

ÉLLIGIBILITÉ des FOILERS¹ en IRC (J. SANS 31/10/2020)

On sait depuis très longtemps qu'il est possible d'extraire de l'eau la coque d'un navire en utilisant des surfaces sustentatrices hydrodynamiques.

Les lois régissant ce mode de sustentation et l'équilibre sont celles de l'aérodynamisme, à la différence que le fluide « air » est remplacé par « l'eau ».

A la différence d'un avion qui vole intégralement, la sustentation d'un navire peut être partielle. Il devient donc nécessaire de bien sérier les limites de cette sustentation.

1- Environnement Archimédien vs Foiler.

1-1 Le régime Archimédien

La règle IRC, comme d'ailleurs toutes les règles de Jauge pour voilier est une règle « Archimédienne ».

En navigation, l'eau qui est devant le bateau passe derrière.

Elle est écartée, accélérée, passe sous le bateau, pour remonter et propulser le bateau vers l'avant.

En ressortant sous la voute du bateau ou contre le tableau arrière, l'eau forme une vague turbulente qui paraît accrochée à l'arrière du bateau.

La distance horizontale entre la crête de la vague à l'étrave et celle de sa sortie arrière correspond à la longueur à la flottaison dynamique (LFLOT).



Plus le bateau est lourd, donc profond, plus l'eau doit augmenter sa vitesse afin de « faire le tour »

de la carène. Il se forme alors un creux qui contraint le bateau à s'enfoncer. Au final le volume d'eau déplacée est supérieur au volume de la carène du bateau.

Les TCC sont basés sur cette vitesse limite des carènes qui est approximativement égale à :

$$V = 2,4 * LFLOT^{0.5} \text{ (LFLOT en m et V en nœuds).}$$

Mais la réalité est plus complexe.

La résistance à l'avancement R_x d'un navire (trainée), est la force qu'il faut exercer pour le déplacer d'un mouvement rectiligne uniforme à vitesse constante sur un plan d'eau parfaitement calme.

On montre que cette résistance R_x est principalement la somme de deux résistances :

- Une résistance visqueuse R_f
- Une résistance de vagues R_w

$$R_x = R_f + R_w$$

La résistance visqueuse dépend du frottement de l'eau sur la coque et peut se mettre sous la forme :

$$R_f = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Où ρ représente la masse volumique² de l'eau, C_x le coefficient de trainée qui dépend **des formes** plus ou moins hydrodynamiques du navire, de la **rugosité** de la coque, du **nombre de Reynolds**³, de la surface mouillée S et V la vitesse du navire.

La résistance de vagues est spécifique à l'interface eau/air qui produit les vagues d'étrave et de sillage (au niveau du tableau arrière) par déformation de la surface libre de l'eau. Le passage de la carène creuse le plan d'eau. Elle est de la forme : $R_w = 0.5 * C_w \rho S V^2$

¹ Voilier équipé de surfaces sustentatrices additionnelles.

² La masse volumique ρ de l'eau de mer est de l'ordre de 1020 kg/m³.

³ Le nombre de Reynolds lie la viscosité du fluide, la géométrie de son écoulement et sa vitesse.

C_w étant un coefficient sans dimension qui dépend du nombre de Froude⁴, les autres coefficients sont les mêmes que pour la résistance visqueuse.

Pendant plusieurs décennies d'utilisation de la règle du RORC, de l'IOR et de l'IRC, ces deux grands principes ont formé les fondations du calcul des TCC's.

Le planing va écorner quelque peu cette base scientifique.

En effet lorsque le bateau est en « survitesse », on parle de « planing », le bateau dépasse la vitesse limite de la carène.

Il le fait aussi, occasionnellement, lorsqu'il est en survitesse sur une vague.



