



EXperts-Yachts

Jean SANS
Expert honoraire près la cour d'Appel de Rennes
 7 rue du Ltidv Bourely - 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



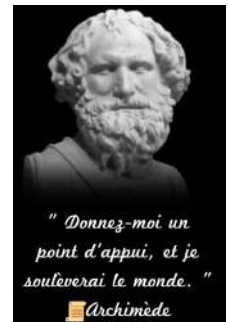
SPACINOV

Robert LAINE
 21 Rue de la Fontaine au Blanc
 17138 SAINT-XANDRE

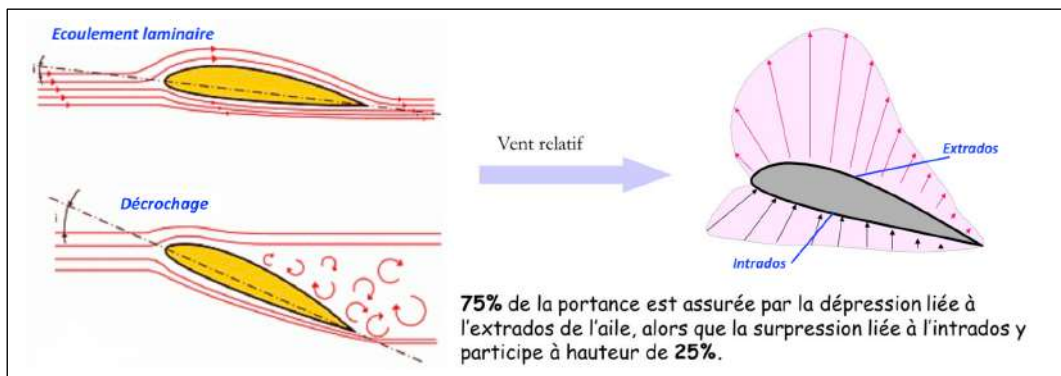
J. SANS / R. LAINE (27/05/2019)
Version V6 : Analyse des phénomènes de cavitation et ventilation.
 Suite des documents [V1](#), [V2](#), [V3](#), [V4](#), [V5](#)
www.experts-yachts.fr

Autant le fameux principe d'Archimède est la base de la stabilité des navires, autant la citation attribuée à cet homme illustre « donnez-moi un point d'appui et je soulèverais le monde » n'est pas vrai pour un Foiler (En fait Archimède n'a jamais dit ou écrit cela.

Plus simplement, la stabilité en vol d'un Foiler ne repose pas sur l'appui statique sur l'eau. Comme pour un avion le Foiler s'appuie dynamiquement sur le fluide qui entoure ses foils, la seule différence étant que l'avion évolue dans l'air (densité 1.225 kg/m³) alors que les foils évoluent dans l'eau (densité 1000 kg/m³).



Les bases de l'environnement d'un foil



Lorsque l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire un écoulement non perturbé ou les filets d'air ou d'eau sont déviés « en douceur », la distribution de la dépression (extrados) et celle de la pression (intrados) est distribuée pour 75% par l'extrados et pour 25% par l'intrados.

Le « travail » produit par l'extrados de l'aile ou du foil est prépondérant.

Lorsque l'angle d'incidence, c'est à dire l'angle que fait l'axe longitudinal du profile par rapport au vecteur vitesse dans le fluide, atteint 10 à 12°, les filets d'air ou d'eau qui évoluaient de manière harmonieuse autour du profil, se transforment en tourbillons désordonnés.

La dépression à l'extrados s'effondre instantanément (on dit que l'aile ou le foil décroche) et la portance globale chute de 75%.

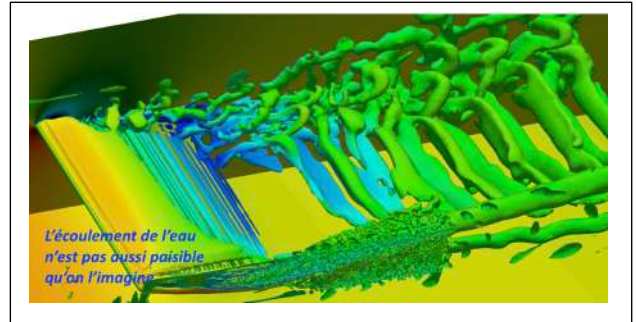
Pour un AC75 (masse 7500 kg) en vol sur un foil, la composante verticale portance générée par ce foil unique doit être égale à $7500 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 73575 \text{ Newtons}$.

Si cette portance chute de 75%, la portance verticale devient 18393 Newtons et tout s'écroule.

Les choses se compliquent sérieusement

Le foil évolue dans l'eau, milieu beaucoup moins homogène que l'air autour de l'aile de l'avion, simplement parce qu'il est près de la surface (interface eau / air).

