



J. SANS (12/05/2019)

Version V5 : Analyse des paramètres de vol de l'AC75

[Suite des documents V1, V2, V3, V4](#)

www.experts-yachts.fr

Préambule

Dans mes précédents articles, les études ont porté dans un premier temps sur la réalité de la navigation d'un foiler et la découverte de l'AC75 avec principalement le passage de la **configuration Archimédienne** à la **configuration Foiler**.

Archimédienne à la **configuration Foiler**.

Deux analyses étaient indispensables :

- La stabilité en mode Archimédien
- Les situations de chavirages (L'AC 75 se retrouve alors, de fait et contre son gré, en mode archimédien) lors de la navigation en mode Foiler.

Il est apparu qu'il ne suffit pas de décoller, encore faut-il ensuite évoluer sur deux foils et un plan porteur arrière ou encore un foil et ce même plan porteur arrière.

C'est lors de ces phases d'évolution (en régates) en mode Foiler que la stabilité de vol devra être maîtrisée parfaitement, d'abord afin de conserver la vitesse et ensuite, et ce sera primordial, éviter un décrochage du ou des foils.

Si on ajoute que pour être performant, il faudra voler à une altitude relativement constante en permanence, on conçoit l'importance de la stabilité et de la maniabilité en vol.

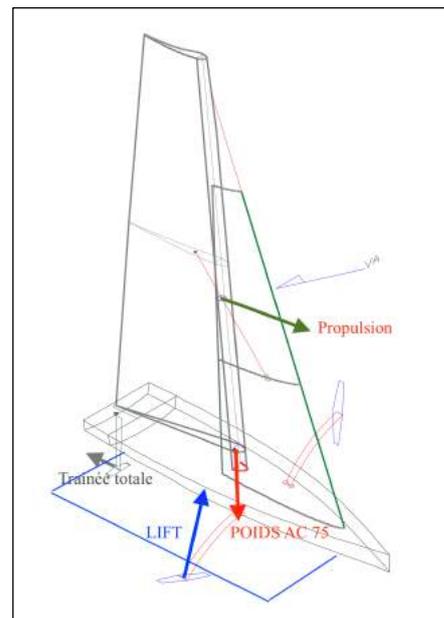
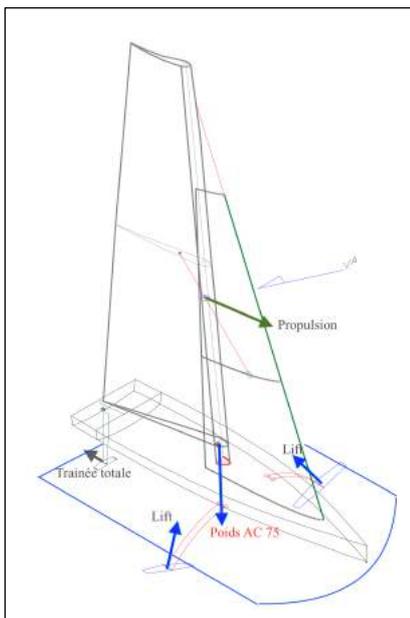
Le vol en mode Foiler

D'abord se représenter les forces en présence, que ce soit avec deux foils ou un foil.

Au total, en schématisant, il y a quatre forces qui s'exercent sur l'AC 75.

- Le POIDS de l'ensemble prêt à naviguer (masse 7500 kg soit 7430 daN¹)
- Le LIFT apporté par le ou les foils. Pour voler ce LIFT doit être équivalent au POIDS.
- La FORCE PROPULSIVE qui procure la vitesse nécessaire à la production du LIFT.
- La TRAINÉE, qui s'oppose au déplacement

On comprend immédiatement que l'on aura très peu d'influence directe sur le POIDS, tout au plus une certaine possibilité de modifier longitudinalement la position du Centre de Gravité (l'équipage est prévu pour 1100 kg, mais sa plage d'évolution dans le cockpit est limitée).



¹ Les unités de force s'expriment en N ou daN. Usuellement dans le langage courant on parle plutôt de Kg. Un daN correspond à sensiblement un Kg.

Sur la FORCE PROPULSIVE, l'équipage apportera nécessairement une grande contribution, mais sera tributaire de vent. Mais à elle seule la FORCE PROPULSIVE ne suffit pas pour passer du mode Archimédien au mode FOILER.

Le LIFT et son corollaire la TRAINÉE apparaissent alors comme le pivot des conditions de vol, puisque le mode FOILER repose sur les appuis nécessaires du bateau sur les foils ou le foil.

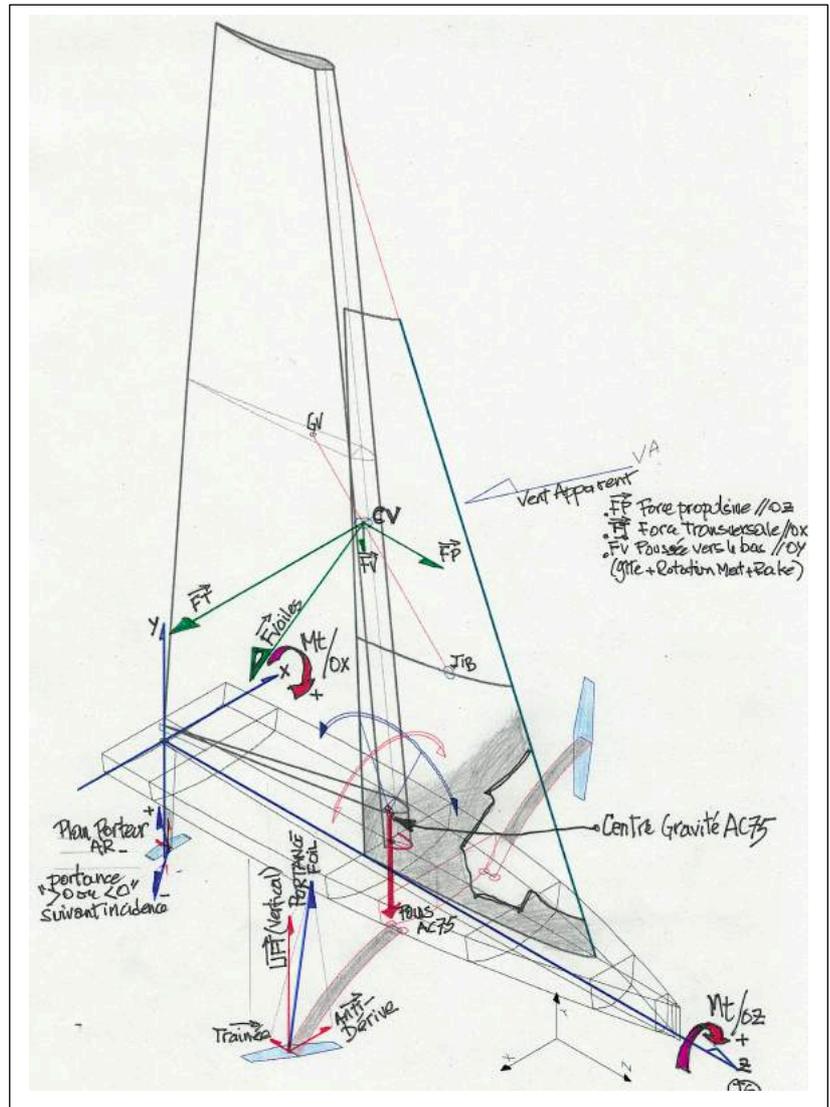
Le LIFT et la TRAINÉE sont intrinsèquement liés, le contrôle de ces deux forces contribuera à assurer un vol stable et de la maniabilité nécessaire pour régater.

Le dessin ci-contre met en évidence qu'en mode Foiler, l'ensemble des forces qui entre en jeu paraît plus complexe.

Seuls deux mouvements de rotation sont pris en compte :

- La rotation autour de l'axe XX' , soit le risque de sancir.
- La rotation autour de l'axe ZZ' , soit le chavirage transversal.
- Il faut noter que mouvement de rotation autour de l'axe YY' (axe vertical), que l'on nomme le « lacet » n'est pas représenté.

En réalité le chavirage, s'il se produit, est une combinaison des deux rotations XX' et ZZ' .



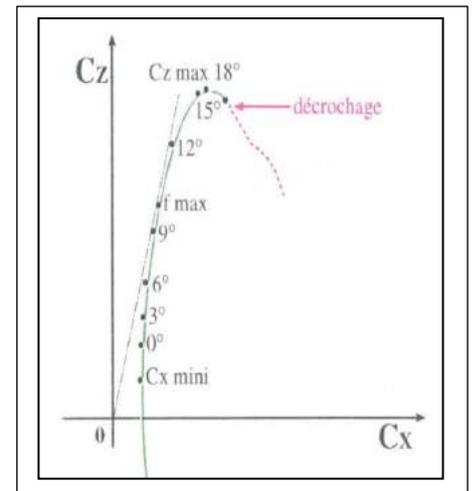
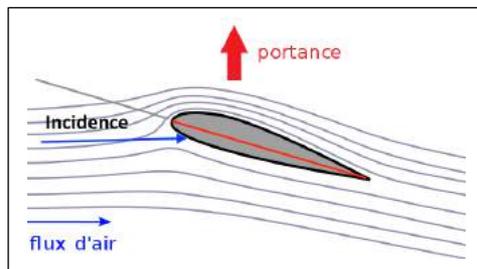
Les causes du chavirage en mode Foiler sont entièrement différentes de celles qui existent en régime archimédien, ou tout se situe dans la position relative entre le Centre de Gravité et le Centre de Carène au fur et à mesure que le bateau gîte.

En mode Foiler, l'AC 75 est posé sur un ou deux foils. Le plan porteur arrière joue de rôle de stabilisateur.

Dans cette configuration, seule la perte de portance sur les foils ou une modification du « centrage » du Foiler provoquera un retour non contrôlé au mode archimédien avec un risque de chavirage.

Pour bien appréhender le domaine de la perte de portance (qui produit le LIFT), il faut repartir de la base, c'est-à-dire de l'aile, que les marins connaissent avec le réglage des voiles mais dont ils ne connaissent rien (ou presque) comme moyen de sustenter.

La Portance aérodynamique ou hydrodynamique, son application.



Vocabulaire propre au profil d'une aile (ou d'un foil) :

- ✓ L'extrados : surface où s'exerce la dépression du flux d'air ou d'eau
 - ✓ L'intrados : surface où s'exerce la pression du flux d'air ou d'eau.
- La dépression est plus importante que la pression.
- ✓ Le profil géométrique : Symétrique ou Dissymétrique
 - ✓ Le bord d'attaque : ligne qui coure le long de l'aile et qui reçoit le fluide en premier
 - ✓ Le bord de fuite : ligne qui relie l'intrados et l'extrados à la « sortie » du fluide.
 - ✓ La corde : ligne qui joint le point du bord d'attaque au bord de fuite.
 - ✓ L'épaisseur : % qui identifie l'épaisseur du profil. Exemple NACA 6412 (Épaisseur 12%)

- ✓ Le **Foyer** : C'est le centre de gravité aéro (ou hydro) dynamique du profil. Pour faire simple, le **Foyer** est le point d'équilibre du profil. Attention c'est un calcul géométrique qui ne prend pas en compte la fabrication réelle (longeron, tôles etc).