1-2 Le Planing

- A l'arrêt, la poussée d'Archimède équilibre le poids du bateau.
- Lorsque le bateau navigue à faible vitesse, la poussée d'Archimède diminue car la force de portance (générée par la surface de la coque) apparaît.
- Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force de portance augmente et corollaire, la poussée d'Archimède diminue.
- A partir d'une certaine vitesse, qui diffère suivant les formes de carènes (BWL, Creux, Déplacement, etc....), le bateau se trouve dans une situation de planing pratiquement permanente. La force de portance peut représenter jusqu'à 60 à 70% de la poussée d'Archimède initiale. Le bateau ne « flotte plus », il se déplace alors à la surface de l'eau : il est au planing.

L'IRC calcule un coefficient d'aptitude à planer basé sur les paramètres archimédien de chaque bateau. Ce coefficient multiplie la vitesse de carène initiale et produit la vitesse de début du planing.

Mais la vitesse de carène ou la vitesse de planing, sont toujours propre au régime Archimédien.

1-3 Le régime Foiler

Dans cette configuration, le bateau n'est plus sustenté par la carène mais par des surfaces profilées qui évoluent dans l'eau et ainsi génèrent une portance **P** (et une trainée **T**) hydrodynamique de la forme :

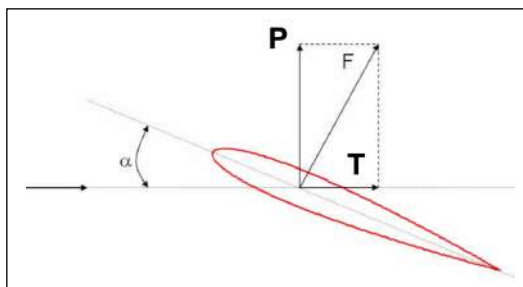
$$P = 0.5 * C_z \rho S V^2$$

$$T = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Exemple de caractérisation d'un profil :

C_z étant le coefficient de portance

C_x celui de trainée



Incidence	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°
C_z	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.33	0.34	0.32
C_x	0,006	0.006	0.0065	0.008	0.0105	0.012	0.014	0.016	0.02

⁴ William Froude, Ingénieur hydrodynamicien anglais (1810-1878).

Le Nombre de Froude est un nombre sans dimension égal au ratio Vitesse (m/s) sur Racine carré de L(m)*9.81.

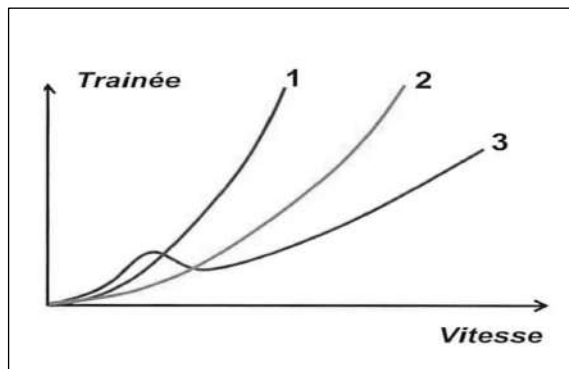
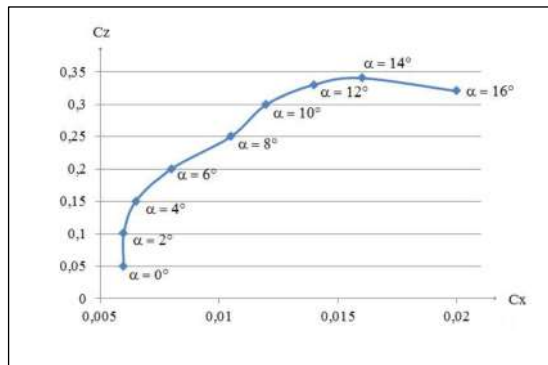
La représentation polaire ci-contre met en évidence l'interaction de la portance C_z et de la trainée C_x .

Afin de pouvoir « voler au-dessus de l'eau », c'est-à-dire extraire entièrement la carène du contact de l'eau, et de fait, supprimer à la fois la résistance visqueuse et celle des vagues qui s'exercent sur la carène, la somme des portances des surfaces sustentatrices (foils, etc...) doit être supérieure au poids du bateau (déplacement en kg * g).

Les 3 courbes ci-contre montrent l'évaluation des trainées, pour un monocoque (1), un multicoque (2) et un Foiler (3).