Dans la couche des 5 premiers mètres, le fluide réel « eau » est « pollué » par des bulles d'air. Ces bulles d'air peuvent être provoquée par les mouvements des vagues, le passage d'un autre bateau, mais aussi par des éléments appartenant au Foiler. Par exemple le Foil avant perturbera le safran et son empennage horizontal. Tant que la vitesse du foil dans l'eau reste basse, ces petites bulles d'air sont sans importance. Mais lorsque la vitesse augmente, deux gros problèmes peuvent apparaître :



La cavitation et la ventilation.

La Cavitation

La cavitation n'est pas propre aux foils. Elle affecte aussi les hélices, safrans, turbines, en fait tout élément qui évolue à grande vitesse dans un fluide.

Pour les foils, la cavitation se traduira physiquement par une perte radicale de la portance générée par la surface en dépression.

Physiquement le phénomène de cavitation se déclenche lorsque la pression locale atteint le niveau de la pression de vapeur saturante P_v .

A ce moment-là, l'eau change brusquement de phase, elle passe de l'état liquide à l'état de vapeur.

La vapeur ayant une densité 55 fois plus faible que le liquide, une bulle se forme sur l'extrados, l'écoulement de l'eau est détaché de l'extrados ce qui entraîne la perte de portance du foil et érosion de sa surface.

Ce phénomène dépend essentiellement de la pression absolue au niveau du foil et de la température de l'eau.

La pression absolue est la somme de la **pression hydrostatique (hauteur de la colonne d'eau plus pression atmosphérique)** et de la pression/dépression causée par l'écoulement de l'eau sur le foil par exemple, ou sur une aspérité en n'importe quel point de la surface du foil.

Lorsqu'à la température de l'environnement, la **pression absolue** est inférieure à **la pression de vapeur saturante P_v** , l'eau passe alors en phase vapeur¹.

La valeur de la pression de vapeur saturante n'est pas une valeur universelle, elle varie notamment en fonction de la température.

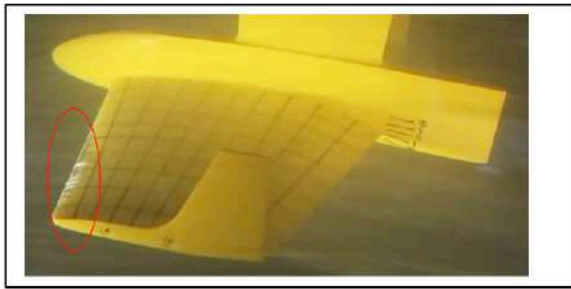
Température °C	Pression Vapeur (Pa)
20°	2300
22°	2800
25°	3200
28°	3800
100°	101300

¹

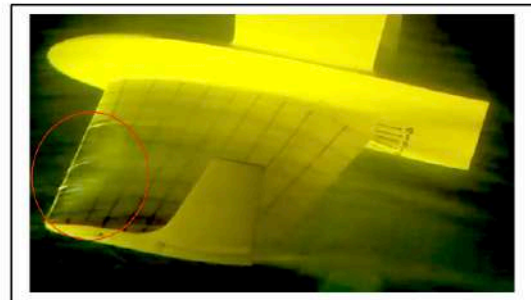
Un corps reste liquide si la pression exercée sur lui est suffisante. Si on remplit d'eau (par exemple) à moitié un récipient dans lequel on fait le vide, une partie du liquide s'évapore instantanément.

Mais toute l'eau ne s'évaporerait pas. L'évaporation s'arrêterait toute seule lorsque le point de vapeur saturante sera atteint. A ce point, la pression exercée sur le liquide par le liquide évaporé est trop forte pour que l'évaporation continue.

Le phénomène cavitation est identique au phénomène d'ébullition dans une casserole mais à température plus basse, la phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau.



Quelques poches de vapeur apparaissent



la surface des poches de vapeur augmente



La surface recouvre près de 40%, la dépression de l'extrados est pratiquement réduite à zéro

Photos extraites d'une expérience dans un tunnel, sur un foil équipé d'un Winglet.

La seule différence entre ébullition et cavitation se situe dans le « moteur » qui déclenche le phénomène.

Pour l'ébullition il s'agit de faire varier la température à pression constante et pour la cavitation il s'agit de faire varier la pression à température constante.

Pour un foil qui évolue dans une zone de régale où l'eau est à une température pratiquement constante, la cavitation se limitera à la variation de pression.

Quelques chiffres pour rendre plus tangible le risque de cavitation :

- Température 28°C : $P_v = 3800$ Pa (Pascal)
- Immersion : $h = 1$ m
- Densité de l'eau : $d = 1020$ kg/m³
- Pression atmosphérique $P_{atmo} = 101300$ Pa

Le foil est à 1 m sous la surface, la pression hydrostatique totale est :

$$P_{hydro} = P_{atmo} (101300 \text{ Pa}) + \text{pression colonne d'eau [(hauteur(m))*densité (kg / m3) *g] (10006 \text{ Pa})$$

$$P_{hydro} = 111306 \text{ Pa}$$

- Vitesse du Foiler : $V = 20$ m/s (38,87 nœuds)
- Coefficient de (dé)pression local maximum $C_p = -1$
- Pression dynamique max : $P_{dyn} = 1/2 * d * V^2 * C_p = -204000$ Pa
- Pression totale = $P_{hydro} + P_{dyn} = 111110 - 204000 = -92694$ Pa !