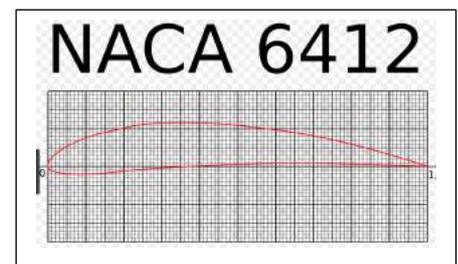
Le foyer est un point fixe propre à chaque forme de profil.

- ✓ Le **Centre de Poussée** est le point où s'applique la résultante des forces résultantes de la pression et dépression sur l'intrados et extrados.

Ce point se déplace le long de la corde en fonction de l'angle d'incidence.

- ✓ C_z représente la portance (lift)
- ✓ C_x représente la traînée (frein)

En fonction de l'incidence du profil le C_z augmente (avec une limite), mais au fur et à mesure que le C_z augmente, la traînée suit.

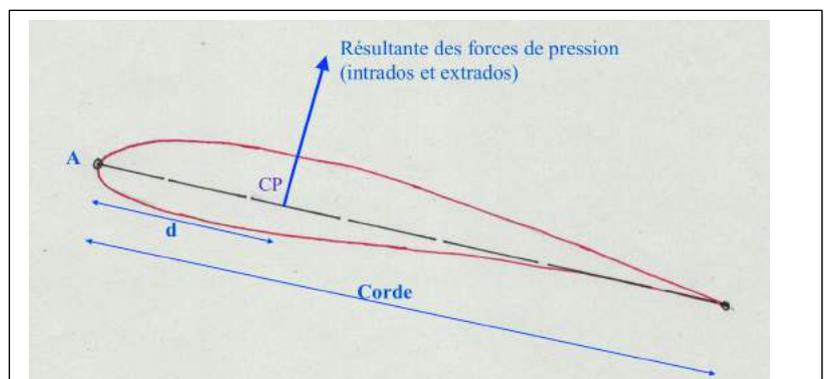


Les deux points (**Foyer** et **Centre de Poussée**) représentent les bases de la stabilité du vol.

Analyse du Centre de Poussée (CP) pour un profil dissymétrique

La position du centre de poussée est définie par sa distance (d) par rapport au bord d'attaque (point A) de l'aile. La distance d est exprimée fraction de corde prise égale à 1.

Angle d'incidence. (En degré)	Valeur de (d) par rapport à la corde de valeur 1
0	0.465
2	0.370
4	0.337
6	0.319
8	0.307
10	0.299



On constate que lorsque l'angle d'incidence augmente, le CP se déplace vers le bord d'attaque et vice versa évidemment.

Exemple sur un profil du même type

Cas des profils symétriques.

Sur un voilier les profils symétriques sont obligatoires sur les voiles de quille et sur les safrans, puisque l'incidence est située alternativement d'un côté et de l'autre, en d'autres mots l'intrados devient extrados et vice-versa.

La symétrie se traduit par le fait que quel que soit l'incidence, le Centre de Poussée est fixe et se trouve sensiblement à 25% de la corde du bord d'attaque.

Calcul de la force de Portance produite par le foil.

Je fais ce rappel pour la forme.

La force de portance d'une aile est exprimée par la relation :

$$P = 1/2 * \rho * S * V^2 * C_z, \text{ où}$$

ρ : masse volumique de l'eau

V : vitesse du foil dans l'eau

S : surface du foil

C_z : coefficient de portance. Il dépend de l'incidence (α) de l'aile et de son allongement.

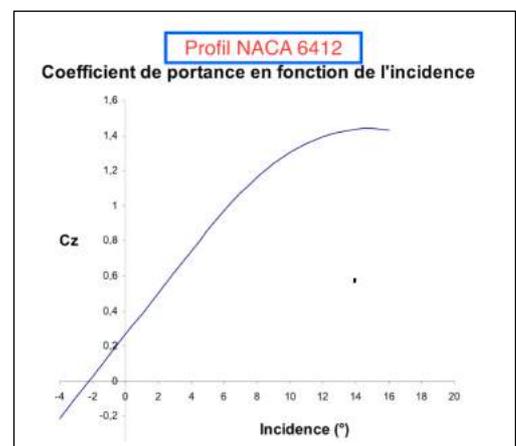
L'allongement (λ) d'un foil, à ne pas confondre avec son envergure, a pour valeur :

$$\lambda = \text{Env}^2 / S \text{ avec :}$$

Env = l'envergure de l'aile et S = la surface de l'aile

La courbe $C_z = f(\alpha)$ pour les profils NACA 6412. Cette courbe montre que pour $\alpha = 0$, le coefficient de portance est nul. On remarque que sur 60% la progression de la portance est linéaire.

Mais cette courbe correspond au C_z d'un foil (ou une aile) dont l'allongement $\lambda = \text{Env}^2 / S$ serait infini.



Ce n'est évidemment pas le cas pour un foil, qui, comme une aile d'avion, possède obligatoirement un allongement fini.

En fait, seule la partie linéaire de la courbe du Cz est intéressante (et utilisable) car le ratio (portance / trainé) est constant, ce qui n'est plus le cas dès que la courbe du Cz s'arrondit.

Dans cette zone qui s'incurve, la Traînée augmente plus vite que le Cz (Portance), ce qui est bien moins intéressant, c'est un peu comme si on freinait en accélérant !

A partir de la **zone linéaire** de l'expression du **Cz infini** du profil (Foil d'allongement infini), on calcule en prenant en compte l'expression de l'allongement ($\lambda = \text{Env}^2 / S$), le **Cz λ propre à chaque foil ou aile. Les aérodynamiciens se sont chargés de ce calcul.**

Au final le **Cz λ** d'un foil réel, c'est à dire d'allongement fini (λ) (on connaît ses dimensions), a pour valeur :

$$Cz\lambda = Cz / (1 + Cz / \pi \cdot \lambda)$$

Cz étant le coefficient de portance à allongement infini pris dans la courbe ci-dessus.

Par exemple pour un foil de 4 m * 0,55 m, soit 2,2 m² ($\lambda = 7,23$) et un Cz de 1 (angle d'incidence de 6°), le **Cz λ** de ce foil est de 0,958, soit 4,4% de moins.

La différence entre le Cz (foil infini) théorique et le Cz propre à un dessin réel de foil reste faible.

Si l'allongement augmente et passe à 8, le **Cz λ** devient 0,962.

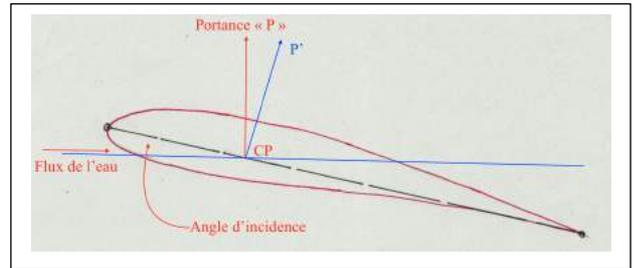
Ce qui est normal, puisque l'allongement tend vers l'infini... toutes proportions gardées.

Représentation sur le profil (foil) de la force de Portance

On vient de voir que le Centre de Poussée (CP) est le point d'application de la force résultante de portance (P).

Le vecteur P est perpendiculaire à la trajectoire (direction du flux d'eau).

L'angle d'incidence se mesure entre la corde du profil (point du bord d'attaque au bord de fuite) et la direction du flux d'eau.



La corde d'un profil est l'élément de base bien identifié de chaque profil. Le Foyer et le Centre de Poussée sont situés sur ce segment de droite.

Afin de simplifier les méthodes de calcul à venir, on utilisera la projection du vecteur P sur la perpendiculaire à la corde en CP.

Pour simplifier, au lieu de calculer $P' = P \cdot \cos(\text{incidence } \alpha)$ ou prend $P' = P$.

Le cosinus de 6° ayant la valeur 0.9945, cela ne perturbera pas les calculs.

Donc, dans les calculs à venir, la portance appliquée au point CP sera prise comme étant égale

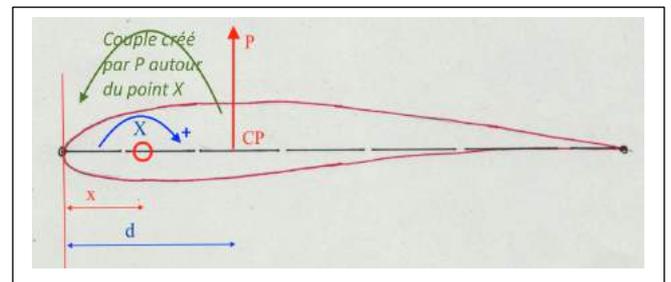
à :
$$P = 1/2 * \rho * S * V^2 * Cz\lambda$$

Quid d'une relation entre le Centre de Poussée (CP), le Foyer (F), la Portance (P) ?

La portance P ainsi que sa position longitudinale varient en fonction de l'angle d'incidence du foil par rapport au flux d'eau.

Les seuls éléments intangibles d'un profil, choisis par l'architecte, sont le dessin de ce profil et sa corde.

En règle générale lorsque que sur un corps solide on se fixe un point, même quelconque, et une force identifiée en intensité, direction et position par rapport à ce point de référence, il y a création d'un couple, qui génèrera une rotation autour du point de référence.



En mécanique statique, pour quantifier un couple il faut d'abord définir (arbitrairement) un sens de rotation de référence.

Le sens horaire est pris comme référence.

En conséquence, le couple créé par la portance P appliquée au Centre de Poussée CP, autour d'un point X situé sur la corde à la distance x du bord d'attaque s'exprime ainsi :

Couple ou Moment

$Mt / \text{Point } X = -1/2 * \rho * S * V^2 * Cz\lambda * (d - x)$

Point Fixe pour la rotation
Sens du Moment
Expression de la Portance P
Bras de levier

Variation du moment Mt en fonction de l'incidence

La connaissance de la stabilité d'un foil demande que l'on connaisse ses caractéristiques de Portance, c'est-à-dire, les dimensions du foil, son allongement, son type de profil, ainsi que les Cz et les positions du Centre de Poussée en fonction de l'incidence du flux d'eau, et enfin de connaître comment la force de portance P agit sur l'équilibre du foil (voir ci-dessus).

Par analyse expérimentale de l'évolution de l'expression $Cz_{\lambda} * (d - x)$ en fonction de l'angle d'incidence, du Cz_{λ} correspondant et de la position du CP (d), on constate² que cette expression reste constante lorsque (x) prend sensiblement la valeur 0,25.

Cela signifie que le **Mt/point X (moment par rapport au point X) reste constant lorsque $x = 0.25$ et cela quel que soit l'angle d'incidence.**

Cette constatation est vraie quel que soit le type de profil dissymétrique.

