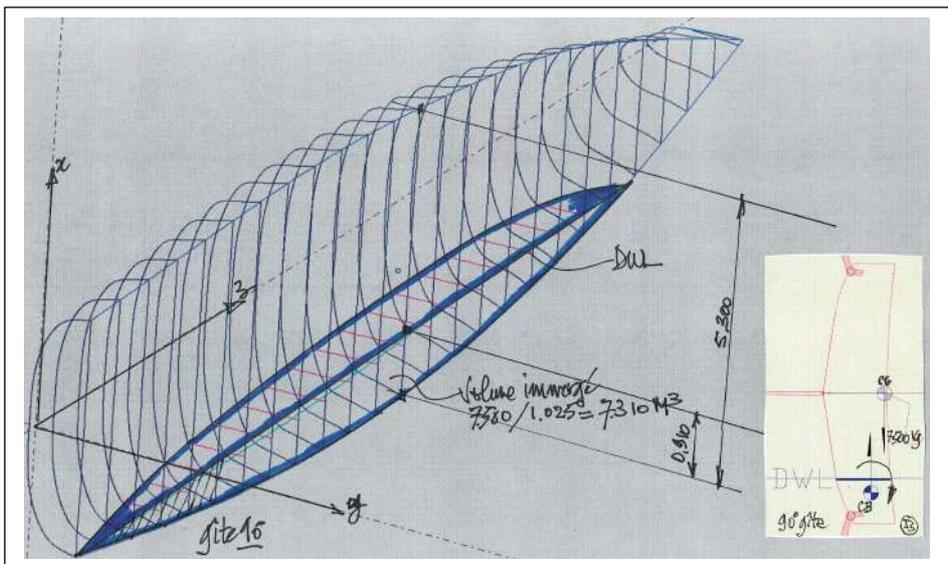
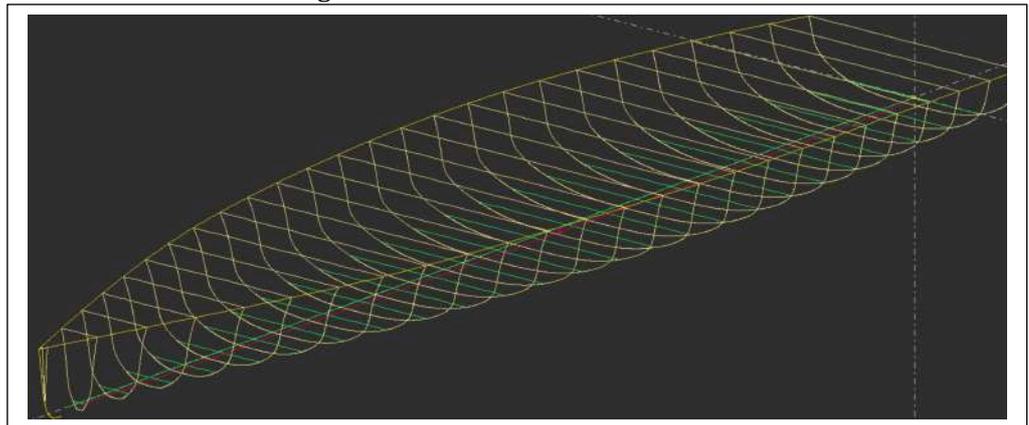
Certes, l'équipage (mais dans quelles conditions ergonomiques) peut utiliser l'hydraulique pour ramener le foil supérieur dans la position symétrique du foil immergé.
 Cela sous-entend que la centrale hydraulique (10000 psi / 800 Bars) fonctionne lorsque le bateau et chaviré à 90° .

Certes en cas de chavirage, la régata est terminée, mais il ne faut pas que cet incident, qui parait possible mette en danger les équipages.

Tous ces calculs ont été réalisés en utilisant les valeurs minimales des positions des centres de gravité imposées par les règles de classe de l'AC75.

Je pense que les architectes des différents Teams seront au-delà (dans le bon sens) de ces limites afin d'assurer une meilleure stabilité en navigation.

J'ai construit un modèle volumique, mon objectif étant d'étudier la stabilité et non le potentiel de vitesse d'une carène.



Carène chavirée à 90°

Jean SANS
 (3 Mars 2019)