Dans ces conditions on a une pression locale largement inférieure à la pression de vapeur saturante à 28°C (3800 Pa, voir le tableau ci-dessus).

Conséquence, la cavitation est certaine !

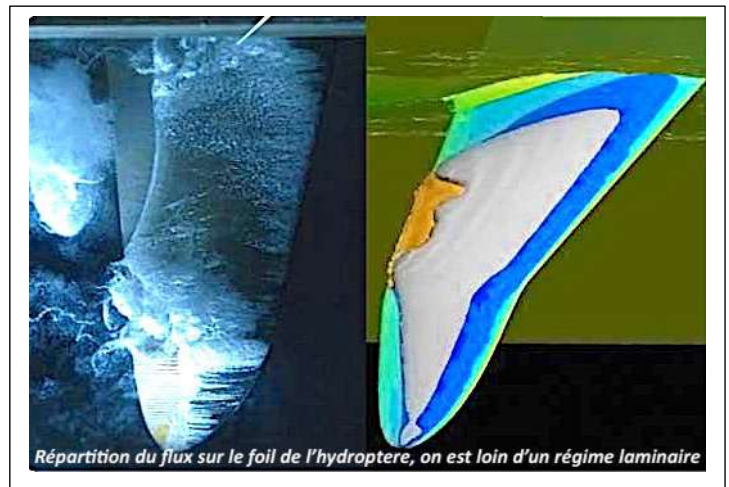
Réalisons le calcul inverse afin d'évaluer le coefficient de pression tolérable afin de ne pas avoir de phénomène de cavitation :

$$C_p = (P_{\text{hydro}} - P_v) / (1/2 * \rho * V^2) = 0,4875.$$

Pour réussir à faire fonctionner un foil classique à haute vitesse sans trop de risque de cavitation, il faut être capable de réduire l'incidence et surtout avoir un profil de foil adapté.

Si à la suite d'une fausse manœuvre de pilotage à grande vitesse, l'angle d'incidence est trop fort, même pour un court moment, la cavitation s'amorcera et la portance chutera brutalement, ce qui provoquera une composante à piquer du nez le bateau.

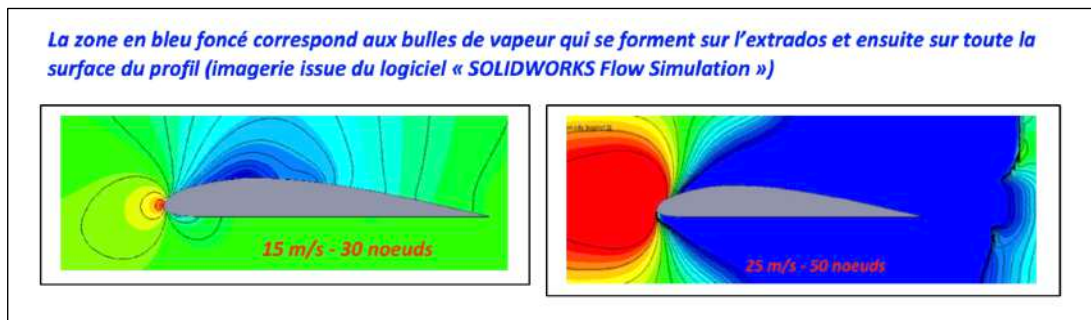
Voyant le nez du bateau piquer vers le bas, le réflexe naturel du pilote risque être une augmentation de l'incidence du foil dans le but de regagner de la portance.



Réflexe logique puisque le C_z croit théoriquement avec l'angle d'incidence. Mais ce n'est pas la bonne réaction, car cette augmentation de l'angle d'incidence augmente de fait la cavitation... et alors le bateau plonge carrément.

Conclusion : A moins de 30 nœuds, les conditions de création du phénomène de cavitation existent peu, toutefois il peut apparaître quelques points de cavitation l'extrados du foil au niveau du bord d'attaque car à ce point le C_p peut-être localement élevé.

Ce phénomène de cavitation se trouve corrélé avec l'accroissement de la vitesse du flux du fluide.



Au final, au-delà d'une certaine vitesse l'ensemble de l'extrados du foil évolue dans une bulle de vapeur d'eau.

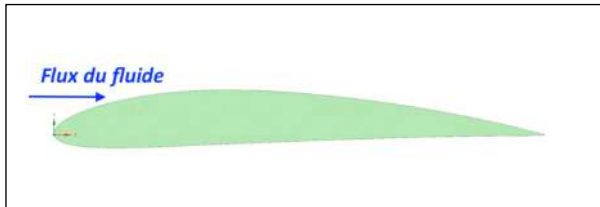
Pour les profils usuels (NACA ou équivalent subsonique), la vitesse limite située entre 40 et 45 nœuds. Dans certaines conditions de faible charge la vitesse de 50 nœuds pourra être atteinte.