Le point X situé à $(0.25 * \text{Corde})$ du bord d'attaque est appelé « **Foyer du foil en tangage** »

Finalement pour un foil dessiné (comme pour une aile), il y a 3 paramètres « fixes » :

- Le profil
- La corde
- La position du foyer

Quantifier la valeur de ce moment de tangage au foyer ?

La relation (1) encadrée en page 5 supra, $Mt / X = - 1/2 * \rho * S * V^2 * Cz_{\lambda} * (d - x)$, indique la valeur de ce moment par rapport à un point X que l'on fixe au foyer puisque nous cherchons à évaluer ce moment autour du foyer.

Toutefois il faut remarquer que lorsque l'incidence (α) varie, ce qui se produit pratiquement en permanence, ce sont deux paramètres de cette équation qui sont modifiés, à savoir :

- ✓ Cz qui augmente ou diminue
- ✓ CP qui avance ou recule, ce qui implique que la valeur (d) est en permanence variable

Dans ces conditions quantifier (Mt / X) devient complexe.

La solution passe par l'introduction d'un « **Coefficient de Moment** » (Cmx), ce nouveau paramètre permet de lier la variation du moment (Mt / X) à celle de ce seul paramètre.

$$Mt / X = 1/2 * \rho * S * V^2 * Cmx * c \quad (2) \quad (c \text{ étant la corde du profil.})$$

En égalant les relations (1) et (2) qui sont deux expressions du même élément (Mt / X), on obtient :

$$Cmx * c = Cz_{\lambda} * (d - x), \text{ soit :}$$

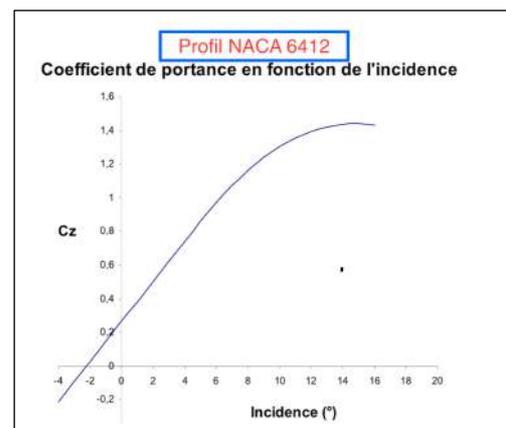
$$Cmx = - (Cz_{\lambda} * (d - x)) / c$$

Cette expression n'est valable que dans le domaine de « vol » usuel (c'est-à-dire dans la zone rectiligne de la courbe du Cz), c'est-à-dire pour des angles d'incidences où le Cz n'est pas nul ou très proche de zéro.

Les essais et expérience démontrent qu'il existe donc un point du profil qui est indépendant du Cz et de la position du centre de poussée CP.

Le moment autour de ce point s'écrit :

$$Mt / F = 1/2 * \rho * S * V^2 * Cmf * c$$



² Cette démonstration est faite pour une longueur de corde du profil égale à 1.

Conclusion : Sur un foil, pour chaque section transversale, il existe un point nommé **Focus**. Ce point est fixe et situé à $(0.25 \cdot \text{corde})$ du bord d'attaque, il appartient à la section du profil. Contrairement au centre de poussée, la position du foyer F est donc fixe et indépendante du Cz et de l'incidence.

Donc tout profil, en plus de la Portance qu'il peut générer et qui sera utilisée pour soulever le Foiler, possède naturellement un Couple de tangage autour du Foyer qui fera piquer le profil. Au final, le moment de tangage du foil aura un impact sur sa portance.

Cette propriété hydrodynamique est importante car elle amène à étudier la notion de stabilité du vol sur foil(s), puisque l'on peut imaginer que la trajectoire du foil soit rectiligne même lorsque le pilote modifie l'angle d'incidence pour compenser une perte de portance... jusqu'à une certaine limite quand même.

Notion de stabilité et d'équilibre

Il est important de bien distinguer la notion de **stabilité** de la notion **d'équilibre**.

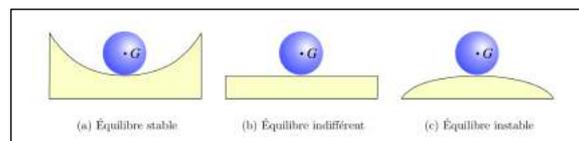
La stabilité d'un système ne peut être étudiée que si ce système est en équilibre.

Avant toute chose, il faut différencier l'emploi du nom « stabilité » de celui de l'adjectif « stable ».

L'adjectif permet de décrire l'état d'équilibre d'un système.

Le substantif décrit la manière dont se comporte un système dans l'espace (trajectoire).

Par définition, **un équilibre** peut posséder 3 états : être **stable**, **instable** ou **neutre** :



Un système est dit en **équilibre stable** s'il a tendance à revenir de lui-même à sa position initiale lorsqu'on l'en écarte. C'est le cas, par exemple du voilier archimédien entre 0° et l'angle de chavirage.

Un système est dit en **équilibre instable** si, après avoir été légèrement écarté de sa position initiale, il a de lui-même tendance à s'en éloigner encore plus. C'est le cas d'une bille posée au sommet d'une surface convexe, elle reste en place tant que son poids (vecteur force) se trouve strictement confondu avec la normale à la tangente au sommet de la surface.

Un système est dit en **équilibre neutre** si, lorsqu'on l'écarte de sa position initiale, il reste alors immobile dans la nouvelle position. C'est le cas de tous les objets posés sur un plan horizontal (on néglige les frottements). Toutes les positions du plan sont alors des positions d'équilibre.

Prenons l'hypothèse d'un foiler « idéal » navigant uniquement sur deux foils transversaux sans plan porteur arrière : un IMOCA

(foil & quille angulée avec incidence du profil) par exemple.

En réalité les IMOCA s'appuient sur la partie arrière de la coque, mais ils peuvent trouver un équilibre stable (temporaire) uniquement sur les plans porteurs avant.



Une perturbation quelconque génèrera immédiatement une variation d'incidence et donc une variation de portance P appliquée au point CP.

Le Foiler possède évidemment une masse constante pendant le vol (Poids), donc un centre de gravité (CG) dont la position dans l'espace varie très peu pour l'AC75 (au grès du faible déplacement longitudinal de l'équipage).

Lorsque l'on se limite à l'interaction du Lift créé par le ou les Foils et à la Force Propulsive, le Foiler est soumis à 3 forces, les deux énumérées et le poids du Foiler.

On voit très bien que tout se joue, sur les moments du LIFT et de la Force Propulsive par rapport au point d'application du POIDS (le Centre de Gravité CG).

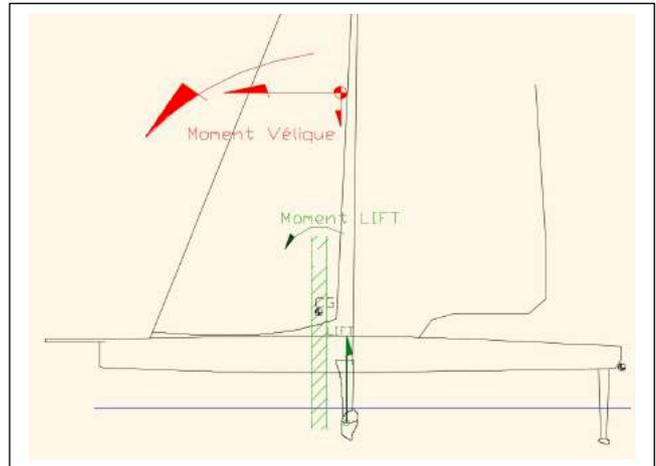
Lorsque la plateforme est dessinée (l'implantation des foils est donc définie), il y a une seule variable utilisable par l'architecte : la position longitudinale du CG.

- **Première configuration** : Le centre de gravité (CG) est situé en avant du Foyer. La portance exercée au point CP génère un moment de tangage autour du CG ce qui provoque de fait une rotation du Foiler autour de son Centre de Gravité (mouvement de piqué).

Le couple vélique augmente cette instabilité puisqu'il est dans le même sens que le couple généré par la portance du foil.

Le moment de tangage du profil s'ajoute à ces deux couples.

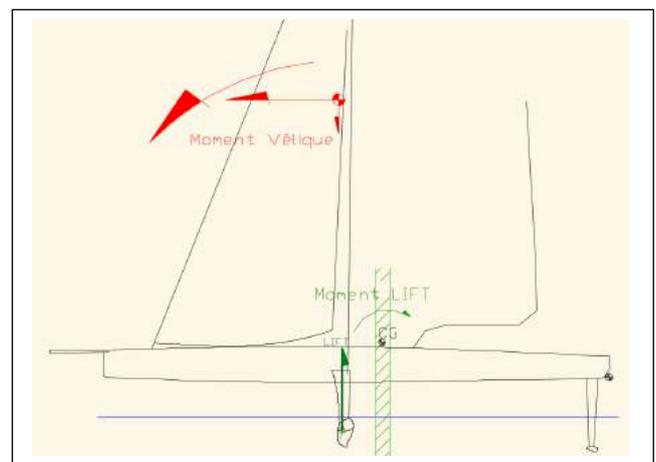
Le Foiler est « centré avant ». Il est instable.



- Deuxième configuration** : Le CG est situé en arrière du Foyer. La portance exercée au point CP génère toujours un moment de tangage autour du CG qui provoque de fait une rotation du Foiler autour de son Centre de Gravité (mouvement à cabrer). Le couple vélique augmente, il s'oppose au couple généré par la portance du foil.

Le moment de tangage du profil s'ajoute toujours au couple vélique.

Le Foiler est « centré arrière ». Il est possible pendant un temps plus ou moins long que le couple vélique et le couple issu des foils soit identique. On obtient ainsi une « position stable temporaire ».



- **Troisième configuration** : Le CG et CP sont superposés. Si cette configuration dite « neutre » est possible sur un planeur, qui n'a pas de force propulsive, elle est totalement impossible sur un foiler à cause du centre vélique qui produit un moment vélique très important.

Les deux premières configurations sont exploitables sur un Foiler à condition qu'il y ait un couple régulateur qui :

- S'opposera aux couples à piquer (vélique + foil + moment de tangage) de la première configuration
- Équilibrera le couple à piquer vélique (+ le moment de tangage) et le couple à cabrer du foil pour la deuxième configuration.

Dans le cas de l'AC75, les initiateurs des règles de classe, imposent aux architectes une limite avant et une limite arrière pour la position longitudinale du Centre de Gravité, ainsi qu'une position maximale verticale du CG. De cette manière ils imposent un Centrage Arrière (deuxième configuration).

(Extraits simplifiés de la règle de classe)

9.7 Le centre de masse (CG) **longitudinal** de l'ensemble de la plate-forme doit se trouver entre 9 000 m et 9 600 m en avant du point de référence arrière (tableau arrière).

Pour valider cette position, on devra respecter les prescriptions suivantes :

- a) les deux foils en position basse ;
- b) tous les flaps de bord de fuite sont placés au centre de leur amplitude de mouvement ;
- c) le plan de symétrie du safran aligné sur le plan de symétrie ;
- d) le plan porteur du safran placé au centre de son amplitude de mouvement ;

9.8 Le centre de masse (CG) **vertical** de l'ensemble de l'AC75 ne doit pas être supérieur à 2,900 m au-dessus du plan de référence de la flottaison archimédienne.