La petite cloche visible au début de la Courbe 3, correspond à la navigation en mode archimédien du Foiler, avant le décollage.

Il est évident que le ratio Trainée / Vitesse est nettement favorable au Foiler.



1-4 L'intégration du régime Foiler dans l'IRC

Les Foilers, à partir du moment où ils peuvent intégralement extraire la coque de l'eau, possèdent une caractéristique commune qui est leur vitesse critique de l'ordre de 40 nœuds. Cette vitesse critique est liée au phénomène de cavitation qui affecte les profils des appendices sustentateurs (Foils).

La sustentation intégrale dépend de la puissance disponible (surface de voilure) corrélée avec la surface active des appendices sustentateurs.

En d'autres mots, c'est un peu comme si un JPK ou un SUNFAST « FOILER » possédaient le même potentiel de vitesse que RAMBLER (en mode Foiler) dans la mesure où ces bateaux pourraient voler.

Conclusion : L'intégration des bateaux équipés de surfaces sustentatrices extérieures (Foils, etc..) dans la flotte IRC, impose que l'IRC limite l'effet sustentateur à un régime que nous pouvons nommer « super planing ». Notre objectif étant de rester dans le domaine d'application des algorithmes de la jauge IRC, c'est-à-dire l'environnement Archimédien.

En conséquence, **un monocoque qui posséderait la capacité de voler intégralement** ne peut pas être éligible en IRC.

1-5 Quelle limite de sustentation fixer ?

L'aptitude à s'extraire de l'eau dépend du **ratio LIFT / POIDS du BATEAU**.

Le LIFT étant la composante verticale produite par l'ensemble des surfaces sustentatrices (exprimée en Newtons) et le POIDS du BATEAU étant le produit de sa masse par l'accélération de la pesanteur (g).

Un ratio >1 le bateau vole.

Un ratio <1 , bateau ne vole pas.

Afin de conserver l'homogénéité de la flotte IRC, ce ratio est fixé à 0.3.

1-6 Application ?

Pour chaque bateau, le déplacement à vide est connu.

Par contre le LIFT doit être calculé.

Le LIFT est associé à une vitesse de référence, qui est celle à laquelle le bateau commence à planer. Le LIFT est lié au carré de la vitesse de planing, il est donc nécessaire de déterminer cette vitesse.

Choix de la vitesse qui produit le LIFT nécessaire :

- **Lorsque la vitesse est faible** (vent faible), le déplacement de la carène provoque peu de vague, en conséquence la résistance due aux vagues est réduite. C'est la **résistance visqueuse** qui est prépondérante, où l'intérêt d'avoir d'une faible surface mouillée et une carène propre.
Le nombre de Froude (Fn) est < 0,4.
- **Lorsque la vitesse augmente**, la **résistance de vague** augmente plus vite que la résistance visqueuse. La longueur d'onde maximale de la vague est celle de la longueur à la flottaison dynamique (LFLOT). Le bateau atteint alors sa vitesse limite archimédienne que l'on nomme « **vitesse critique de carène** ».
Le nombre de Froude (Fn) = 0,4.
La vitesse critique est : $Vc = Fn * (g * LFLOT)^{0.5}$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, LFLOT en m et $Fn = 0,4$.
 $Vc \text{ (m/s)} = 1,25 * (LFLOT)^{0.5}$ ou **$Vc = 2,44 * (LFLOT)^{0.5}$ pour obtenir Vc en Nœuds.**
- Un pic d'énergie permet au bateau de « monter sur sa vague d'étrave », et de partir au **planing**. La résistance de vague atteint son maximum juste avant que le planing se déclenche. Ensuite cette résistance diminue considérablement (ce qui explique que l'on peut réduire la puissance motrice d'une vedette lorsqu'elle commence à planer, et cela sans perdre de vitesse).

Par contre la **résistance visqueuse**, qui dépend du carré de la vitesse, augmente beaucoup. Cela démontre que **le bateau ne peut pas accélérer indéfiniment...à moins qu'il ne sorte de l'eau mais alors il faut qu'il soit sustenté autrement !**

Dans ce mode début du planing établi, le nombre de Froude (Fn) est de l'ordre de 0,65.