Le Foil, (donc le Foiler) bute alors sur un « MUR » qui se traduira par :

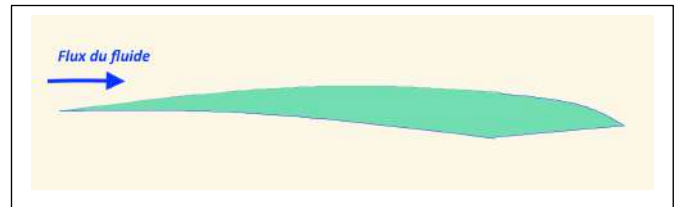
- Une chute de la portance
- Une érosion de la surface du foil (perte de matière)
- Des effets sonores pouvant atteindre 110 dB
- Un régime de vibration très élevé.

Pour aller au-delà de cette vitesse limite (donc franchir ce « MUR »), il faut utiliser des profils dit super-cavitants ou des profils tronqués au point d'épaisseur max et ayant une entrée d'air à la troncature (profils 'base ventilated').

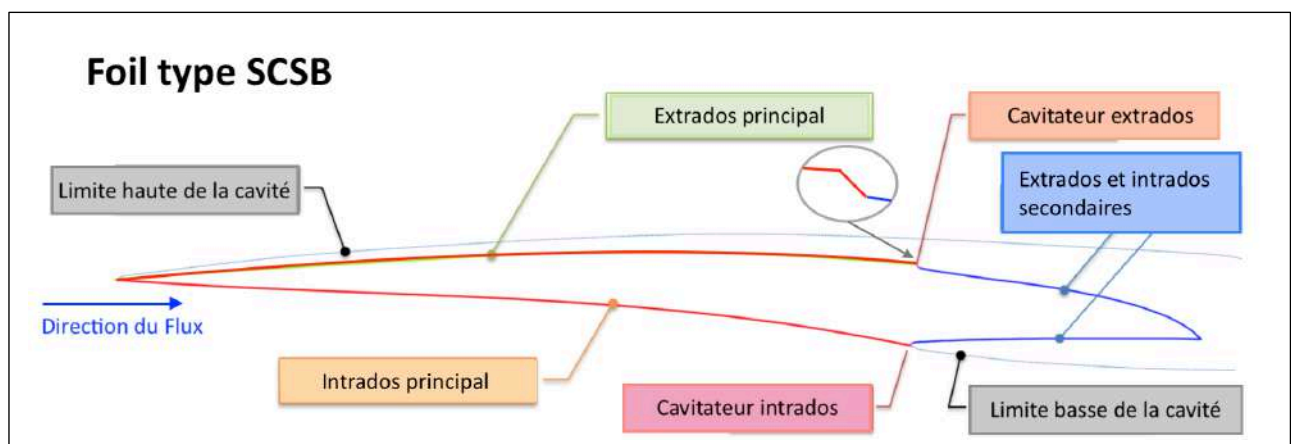
Les profils dits « super-cavitants » se distinguent fondamentalement des profils NACA traditionnel, par leurs formes très peu « conventionnelles » et surtout par leur mode de fonctionnement hydrodynamique.



Profil type « NACA »



Profil type SCSB



ANATOMIE DU NOUVEAU SC-HYDROFOIL²

Le croquis, ci-dessus, présente les principaux éléments géométriques de la nouvelle famille de « Foil / Hydrofoil SC », appelés SCSB.

La forme du profil est composée de six éléments topologiquement différents :

- a) Extrados principal ;
- b) Intrados principal ;
- c) Extrados secondaire arrière ;
- d) Intrados secondaire arrière ;
- e) « Cavitateur » extrados.
- f) « Cavitateur » intrados.

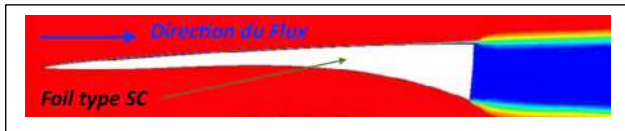
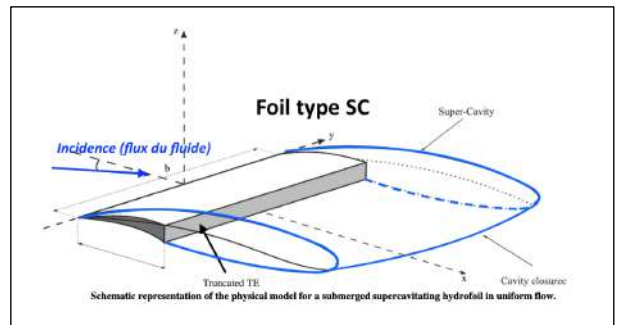
Le « Cavitateur » est une discontinuité de forme géométrique dont le but est de fixer le point de départ du phénomène de cavitation et limiter son instabilité et les vibrations associées.