Il est ajouté qu'il est interdit d'embarquer des masses additionnelles (hors équipage) pour les régates, de même l'utilisation de ballasts liquide est interdite.

Cette règle sera appliquée en jouant sur le devis de poids.

L'étude de l'équilibre peut être réalisée à partir de n'importe quel point identifié sur un solide soumis à plusieurs forces. Dans le cas présent on peut très bien étudier les conditions d'équilibre autour du Centre de Gravité (CG).

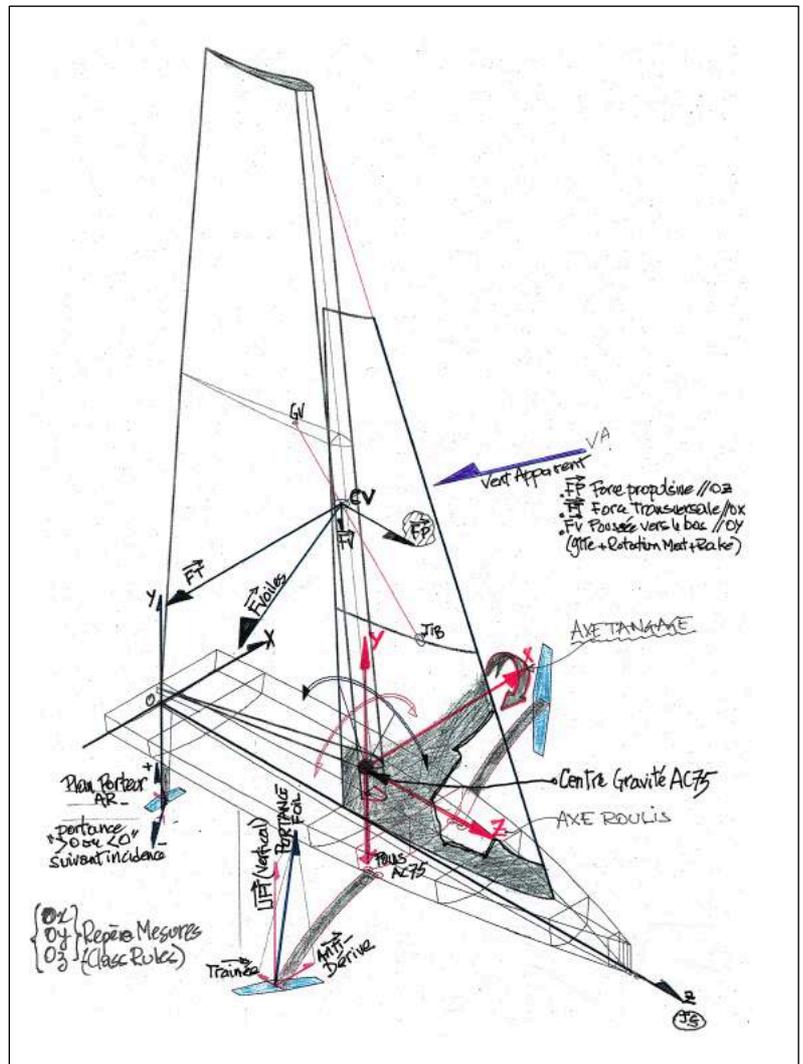
De l'équilibre du Foiler

Le foiler est donc soumis à plusieurs forces : son POIDS, le LIFT généré par le foil, la FORCE PROPULSIVE et la TRAÎNÉE.

D'après le principe d'inertie, dans un référentiel galiléen (0x , Oy, Oz), un solide (le Foiler AC75) est en équilibre à l'instant (t) si la Somme Vectorielle des forces qui lui sont appliquées est nulle : $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$

De même pour ce même solide, la somme des moments³ de chacune des forces par rapport à un point quelconque du solide doit être nulle : $\sum M_t F_{ext} / P_t = 0$

Ce qui se traduira pour simplifier le problème : $\sum M_t F_{ext} / CG$ (Centre de Gravité) = 0 (**les 3 axes en rouge**)



³ Moment d'une force : intensité * bras de levier. Le moment possède un sens noté (+ / -) par rapport à un sens de rotation pris comme référence (par exemple « horaire » ou « anti horaire »).

A/ Inventaire de moments autour de l'axe GX (Mouvement de tangage) :

- i. Moment créé par les Foils (LIFT)
- ii. Moment créé par la portance des voiles : Force propulsive (F_p) perpendiculaire au plan transversal de l'AC75.
- iii. Moment créé par la portance des voiles : Force // plan de symétrie de l'AC75 (F_v)
- iv. Moment généré par le plan porteur arrière.

Ce qui se traduit par l'égalité suivante : (en regardant l'axe GX croissant depuis le point G, on prend le sens horaire comme référence positive)

$$(- \text{Mt créé par Lift}) + (\text{Mt créé par } F_p) - (\text{Mt créé par } F_v) +/- (\text{Mt empennage}) = 0$$

Forces et Bras de levier :

Force LIFT : Projection de la portance du Foil actif sur un plan vertical parallèle au plan de symétrie de l'AC75.

Bras de levier (LIFT) : Distance horizontale entre le Point G (CG) et le plan perpendiculaire à l'axe de l'AC75 passant par le point d'application de la portance des ou du Foil actif.

Force Propulsive F_p : Composante propulsive de la portance des voiles (parallèle à la trajectoire de l'AC75)

Bras de levier (F_p) : Distance verticale entre le point G (CG) et le plan perpendiculaire horizontal parallèle au plan de flottaison et passant par le centre de poussée des voiles.

Force verticale F_v : Composante issue de la portance des voiles orienté vers le bas (à cause de la gîte de l'AC75, bien que cette gîte soit faible).

Bras de levier (F_v) : Distance horizontale entre le Point G (CG) et le plan vertical perpendiculaire au plan de flottaison et passant par le centre de poussée des voiles.

Force poussée empennage AR : Projection sur le plan vertical perpendiculaire à l'axe de l'AC75 et passant par le centre de poussée de l'empennage horizontal arrière.

Bras de levier (poussée empennage) : Distance horizontale entre le Point G et le plan vertical perpendiculaire au plan de flottaison et passant par le centre de poussée de l'empennage horizontal.

B/ Inventaire de moments autour de l'axe GZ (Mouvement de Roulis : gîte du bateau) :

Autour de l'axe GZ se joue l'équilibre transversal de l'AC75, dont deux moments apparaissent prépondérants.

- Moment créé par la composante transversale (F_t) de la portance des voiles. Pour l'AC75, qui navigue, en mode Foiler, à une vitesse pratiquement toujours supérieure à la vitesse du vent réel, le vent apparent (composition du vecteur vent réel et du vecteur vent vitesse) est « de face ». Cela signifie que l'AC75, navigue globalement très près du vent (apparent).

Dans ces conditions, l'angle de la portance aérodynamique avec l'axe du bateau est de l'ordre de 60/70°. Cela se traduit par une composante propulsive (// axe de la trajectoire) environ 2,5 à 3 fois plus faible que la composante transversale (perpendiculaire à l'axe du bateau).

L'action de la composante Fv (vers le bas) de la portance des voiles amplifie l'action de la composante (Ft).

➤ Moment créé par les Foils (LIFT).

Dans le plan transversal, perpendiculaire au plan de symétrie de l'AC75, la portance du Foil se décompose en deux forces perpendiculaires, le LIFT dirigé vers le haut et la composante ANTIDERIVE dirigé vers l'axe du bateau.

Ces deux forces ont des effets contraires, le LIFT s'opposera au couple de chavirement (composante Ft de la portance des voiles), la composante ANTIDERIVE amplifiera ce phénomène de gîte.

Dans le cas où le Foiler vole sur les deux Foils, les deux composante ANTIDERIVE sont sensiblement égales et opposées, donc les moments qu'elles génèrent s'annulent.

Remarque : Le moment autour de l'axe GZ créé par le plan porteur arrière est négligeable.

L'équation autour de l'axe GZ est la suivante :

$$\begin{matrix} \text{(Mt créé par Lift)} & - & \text{(Mt créé par l'Antidérive)} & - & \text{(Mt créé par Ft)} & - & \text{(Mt créé par Fv)} & = & 0 \\ \text{(1)} & & \text{(2)} & & \text{(3)} & & \text{(4)} & & \end{matrix}$$

Seul le Moment (1) généré par le LIFT est « favorable », mes moments (2), (3), (4) sont défavorables.

Le pilote ne peut pas agir sur les bras de levier qui sont intrinsèquement liés à construction et aux règles de Classe de l'AC75.

Il dispose de deux paramètres sur lesquels il peut agir : la portance du ou des foils ET la portance produite par les voiles.... Et encore, ces deux paramètres sont étroitement liés à la vitesse du vent réel sur lequel le pilote n'a pratiquement aucune prise.

L'empennage arrière horizontal contrôlera la stabilité du vol.

Le Foiler étant en équilibre, **la stabilité du vol doit être prise en compte.**

La stabilité du vol concerne : la manière de voler à une altitude la plus constante possible, mais aussi son aptitude à réagir le plus rapidement et efficacement possible lorsqu'une de perte de portance ou une perte de puissance propulsive apparaissent.

Comme nous venons de voir, le Foiler ne peut naviguer que dans la configuration 2, c'est-à-dire « centré arrière », c'est-à-dire lorsque le couple vélique autour du foyer du bateau et celui issu du devis de poids sont le plus identique possible.

Sauf, lorsqu'à de rares moments (très courts), ces deux couples sont égaux (voir la photo de CHARAL en page 7), il est nécessaire que le Foiler possède un système compensateur qui permettra d'ajuster l'équilibre de ces deux couples antagonistes, tout en produisant le moins de traînée possible (frein !!!).

Ce système compensateur sera sensiblement identique à celui utilisé sur les avions (**Tailplane** en anglais ou nommé aussi **PHR, Plan Horizontal Réglable**), c'est-à-dire l'empennage horizontal arrière.

Techniquement il s'agit d'un plan « horizontal », à profil symétrique, implanté le plus en arrière possible.

L'intérêt de placer ce plan horizontal le plus arrière, répond à deux impératifs :

- Se trouver le plus loin possible du sillage (en « V ») perturbé provenant des deux foils (ou même d'un seul).
- Utiliser un bras de levier le plus grand possible autour du **point de rotation** afin de diminuer la surface de ce plan porteur, ce qui revient implicitement à diminuer la traînée de ce plan porteur.

Le pilote⁴ utilisera donc la commande d'angulation (+6° / -6° environ) de l'**empennage horizontal arrière (PHR)** pour maîtriser une assiette de vol horizontale mais aussi afin de pouvoir cabrer plus ou moins la plateforme dans le but de modifier l'angle d'incidence du ou des foils.

Les Foils de l'AC75, ne possèdent pas de réglage du « Rake » (Incidence) en navigation.