La vitesse critique est alors :

$V_{pla} = 3,96 * (LFLOT)^{0.5}$ pour obtenir V_{pla} en Nœuds.

Ou $V_{pla} = 2.04 * (LFLOT)^{0.5}$ pour obtenir V_{pla} en m/s.

Pour qu'un bateau équipé de Foils soit éligible en IRC, l'Architecte devra calculer la surface active des foils (en assiette Upright) à partir de cette vitesse et concevoir son bateau avec une surface active de foils (globale) inférieure ou égale à ce calcul.

Afin de permettre aux architectes de calculer cette surface active maximale, les paramètres utilisés seront :

- ✓ **LWP (Flottaison statique = LH-BO-SO)**
- ✓ **BW (déplacement à vide en Kg).**

Exemple :

LH = 16,5m

LWP = 14,74m

BW = 10033 kg

$V_{pla} = 3.96 * (14,74)^{0.5} = 15,20 \text{ nœuds (7,82 m/s)}$

LIFT autorisé = $BW * 0.3 = 3009 \text{ kg (3000 * 9.81 = 29527 N)}$

LIFT autorisé = $0.5 * 1025 * 0.3 * S_{maximale} * V_{pla}^2$

$S_{maximale} = 29527 / (0.5 * 1025 * 0.3 * 7,82^2) = 3.14 \text{ m}^2$

Soit $S_{active} \text{ (Foils)} = 3,14 \text{ m}^2$

La formulation littérale devient :

$$\text{LIFT (N)} = 0.5 * 1025 * 0.3 * S * (2.04 * (\text{LWP}^{0.5}))^2$$

$$\text{LIFT Max (N)} = 0.3 * \text{BW} * 9.81$$

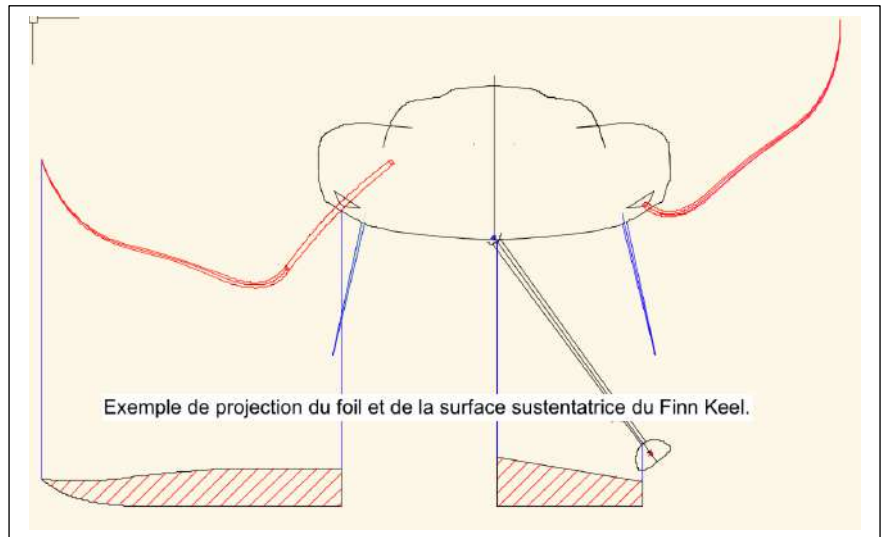
$$\text{Soit } S = (0.3 * 9.81 * \text{BW}) / (0.5 * 1025 * 0.3 * 4.16 \text{ LWP})$$

On en déduit la règle IRC définissant l'éligibilité des bateaux équipés de foil(s) et/ou de surfaces sustentatrices :

$$\text{S maximale} = 0.0046 * (\text{BW} / \text{LWP})$$

BW en Kg, LWP en m,

Pour les détails de calculs de la surface projetée réelle, il faut se référer aux modalités décrites dans l'Annexe F de la règle IRC relative aux Foils et surfaces sustentatrices.



JS / 31/10/2020