Sur le plan fonctionnel, les Hydrofoils SCSB peuvent être considérés comme composés de deux éléments principaux :

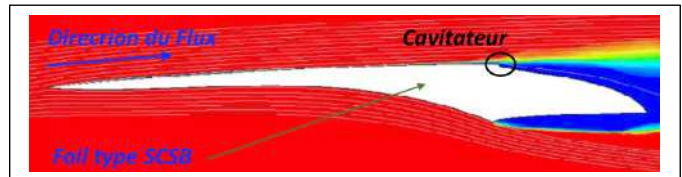
- Le **corps principal** défini par a) et b)
- La **queue pointue**, définie par c) et d).

² Fourth International Symposium on Marine, Austin, Texas, USA, June 2015
A New Family of Dual-Mode Super-Cavitating Hydrofoils (Stephano BRIZZOLARA)
Innovative Ship design lab, i-Ship, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology.

En mode de fonctionnement à grande vitesse, l'Hydrofoil SCSB se comporte comme un profil SC classique, la queue (cône arrière du profil) étant immergée à l'intérieur de la cavité (vapeur d'eau) qui prend naissance à la fin de l'extrados et au bord du cavitateur de l'extrados (f).

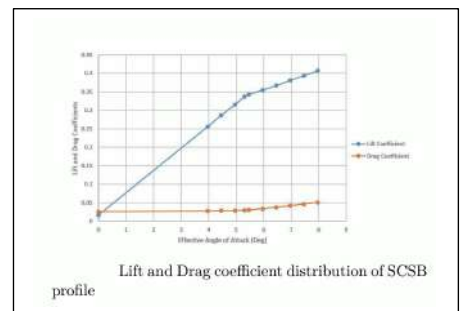


Le foil SC est une sorte de coin curviligne tronqué



Le foil SCSB ajoute au foil SC une partie courte conique « immergée » dans le flux de vapeur.

Extraits de la conclusion de cette communication : « Cette nouvelle famille d'hydrofoils (foils) est capable d'atteindre des efficacités optimales (100 nœuds !!) aussi bien dans les régimes de super-cavitation que dans les régimes de cavitation entièrement mouillés ou de cavitation de base, contrairement aux hydrofoils conventionnels de super-cavitation à bord de fuite profilé qui payent une grande quantité de traînée dans les régimes sans cavitation. »



La difficulté n'est pas de fabriquer ce type de foil, mais d'atteindre la vitesse ou ils sont opérationnels, car apparemment leur défaut principal serait un manque de portance à faible vitesse.

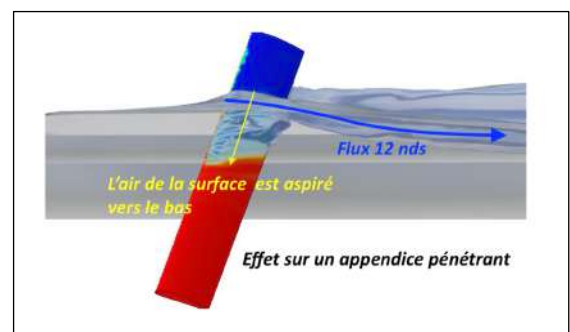
L'idéal serait de démarrer sur un profil conventionnel (NACA) et ensuite de passer sur **un profil super cavitant SCSB**... plus facile à dire qu'à réaliser...

La Ventilation

La ventilation est un phénomène très courant sur les appendices profilés **opérant à proximité** de l'interface liquide-air.

Le résultat de la ventilation est physiquement identique à celui de la cavitation, c'est-à-dire une perte d'efficacité pratiquement instantanée de la fonction de cet appendice.

Toutefois l'élément vitesse n'est primordial dans le déclenchement du phénomène de cavitation.



La ventilation frappera les appendices pénétrants dans l'eau comme les safrans, les bras support de Foils, mais aussi les Foils (comme d'ailleurs les hélices) lorsqu'ils sont totalement immergés.

Le risque de ventilation étant plus important pour les appendices pénétrants.

L'effet sur les appendices pénétrants (voir dessin ci-dessus)

L'appendice évolue comme un volume profilé en régime archimédien.

Souvent ce type d'appendice se trouve orienté par rapport au flux, ce qui se traduit par un angle d'incidence et un effet de portance. C'est le cas, par exemple d'un safran.

A partir de cette situation, à l'interface Eau / Air, la vitesse de déplacement et l'incidence génèrent sur l'extrados du profil un creusement de la vague liée au déplacement. Une aspiration de l'air situé à l'interface se crée alors.

L'extrados se retrouve alors localement dans un environnement gazeux, environnement évidemment beaucoup moins dense que l'environnement liquide.

Le problème est que cette aspiration vers le bas va s'amplifier naturellement et se propager très rapidement en suivant la génératrice de l'appendice jusqu'à recouvrir entièrement l'extrados et ainsi annihiler complètement son effet hydrodynamique (dépression).