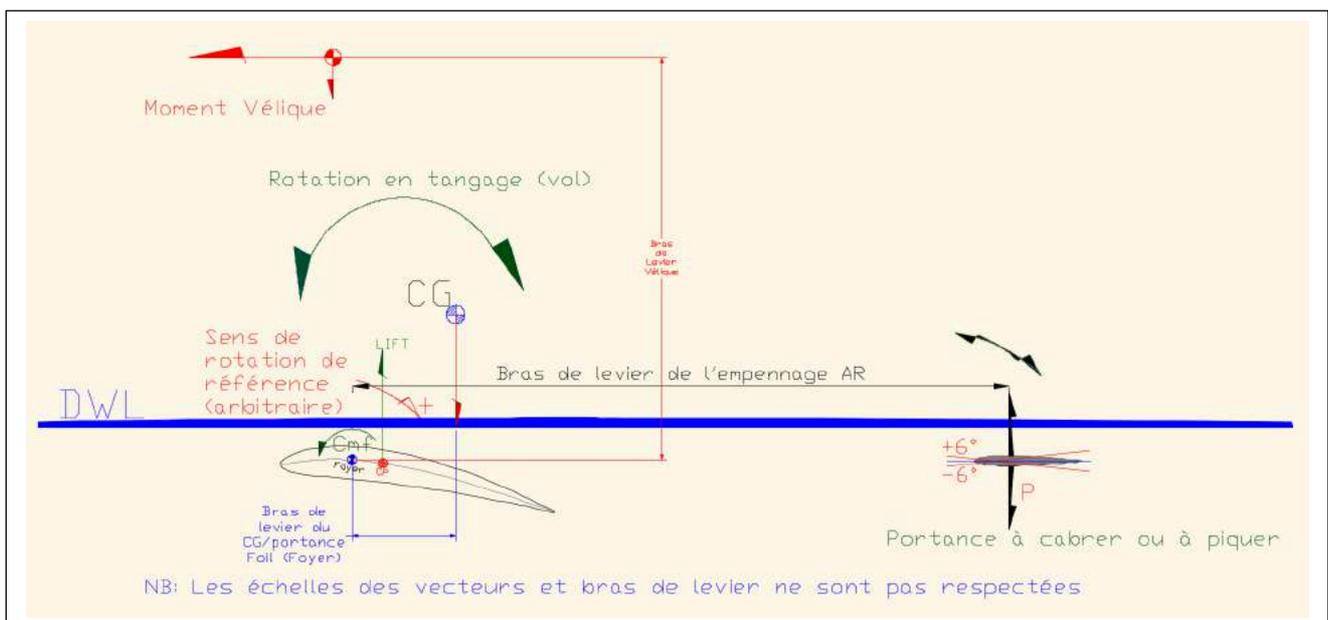
Le « Rake » est fixé par chaque Team lors de la conception. Toutefois le pilote peut moduler (diminution ou augmentation) la portance en jouant sur le volet du bord de fuite du foil.



L'absence du réglage en navigation du « rake » est motivée par le fait qu'en sortie de bordé, il y a déjà le mouvement de rotation de chaque bras (position Docking, en Cloche, Dégagement hors de l'eau).

Ajouter un autre mouvement de rotation, pose des problèmes de conception, et surtout de masse. La photo ci-dessus du vérin hydraulique qui commande le « rake » de chaque foil du Trimaran GITANA, donne une idée des efforts en présence.

La partie verticale de l'empennage (safran) contrôle la trajectoire (lacet et direction).



Remarque : Lors de la phase décollage, le calage de l'empennage arrière (PHR) sera utilisé pour cabrer le Foiler et ainsi augmenter l'incidence du foil.

⁴ « Le pilote » ou le système de pilotage automatique ou d'assistance au pilotage.

Les volets de bord de fuite (flap) de foils centraux

Toutefois s'il reste un domaine, relativement libre, c'est celui des volets (flaps en anglais) de bord de fuite.

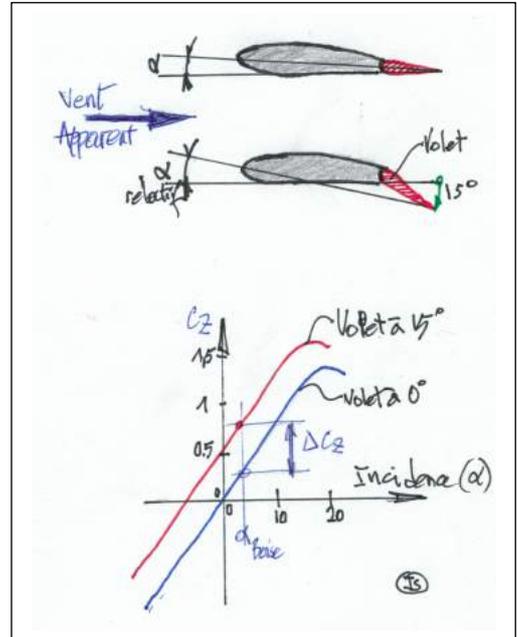
Equipement qui ne faut pas marginaliser. En effet les flaps permettent de réguler le C_z momentanément, d'autant plus que le « rake » des foils n'est pas modifiable en navigation.

L'objectif des flaps sera d'augmenter la portance, en particulier dans les phases de décollage ou de manœuvre comme un virage de bord, une rotation autour d'une bouée.

Toutefois si les flaps génèrent une augmentation de portance, ils créent également une augmentation de la traînée et la traînée est un élément négatif.

Il faut aussi noter, que l'augmentation de portance déplace le CP (Centre de Portance) vers l'arrière du profil et amplifie le moment de tangage.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%
Volets intrados sans recul		50°	67%



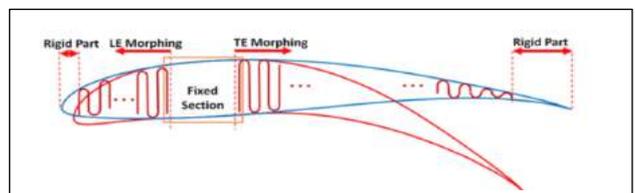
Aujourd'hui la technologie de contrôles et de déploiements des volets de bord de fuite est principalement basée sur de la cinématique extérieure (bielles, articulation, guidage mécanique).

Ces systèmes mécaniques sont efficaces, mais bien qu'ils soient carénés, profilés, ils produisent énormément de traînée, en d'autres mots, leurs rendements aérodynamiques (ce sont plutôt les avions qui les utilisent) sont relativement faibles.

Sur un Foiler et particulièrement sur l'AC 75, la performance demandée aux volets de bord de fuite sera beaucoup moins importante que celle nécessaire sur un avion dans la phase d'atterrissage.



Sur les Foilers, les hydrodynamiciens rechercheront une modification forcée beaucoup plus « soft » du flux de l'eau en utilisant des volets de bord de fuite moins extrêmes. Ces volets seront, certes, moins efficaces, mais leur action sera suffisante pour assurer une modulation de la portance, par exemple, lors de manœuvres de transition ou la vitesse de l'AC75 diminue de fait (passages de bouée, virages de bord) et aussi durant la phase de décollage.



Publié dans un papier de Jack Haskins et William Jackson (Université de Pittsburg) d'après un article de A. Leite paru dans le "Journal of Intelligent Material Systems & Structures".

Actuellement la cinématique classique, basée sur l'utilisation de système vis/écrou, de cames, de bielles génère de la traînée. Cette technique est de plus, assez complexe au niveau de la conception (elle ne doit pas trop apparaître lorsque les volets ne sont pas utilisés). Elle demeure aussi très complexe au niveau de la réalisation.

Aussi, beaucoup de concepteurs, se sont lancés dans la recherche de technique permettant de déformer l'aile en entier ou juste sur une portion, à l'exception de la poutre centrale nominale. Pour cela ils utilisent la propriété de la déformation élastique de la peau extérieure qu'ils arrivent à modifier en forçant la structure interne.

Ce type de conception utilise la peau ondulée pour les sections de morphing (transformation) et la tension d'un fil comme mécanisme de contrôle (comme un soufflet). Entre les sections de morphing se trouve une section centrale fixe, représentant 20% à 35% de la longueur de la corde. Le système de contrôle des sections de morphing permet d'opérer sur chacune des zones indépendamment.

Les panneaux de peau ondulée sont construits en stratifiés de fibres de carbone, pour assurer des formes complexes à l'épaisseur variable et aussi pour réduire le poids structurel.

Mais je doute que cette technique soit utilisée sur les AC75. En effet il faut pouvoir intégrer un vérin (actuator) dans le foil dans une zone où l'espace est très restreint, de plus le foil doit être en acier, puisqu'il contribue à la stabilité archimédienne.

L'examen des Foils de AMERICAN MAGIC, montre une **charnière linéaire** sur toute la longueur du Foil. Un système de câble unique push/pull à billes doit, à priori, courir à l'intérieur du bras pour arriver un levier de commande du volet.



La technologie du Plan Horizontal Réglable /PHR/ (empennage horizontal)

L'empennage arrière est obligatoirement symétrique, son but est de créer **un couple à piquer ou à cabrer de même valeur** pour un même angle d'incidence positif ou négatif. Toutefois son domaine de réglage angulaire en positif ou négatif peut être différent.

Sur l'AC 75, ce couple possède un bras de levier important, entre 10 et 12 mètres par rapport aux appuis des Foils, ce paramètre du couple compensera la faible surface de l'empennage. Comme le profil est symétrique, la performance hydrodynamique du PHR sera identique, au facteur d'échelle près, à celle d'un safran suspendu à grand allongement.

Le calage positif ou négatif de l'incidence obtenu par la rotation autour du foyer du PHR est souvent piloté par un fletner implanté sur son bord de fuite. Ce fletner provoque sa rotation la rotation du PHR.

Avec cette technologie, il suffit de piloter le volet fletner. Ce volet étant de très faible surface, peu de puissance est nécessaire pour assurer sa commande.

Mais cette technologie paraît peu appropriée à l'AC75, toujours pour des problèmes des volumes disponibles, mais avec une contrainte complémentaire qui est le passage des mécanismes depuis la coque (fixe) à la pelle de safran qui pivote autour d'un axe vertical.

Il ne reste alors que deux méthodes possibles :

- Un volet de bord de fuite implanté sur le bord de fuite du PHR. En pivotant (axe horizontal) le volet vers le bas ou vers le haut, on transforme l'empennage, qui a un profil symétrique (portance nulle), en un profil asymétrique, donc avec une portance orientée vers le haut (moment à piquer), ou vers le bas (moment à cabrer). C'est une technologie identique à celle utilisée sur les Foils.

- L'ensemble pelle de safran / PHR est solidaire. C'est la rotation de la mèche de safran autour d'un axe horizontal et perpendiculaire au plan de symétrie de l'AC75, qui assurera le changement d'incidence du PHR (5 à 6° doivent suffire).

La technologie est plus simple, elle se résume à une liaison sphérique de la mèche de safran au niveau du palier de coque et d'un vérin qui assure la rotation d'avant en arrière du palier supérieur, lui-même guidé longitudinalement.

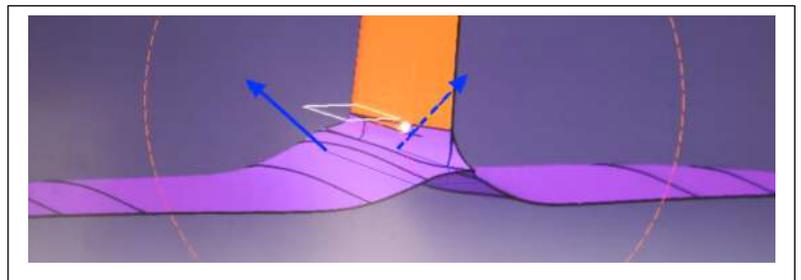
J'ajoute que le volume disponible à l'intérieur de la coque est largement suffisant pour installer le vérin hydraulique ou une vis à billes commandée par un moteur électrique (réglage plus fin).

Si on regarde bien la vidéo d'AMERICAN MAJIC, on constate que le haut du safran n'est pas très près de la coque, ce qui laisse penser que c'est la technique qu'ils ont utilisée.



On distingue aussi que leur PHR est solidaire de la pelle de safran.

La liaison en aile de mouette entre la pelle du safran et le PHR, n'est pas que décorative, elle génère deux composantes de portance inclinées qui doivent permettre de stabiliser la flèche (solicitation en flexion) de l'extrémité de la pelle de safran.



Les phénomènes de traînées.

C'est sûrement ce phénomène parasite (frein) que les concepteurs de chaque Team chercheront à minimiser.

Outre la traînée résultante de l'incidence du foil, il existe une traînée nommée « traînée induite ».

Cette traînée est générée par la rencontre des flux de fluide qui circulent sur l'extrados et l'intrados du Foil et se rejoignent à son extrémité pour former un vortex (le flux se transforme en une spirale entrelacée).

Sur un avion, on atténue ce phénomène avec un Winglet à l'extrémité de l'aile ou une extrémité de l'aile arrondie.

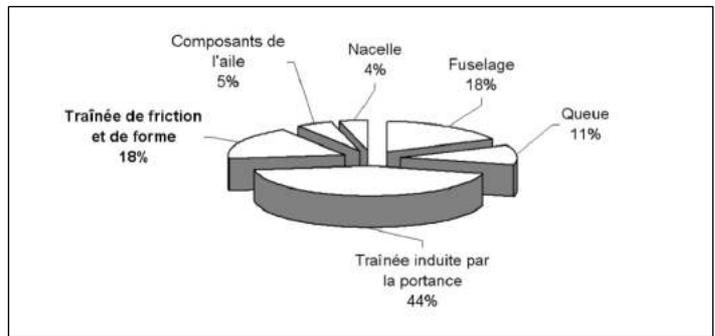
La traînée induite augmente lorsque la vitesse diminue et que l'angle d'incidence augmente. Toutefois un allongement important du Foil diminue le Vortex.

Mais la traînée induite ne concerne que le passage du Foil dans l'eau (masse volumique 1025 kg/m³), fluide incompressible.



Lorsque l'AC75 est en configuration « Vol », c'est l'ensemble du « flotteur », qui est hors de l'eau, il est donc en contact avec l'air (1,025 kg/m³) qui lui est compressible.

Cette évolution génère obligatoirement des traînées parasites, comme la traînée de frottement, de forme (friction), d'interférence entre les différents éléments (liaison des bras à la coque, liaison du mat avec le pont, gréement, équipage, etc).



Un Avion et un Foiler, n'évoluent pas à la même vitesse, ni dans le même fluide.

Le foiler sur déplace dans deux fluides

totallement différents et même si les équations physiques relatives à l'écoulement sont semblables, leurs comportements restent très différents.

Pour autant il est intéressant de regarder l'inventaire des traînées sur un avion, et de constater que la traînée issue de la portance des ailes représente à peine 50% de la traînée totale.

Le centrage des masses de l'AC75 (suivant les règles de classe)

Les règles de la classe AC75 sont très dirigistes, afin de limiter les velléités des architectes vers des figures « acrobatiques » lorsque les bateaux voleront.

En plus les initiateurs de cette Classe souhaitent lui donner un esprit monotype, ce qui n'est pas simple quand le bateau est aussi innovant que l'AC75.

Certes il y avait l'expérience de la précédente Coupe avec les AC72, mais c'était des catamarans, donc une configuration Foiler plus facile contrôler (pour l'écriture des règles, ne pas généraliser au pilotage) du fait de la largeur de la plateforme et surtout à cause des 3 points d'appuis sur l'eau.

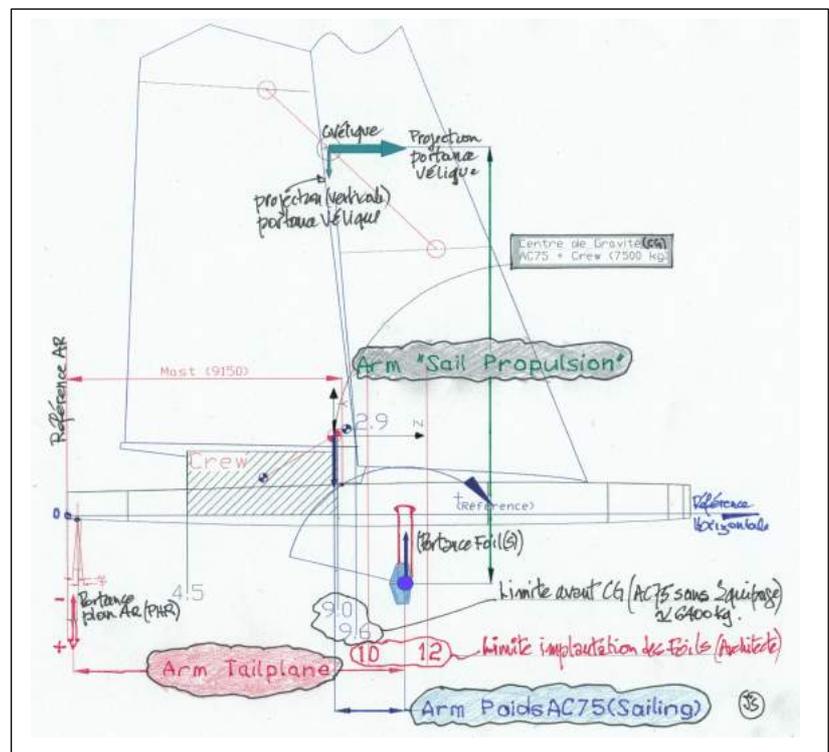
Avec l'AC75, le Foiler va se retrouver en appui sur un Foil qui portera 95% (voir 100%) du poids du bateau (y compris l'équipage) et dont le vol sera contrôlé avec un empennage arrière situé à 10 ou 12 mètres en arrière du Foil.

En plus le Foil est excentré par rapport à l'axe de la trajectoire.

Le « Guest racer » est installé entre 0 et 2m par rapport au tableau arrière.

Si le centrage est absolument limité vers l'avant, (la barrière vers l'avant devrait se situer aux alentours de 9.3m du tableau arrière), elle paraît libre vers l'arrière de l'AC75 pour l'équipage (jusqu'au domaine du « Guest racer »).

Le ratio des masses est : 6400 kg pour l'AC75 prêt à naviguer et 900 kg pour l'équipage (le barreur devant rester à son poste de barre).



Comme je pense que l'équipage sera particulièrement afféré et concentré sur le vol de l'AC75, et que les ballasts longitudinaux sont interdits, il n'y aura pas de velléité à utiliser l'équipage pour faire des transferts de masses longitudinaux.

De l'intérêt de modifier le centrage des masses en navigation ?

Ce n'est pas une idée maritime, mais une idée exploitée par les avions.



Pourtant le Foiler comme l'avion volent.

L'avion possède un avantage, hormis au décollage (et à l'atterrissage) il évolue dans un seul fluide, l'air (1.025 kg/m3).

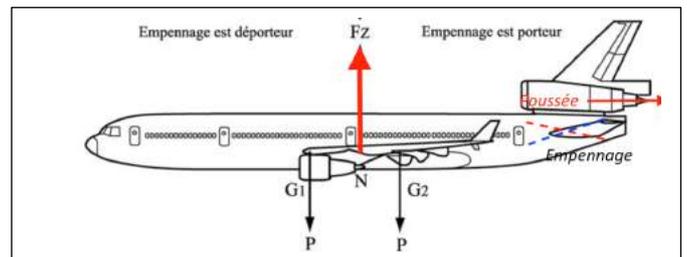
Pour le Foiler, sa sustentation est produite au contact de l'eau (1025 kg/m3), mais la « cabine », comme son moteur (mat, voiles) sont au contact de l'air. La poussée (parallèle à la trajectoire) des voiles est obtenue à partir de leur portance aérodynamique, portance qui est loin d'être parallèle à la trajectoire du Foiler.

C'est même pire, des deux composantes de cette portance aéro, c'est la composante transversale qui est prépondérante par rapport à la composante qui fournit le déplacement. J'ajoute que ce point d'application de cette portance aéro se situe à plus de 12 m de haut (pour l'AC75).

Mais revenons au vol de l'avion.

Les avions ballastent le carburant (pas les passagers), ils le consomment aussi.

Le ballastage permet de modifier la position de CG résultant de l'ensemble des masses.



Pour un Airbus A320 la masse au décollage est de 70 tonnes avec 22 tonnes de kérosène (valeurs

moyenne suivant les nombreux modèle d'A320). Donc, en jouant sur les nombreux différents réservoirs on arrive à positionner le CG en avant ou en arrière du foyer de la corde de référence de la voilure (MAC⁵: Mean Aerodynamic Chord), point N sur le dessin ci-dessus.

Lorsque G est en avant de N (position G1), l'avion est plus stable, mais moins maniable. C'est logique plus la trajectoire est stable, plus elle sera difficile à modifier avec les gouvernes, ce qui rend l'avion moins maniable. En fait, l'avion devient plus « lourd » à piloter.

Mais il consomme plus, **il lui faut donc plus de puissance**.

Lorsque G est en arrière de N (position G2), l'avion est moins stable, mais plus maniable. Il est plus facile de modifier sa trajectoire, l'avion devient de plus en plus maniable, mais aussi plus « volage ». L'avion consomme moins, donc pour des performances identiques, il utilise moins de puissance.

Pour le Foiler, le point N se situe sur le Foil, les règles de classe imposant un centrage arrière, les initiateurs des Règles de Classe privilégient à priori la maniabilité à la stabilité de vol.

Cela parait normal, contrairement à l'avion à qui on impose une trajectoire « rigide, ne laissant aucune liberté aux pilotes, sauf cas de force majeure », pour **l'AC75 on souhaite qu'il régates au contact**.

Vu la configuration de cet engin (l'AC75) avec des « grandes pattes latérales » il vaut mieux qu'il soit très évolutif, au détriment de sa stabilité de vol.