Sur un safran, c'est ce que l'on nomme « décrochage », qui peut se produire lorsque le barreur souhaite contrer (angle d'incidence) une trajectoire non prévue.

Au final l'extrados de l'appendice, que sa forme soit rectiligne ou courbe, se comporte comme une sorte d'autoroute qui guide et diffuse le mélange gazeux sur toute la surface balayée en se dirigeant vers l'extrémité de l'appendice.

L'effet sur les appendices totalement immergés

Un appendice totalement immergé peut être soumis au phénomène de cavitation, mais son immersion le protège normalement de la ventilation.

En fait il existe une zone frontière peu définie où le risque de ventilation existe.

C'est le cas lorsque le Foil (comme d'ailleurs les pales d'hélice) se rapproche de l'interface Eau / Air (la « surface » du fluide) et cela sans même crever la surface.

C'est d'autant plus possible lorsque le Foil n'est pas horizontal, ce qui signifie qu'une de ses extrémités se trouve très proche de la surface.

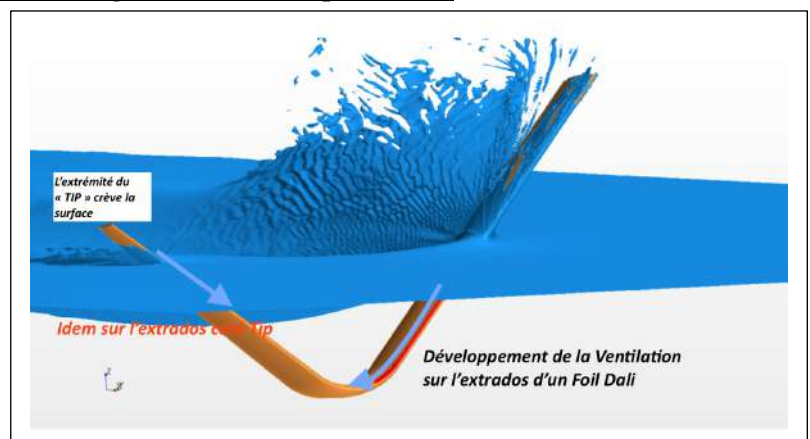
Cette situation spatiale peut aussi être provoqué par le passage dans le creux d'une vague.

Sans qu'il y ait de percement de la surface, le simple rapprochement de l'interface (l'expérience montre que la limite est sensiblement égale à la corde de l'appendice) provoquera le même effet que celui qui se produit sur un appendice pénétrant.

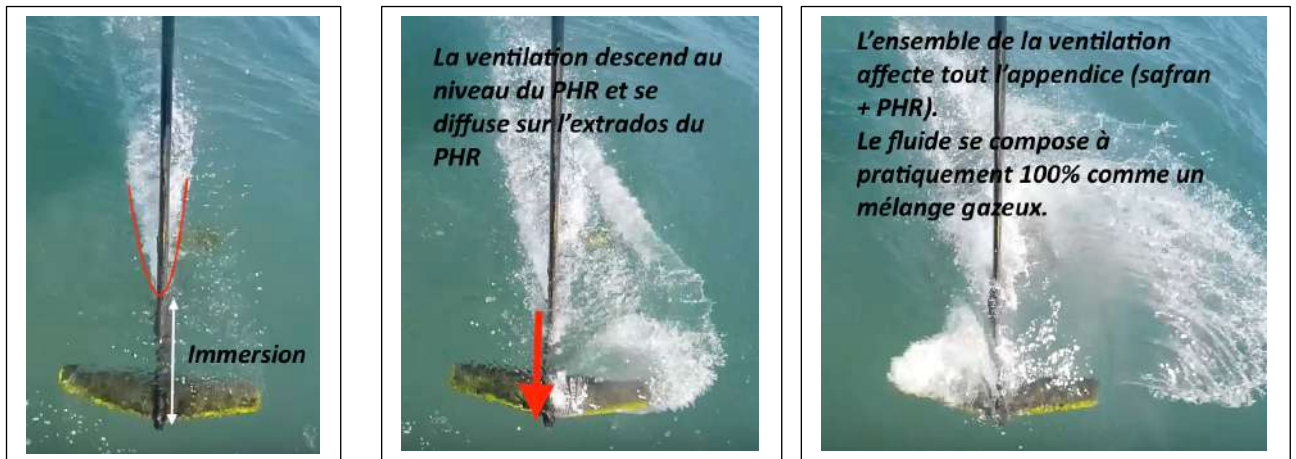
L'effet sur les appendices partiellement immergés et localement pénétrants

Dans le cas ci-contre, il y a deux zones de déclenchement possible de la ventilation, sans qu'il y ait, pour autant, un effet préalable de cavitation :

- L'endroit où le foil, depuis sa sortie de coque pénètre dans l'eau.
- L'endroit où l'extrémité du « Tip » peut dans certaines conditions crever la surface (diminution de la gîte du bateau ou creusement d'une vague).