⁵ Pour un Foil trapézoïdal (A=Corde supérieure, B=Corde Inférieure, Y=Envergure)
 MAC (longueur de la corde) = $A - (2 * (A - B) * (0.5 * A + B) / (3 * (A + A + B)))$
 MAC position / corde sup = $Y * ((A - MAC) / (A - B))$

Les configurations de vol

DECOLLAGE

Au début je pensais que la phase de décollage devrait se faire sur les deux Foils.

J'en suis beaucoup moins convaincu aujourd'hui, pour la raison suivante : La transition, c'est-à-dire le passage d'un lift de 3750 daN sur chaque Foil à 7500 pour le Foil unique sera trop brutal et ne pourra pas être contrôlée. Cette transition suppose que le Foil sous le vent qui est calé (incidence) pour produire 3750 daN devra en quelques petites secondes être calé à une nouvelle incidence (sa trainée augmente) permettant de produire 7500 daN de Lift. Le risque d'effondrement sera trop important.

Le décollage sur un Foil paraît plus logique.

Au fur et à mesure que le bateau accélère en régime archimédien, le pilote remonte rapidement le Foil au vent.

Il faut noter que dans ma configuration « Foil au vent relevé » et « foil sous le vent en position navigation (immergé) » le centre de gravité du Foiler se trouve toujours pratiquement dans le plan de symétrie du Foiler, car la répartition transversale des masses a été très peu modifiée.

Le couple de chavirement est encaissé par le foil sous le vent.

En fait, dans cette phase archimédienne, le Foiler se comporte comme un dériveur ou le couple de chavirement est encaissé par l'équipier au trapèze, sur le Foiler c'est la portance sous le vent qui fait office d'équipier au trapèze.

Rapidement le Foil au vent sort de l'eau, le pilote augmente l'incidence (volet sur le bord de fuite), l'AC75 s'appuie sur le foil sous le vent, ce qui l'empêche de chavirer et progressivement il se sustente verticalement sur le lift de ce Foil, lift qui atteint les 7500 daN. L'augmentation d'incidence du Foil est obtenue par le volet de bord de fuite et aussi par le PHR qui est réglé au maximum de couple de cabrage, voir le schéma ci-dessous.



Archimédien

(Extraits de la vidéo « AMERICAN MAGIC »)



Début du décollage (cabrage)



Décollage (assiette à plat)

- ✓ **Archimédien :**
Foil immergé : volet du foil angulé au maximum (Portance maximale)
PHR : neutre
- ✓ **Début du décollage (cabrage) :**
Foil immergé : volet du foil angulé au maximum (Portance maximale)
PHR : Angulé en négatif (Portance vers le bas) afin de cabrer la plateforme.
Augmentation de fait de l'angle d'incidence du foil principal
- ✓ **Décollage (assiette à plat) :**
Foil immergé : L'angulation du volet du foil est réduite, l'angle d'incidence diminue
La vitesse augmente ce qui permet compenser de la réduction de l'angle d'incidence.
PHR : Angulé en position neutre
L'angle du volet alterne en positif ou négatif (portance vers haut ou bas).

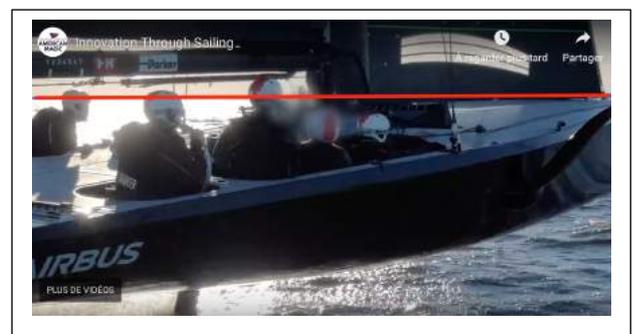
Le VOL STABILISÉ

En vol stabilisé l'équipage doit gérer :

- La force propulsive. Elle dépend directement de l'environnement maritime et de la route du bateau par rapport au vent. L'équipage peut adapter la voilure (Remplacer le Foc par le Gennaker).
Mais la vitesse de l'AC75 qui est importante en mode Foiler, rendra le vecteur Vent réel moins prépondérant dans la composition vectorielle du Vent apparent.
- La portance du foil sous le vent. Elle est régulée par le volet de bord de fuite, qui augmente la cambrure du profil du foil et de ce fait ajuste le C_z (voir haut de page 13).
Il est aussi possible d'augmenter l'angle d'incidence du foil (en évitant le décrochage) de 1.0° à 2.0° environ en cabrant la plateforme en modifiant l'incidence du PHR (ce qui immerge de quelques 10 à 30 centimètres le plan porteur arrière).
- La gîte de la plateforme (au pire le chavirage). A voir les mouvements de la plateforme sur la vidéo, c'est ce qui paraît le plus facile à gérer (Vidéo de AMERICAN MAGIC) parce que la gîte résulte d'une survente. Cette survente momentanée est encaissée par le réglage des voiles, sans faire perdre de vitesse au Foiler.



Assiette longitudinale (TRIM) « parfaite » (le trait rouge est calqué sur la ligne d'horizon)



Le TRIM devient subitement négatif (piquer).... Correction avec le PHR(?).... Le Foiler se cabre.

Toute la difficulté du vol sera d'éviter le mouvement de tangage que l'on voit très bien sur la vidéo d'AMERICAN MAGIC. Ce rapide mouvement de rotation provoquera des désordres aérodynamiques à 26 m de hauteur dans l'écoulement des filets d'air qui circulent autour de la grand-voile et du haut du foc.

La conservation de l'assiette horizontale de la plateforme est très complexe, d'autant plus que les Règles de Classe de l'AC75 interdisent l'utilisation de gyroscope ou de volant d'inertie.

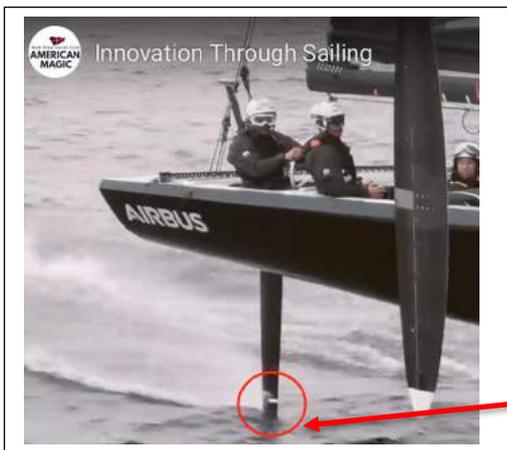
20.6 The use of flywheels or gyroscopes to store energy or mechanically stabilize the yacht is prohibited. Any rotating mass on the yacht shall be no larger than required for its permitted purpose.

Faute de stabilisation gyroscopique, c'est à la commande du PHR que reviendra de gérer cette assiette horizontale.

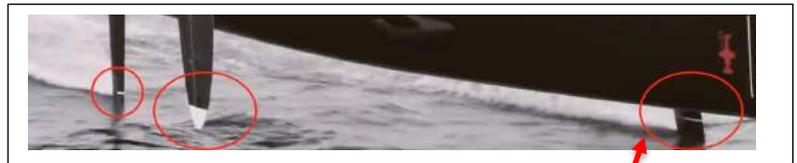
Le bras de levier du PHR (10 à 12m) offre plus de sensibilité dans la modulation du couple nécessaire pour corriger une insuffisance momentanée de portance au niveau du Foil, et cela de manière plus souple et précise qu'une commande qui augmenterait la cambrure du foil, pour augmenter ou diminuer sa portance.

De plus, l'immersion du safran offre un support idéal pour installer deux ou trois capteurs. Ces capteurs permettront d'évaluer l'enfoncement du PHR.

Le point milieu entre ces deux capteurs étant sur le plan horizontal qui passe par le Foyer du foil avant.



La marque supérieure est visible



On distingue aussi un des repères sur le bras immergé.



Les bras sont en position « Docking »



Un capteur sur l'extrémité du « foil relevé » indiquera une perte de stabilité au vent.

Le principe peut être très simple : par exemple pour le safran, un orifice de quelques mm sur le bord d'attaque, un tuyau qui remonte dans le safran et à 50/60 cm de l'orifice, un pressostat connecté actionne un contact électrique.

Si l'orifice est immergé, le pressostat délivre « 1 », si l'orifice est hors de l'eau, l'information est « 0 ».

Ces informations électriques sont collectées par un programme qui commande le « rake » du safran (Incidence positive ou négative du PHR) et qui peut aussi commander le cambrage du Foil immergé.

Le VOL en période de TRANSITION

Ce sera sûrement la partie du vol le plus complexe à contrôler, à cause de plusieurs paramètres perturbateurs :

- ✓ Le risque de proximité des deux bateaux (c'est la Coupe AMERICA), ce qui se traduit par une zone de vent perturbé dans les phases de contact.
- ✓ Le changement de cap lié au passage des bouées.
- ✓ Les manœuvres de l'équipage (adaptations des performances véliques au nouveau cap)
- ✓ Le ralentissement inéluctable puis la relance du bateau
- ✓ Le risque de devoir répondre de manière imprévue à une injonction de l'adversaire (Règle de Course)

Il faut garder à l'esprit que l'AC75, c'est quand même une masse de 7.5 tonnes, lancée à 25 /30 nœuds, (13 m/s), soit une énergie cinétique de :

$$E_c = 0.5 * 7500 * 13^2 = 633750 \text{ Joules.}$$

Les équipages devront apprendre à maîtriser ce bateau « volant ».

Figures de style du bateau d'entraînement du Team UK « INEOS » dans le SOLENT vers le 24/04/2019

<https://www.youtube.com/watch?v=NVQtQWx3rnM>



Chrono : (5 sec)

Tribord amure

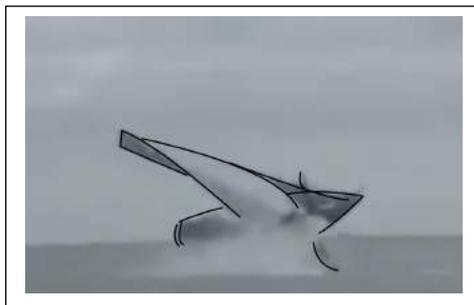
(7 sec)



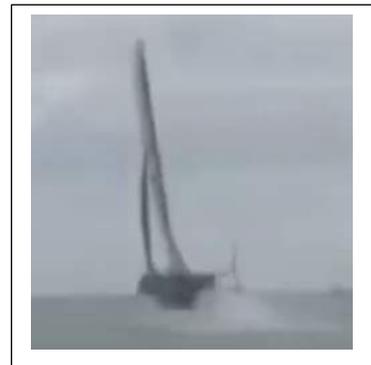
Le bateau passe le lit du vent...



Le bateau lofe..... Le pilote perd le contrôle, la rotation continue



Se cabre et vire de bord....



(6 sec)

(9s)



Pour se coucher sur tribord

Le « crash » est des plus spectaculaire, d'abord par le temps écoulé entre le début l'anomalie de trajectoire et le crash final : 4 à 5 secondes, ensuite par la trajectoire : 180° environ.

Il n'y a pas de chavirage, sauf à la fin ou ce n'est plus un bateau mais un « truc » qui semble tomber du ciel (chute libre).