Quand l'effet de ventilation qui affecte un appendice pénétrant se propage sur le Foil



La ventilation commence sur l'appendice pénétrant, le safran sur cette photo, mais c'est identique pour le bras du Foil de l'AC75. A ce stade on constate que le PHR (plan horizontal réglable) n'est pas affecté.

La ventilation se propage inexorablement vers le bas et glisse sur l'extrados du PHR et détruit la portance initiale générée par l'extrados du PHR.

Au final les deux appendices perdent instantanément leurs fonctions :

- Contrôle de la direction : appendice vertical (safran)
- Portance positive ou négative : PHR.

Les deux événements qui ont affecté « ENEOS » et « AMERICAN MAGIC » relèvent de ces deux phénomènes de cavitation et/ou ventilation.

ENEOS : « perte de portance » du safran et du PHR

AMERICAN MAJIC : « perte de portance » de l'extrados du Foil sous le vent.

La réalité physique pour ces assemblages de deux appendices (Safran/PHR et Bras/Foil)

Physiquement, le phénomène de ventilation se déclenche potentiellement lorsque la pression locale sur l'extrados de l'appendice devient inférieure à la pression de la colonne d'eau au-dessus.

Comme nous venons de le voir, lorsque la vitesse augmente, la surface libre de l'eau est « aspirée » par la dépression³ de l'extrados du bras, elle descend le long de l'extrados et lorsqu'elle rejoint la jonction de l'extrados du foil ou du PHR, elle se diffuse sur le Foil ou le PHR.

La portance du foil ou du PHR, qui est directement proportionnelle à la densité du fluide dans lequel ils évoluent, chute instantanément car l'air a une densité 900 fois plus faible que l'eau.

Pour reprendre de la portance le Foil ou le PHR doivent « plonger » plus profond pour se débarrasser de la bulle d'air qui s'est attachée sur l'extrados, ce qui n'est pas très facile à réaliser.

Quelques chiffres pour rendre plus tangible le risque de ventilation :

- Densité de l'eau : $d = 1020 \text{ kg/m}^3$ Immersion : $h = 1\text{m}$ (jonction bras/Foil)
- Pression colonne d'eau : $P_{\text{eau}} = g * d * h = 10006 \text{ Pa}$ (Pascal)
- Vitesse $V = 20 \text{ m/s}$ (38,87 nœuds) Coefficient de (dé)pression $C_p = -0.5$
- **Pression dynamique max : $P_{\text{dyn}} = 1/2 * d * V^2 * C_p = -102000 \text{ Pa}$**

³ La portance augmente avec le carré de la vitesse, donc la dépression créée par l'extrados augmente très vite.

Dans les conditions du calcul ci-dessus, $P_{\text{dyn}} = -102000 \text{ Pa}$, on constate que cette dépression est plus importante que celle de colonne d'eau.

Cette dépression est donc potentiellement capable d'aspirer la conne d'eau.

Dans la réalité cette réaction ne se produit pas obligatoirement.

Question : Pourquoi n'est pas le cas ?

En fait lorsque les lignes d'écoulement du fluide se trouvent éloignées de la surface du Foil ou du Bras, leurs rayons de courbure augmentent et la dépression associée est réduite d'autant.

En pratique on constate que la dépression sur l'extrados devient négligeable à une distance du profil de l'ordre de la corde du profil.

Au final, pour évaluer le risque de ventilation il faut :

- Connaître les caractéristiques dimensionnelles du Foil ou du Bras et comparer la valeur de la corde du profil à l'immersion du Foil.
- Prendre en compte le C_p moyenné sur toute la surface du foil.

En résumé, pour un foil ayant une corde de 0.3m, on admet qu'il se comporte normalement jusqu'à 0.3m de la surface, mais attention, s'il traverse une vague de plus de 15cm de creux, la condition d'immersion est rompue et la portance peut être gravement affectée...

Comme on vient de le voir, un bras porteur du foil qui traverse la surface et qui se connecte directement sur l'extrados du Foil, favorisera la circulation de la cavité gazeuse de l'extrados du bras sur l'extrados du Foil.

Par contre si le bras est fin et parfaitement aligné avec le vecteur vitesse (angle d'incidence $=0^\circ$), il ne posera aucun problème particulier.

A contrario, avec :

- Un bras profilé est conçu avec une épaisseur non négligeable (sûrement nécessaire pour obtenir la résistance mécanique).
- Une incidence de plusieurs degrés (le Foils est désaxé par rapport au plan de voilure et le bateau dérive toujours un peu), ce qui se traduit par un coefficient C_p important.

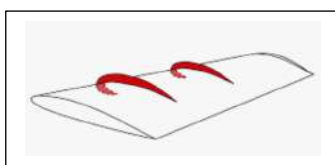
Alors son extrados générera un creusement local de la surface libre de l'eau, et créera un chemin pour l'aspiration de l'air vers l'extrados du foil qui travaille en forte dépression.

L'air remplace alors l'eau et corollaire, la portance du foil chute immédiatement.

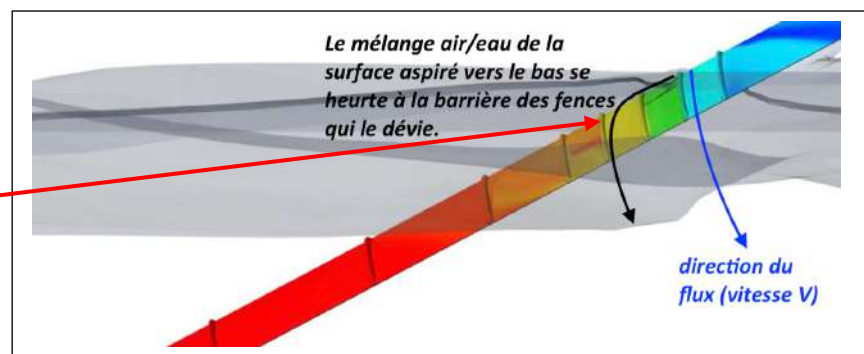
Quelles solutions ?

La solution la plus répandue consiste à empêcher que la cavité gazeuse (air et eau) qui se crée à la surface soit aspirée, et atteigne l'extrados du Foil ou du PHR.

Les aérodynamiciens puis les hydrodynamiciens ont résolu cette difficulté en installant des barrières perpendiculaires au profil afin de dévier le déplacement de la cavité. Ce sont les « **fences** » que l'on voit assez souvent sur les ailes des avions.



« Fences »
(Cloisons perpendiculaires à la surface du profil)

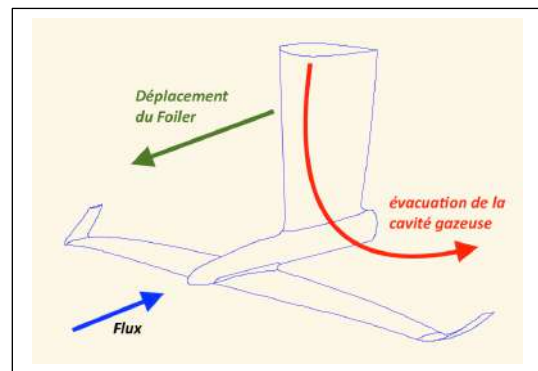


Certes cela ne résoud pas toutes les conditions d'immersions ou les présences de vagues subites, mais c'est une approche intéressante.

Pour beaucoup de Foiler, dont ceux qui ne possèdent pas de plan régulateur arrière (PHR), ce serait un réel élément de sécurité.

Une autre solution pour réduire ce risque consiste à installer le foil en avant du bras qui le porte, afin que la trajectoire de cavité gazeuse qui produit la ventilation ne se diffuse pas sur l'extrados du Foil ou du PHR et se disperse dans le sillage du safran ou du bras.

Mais cette conception augmente la complexité structurelle (conception et sollicitations mécaniques) de la pièce de raccordement entre le bras et le Foil ou le PHR.



Bilan

La conception archimédienne est un art dans les mains et le crayon des Architectes Navals.

Certes les outils informatiques ont permis d'améliorer, d'optimiser les dessins des carènes, comme d'ailleurs les nouveaux matériaux mais les évolutions, les gains de performances progressent lentement.

La régates sur un support archimédien est un **Sport Technique**, dans le sens où la création architecturale doit s'adapter à certaines contraintes imposées par les Box-Rules (la régates sans règle de jauge n'existe pas), ce qui impose d'associer le génie de la création à des solutions techniques plus ou moins complexes.

Par contre le Foiler, abandonne le domaine archimédien, puisque la carène devient presque optionnelle. Un Foiler, se décline principalement par sa stabilité de vol étroitement liée aux performances hydrodynamiques de ses Foils et de ses éléments de liaisons et aussi aux fonctions d'aide au pilotage.

Contrairement au voilier archimédien qui évolue dans 2 dimensions, l'équipage d'un Foiler doit gérer une évolution dans l'espace, c'est-à-dire dans 3 dimensions et avec de temps de réaction beaucoup plus courts.

La performance d'un Foiler dépend essentiellement du ratio **portance/trainée** des Foils.

Le fait d'obtenir la portance dans un fluide non homogène génère des phénomènes parasites décrits ci-dessus et qui compliquent encore plus l'équation.

La résistance mécanique du Foiler sera évidemment à considérer, mais c'est un problème plus classique.

Avec le Foiler, l'Architecte Naval laisse sa place à l'Ingénieur de la mécanique des fluides, l'Architecte interviendra encore sur le plan de voilure bien que l'encadrement dimensionnel et géométrique de la règle de classe AC75 soit très contraignant.

Au final le Foiler devient une recherche d'ingénierie, ce qui transforme la régates en **Sport mécanique**.

L'étape suivante sera de concevoir avec beaucoup de \$ ou d'€ un vrai simulateur de vol afin d'entraîner les équipages.

Jean SANS & Robert LAINE (27/05/2017)