Il n'y a pas de perte de portance du foil. Le foil porte « très » longtemps (2 secondes !!).

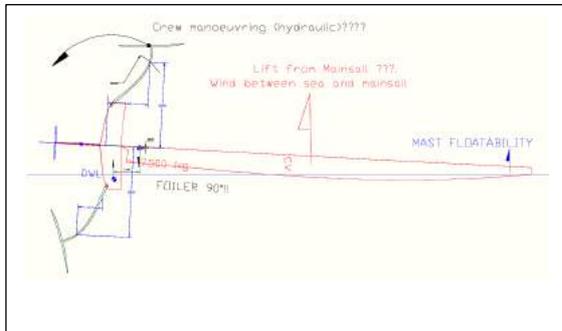
Il paraît évident que c'est le safran qui décroche, à ce moment, le bateau part violemment au lof et se cabre très rapidement.

A partir de là, avec un vent refusant et une vitesse de rotation très grande (120° en 2 ou 3 secondes), la portance de la coque étant tellement cabrée, qu'elle génère une portance très importante (surface et vitesse) qui augmente encore plus le cabrage.

Si on ajoute l'énergie développée dans cette rotation, on voit que le bateau se retrouve à décoller avec 15 à 20° d'incidence.

Ce n'est plus un Foiler mais un engin totalement incontrôlable qui est soulevé comme feuille de platane à l'automne.

Tout aussi rapidement, la tentative de « décollage » s'arrête, et c'est la chute libre.



Le foil tribord est toujours déployé vers le haut, Le safran n'est pas cassé, on voit très bien le PHR. Le dessin est extrait de mon article V4 (stabilité et chavirage)

Ne soyons pas pessimiste, tant qu'il n'y a pas d'accident humains, ce n'est jamais que « casser du bois » comme le disait les pionniers de l'aviation.

Ce crash met en évidence, que transposer ces deux « mules » (UK and AMERICAN MAGIC) en un AC75 de 7500 kg, posera quelques problèmes et périodes de mise au point.

AMERICAN MAGIC, chavire à son tour, d'une manière beaucoup soft et reste à 90°.

Contrairement à INEOS, la perte de contrôle est beaucoup moins violente, AMERICAN MAGIC se couche à 90° sur l'eau comme cela arrive sur un Laser.

Dans les mêmes conditions sur un dériveur, l'équipage enjamberait le livet instantanément afin de monter sur la dérive et remettrait le bateau vertical.

Avant le chavirage, la vitesse du bateau est de l'ordre de 25 à 30 nœuds, soit 12 à 15 m/s.

L'analyse de la vidéo, montre que le temps écoulé pour amener le mat dans l'eau est de 3 à 4 secondes.

Angulairement, la rotation du bateau (axe longitudinal) est de 20 à 25°/s.

Pendant la gîte jusqu'à 90°, le bateau continue sa route rectiligne (il ne lofe pas contrairement à INEOS), sur environ 40 mètres (en fait la vitesse initiale de 15m/s décroît rapidement).

Dès qu'il n'est plus porté par le foil sous le vent, la vitesse chute.

C'est certain qu'il y a une bonne décélération, mais c'est très différent de l'équipage d'ENEOS qui perd totalement le contrôle du bateau.

Dans le cas de AM, on a l'impression qu'il « perd » le foil sous vent !!! en fait c'est réellement le cas, non pas physiquement, mais à cause d'une chute brutale de la portance sur ce Foil crée par la cavitation autour de l'extrados et de l'intrados du profil.

La cavitation se produit lorsque l'eau qui circule autour du Foil passe de la phase liquide à la phase vapeur.

La vapeur ayant une densité 1000 fois inférieure à celle de l'eau la portance va se dégrader instantanément.

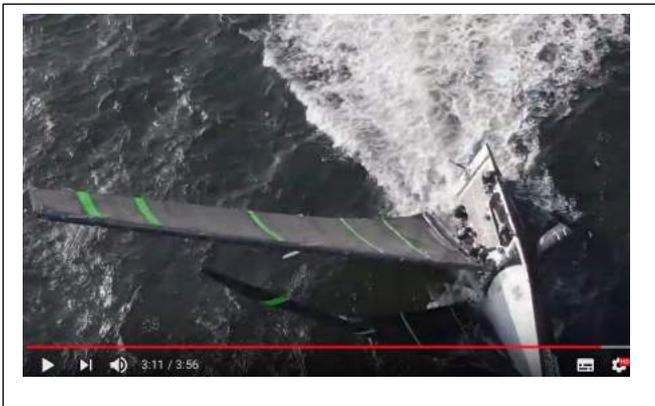
S'ajoute le phénomène de ventilation qui perturbe l'écoulement autour du profil du Foil.

La ventilation se traduit par un apport d'air (de dehors) sur la surface de l'extrados, apport d'air qui arrive par le long de l'élément de liaison (le bras).

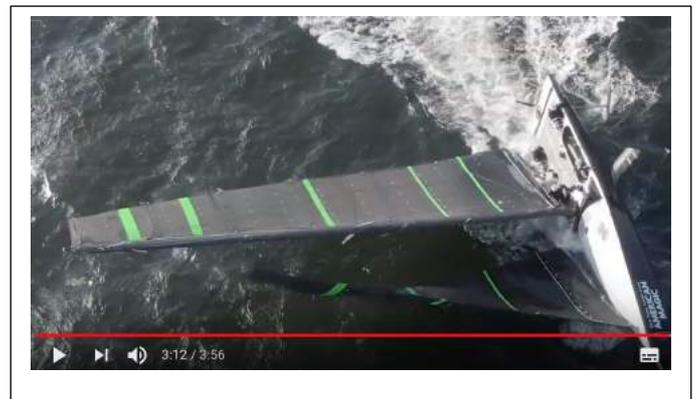
La conséquence de ces deux phénomènes parasites se traduit par un effondrement de la portance du Foil.

La gîte augmente, le bateau pique du nez.

Corolaire l'angle d'incidence passe du mauvais côté du foil, ce se traduit par une « déportance », même si elle plus faible du fait que le foil cavite (la force est dirigée vers le bas) !!!



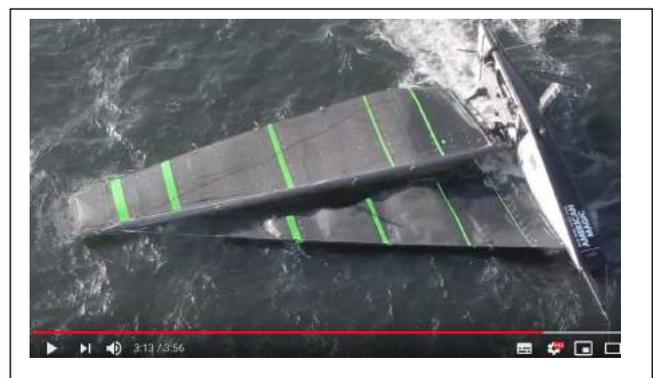
3 :11

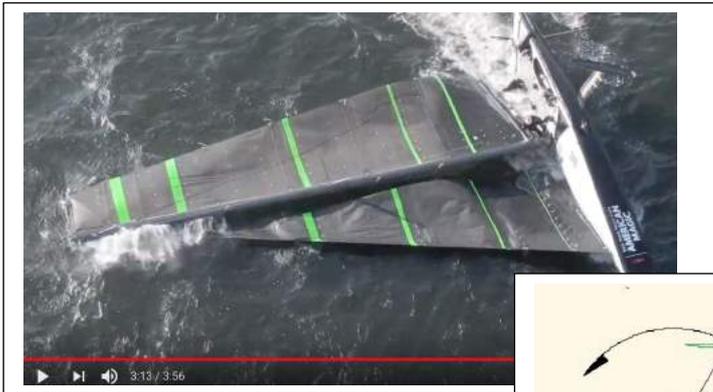


3 :12

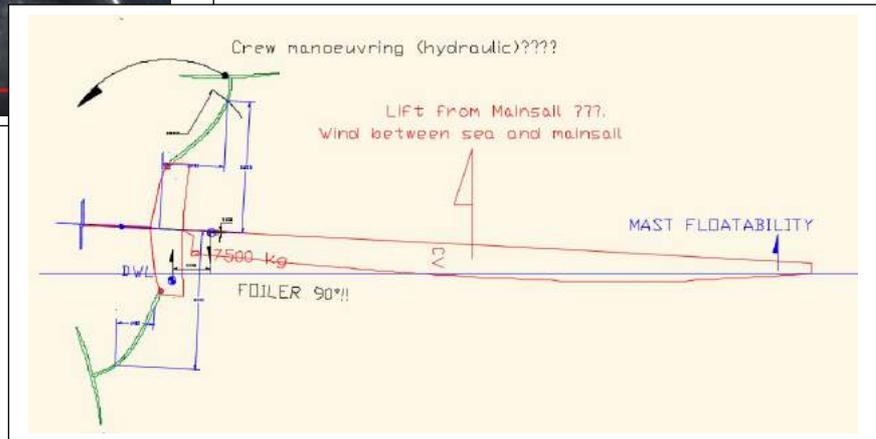


3 :12.....





3 :13



Ce problème de cavitation et de ventilation⁶ limite le potentiel de vitesse des Foilers équipés de profils de Foil standards.

Il existe des profils « super-cavitants », le problème est que ces profils ne « fonctionnent » que lorsque l'environnement du foil produit de la cavitation.

Pas simple de trouver une solution....

Pour terminer je livrerai la conclusion de Robert Lainé :

« Si le bateau prend un coup de contre gîte du a une molle, le foil va sortir de l'eau ou au moins s'approcher de la surface et la ventilation s'amorcer le long du bras. Si ensuite le bateau gîte car le vent reprend ou le batteur abat, le chemin pour l'air va se refermer à terme, mais entre-temps le foil va avoir perdu sa portance et là c'est la bataille entre la vitesse de rotation en roulis, l'angle d'incidence sur le foil qui va augmenter à cause de cette vitesse de rotation et potentiellement augmenter la dépression ou décrocher, et la poussée des voiles.

La bataille n'est pas gagnée d'avance par l'équipage, même s'il est « MAGIC » ... »

Si on ajoute, aux problèmes de fonctionnement des foils et de maintien de l'assiette de vol, l'essence même de l'esprit de l'AMERICA CUP, c'est-à-dire la navigation au contact (au sens de contrôle de l'adversaire), la mise au point de ce cocktail risque d'être compliquée, d'autant plus qu'il faut intégrer la vitesse, la masse de l'AC 75, l'énergie développée.

Restera ensuite à régler le problème de l'arbitrage ou la perception par les Arbitres des fautes commises par les concurrents risque de ne pas pouvoir suivre.

Les drones entreront ils en action lors de la prochaine AC ?

Jean SANS (12/05/2019)

⁶ Merci à mon ami Robert Lainé, « spacinover@gmail.com » (ancien de l'Agence Spatial Européenne « ESA ») de m'avoir éclairé sur ces problèmes de cavitation et ventilation. En association nous préparons une Version 6 « Les FOILS des AC75 : ENVIRONNEMENT, FONCTIONNEMENT, LIMITES »