



## IMOCA : Voilier ARCHIMÉDIEN mais aussi FOILER

A l'origine (1989) les bateaux du Vendée Globe sont des voiliers archimédiens répondant à 4 prescriptions :

Longueur hors tout	: 18,28 m
Longueur du bout dehors	: 1,82 m
Tirant d'eau	: 4,50 m (limité par le Port Olonna)
Gîte sous l'effet des ballasts	: 10° (Il n'y avait pas encore en 1989 de quille pendulaire)

Depuis ces temps anciens, de l'eau est passé sous les carènes et après les épisodes chavirages dans le pacifique sud (quelques fois dramatiques), les ruptures de quille et bien d'autres problèmes, les règlements se sont sérieusement étoffés.

Globalement pendant toute cette période archimédienne, la sécurité de bateaux a été très améliorée, les vellétés à innover dans le domaine des voiles de quille, des mats ont été stoppées lorsque la Classe IMOCA a standardisé les mâts et les voiles de quille (entres autres réglementations).

Le désir de voler qui flotte dans l'air du temps depuis quelques années s'est propagé petit à petit chez les skippers.

Beaucoup de gens rêve de s'inspirer du MOTH, la difficulté étant alors de vaincre le facteur d'échelle.

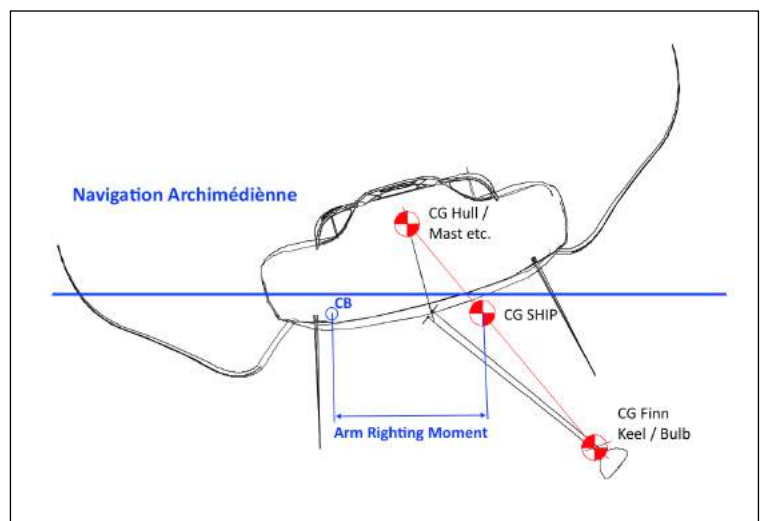
Vouloir voler, impose que l'on dispose des moyens qui assure le vol, sachant que la notion de vol ne se limite pas au décollage.

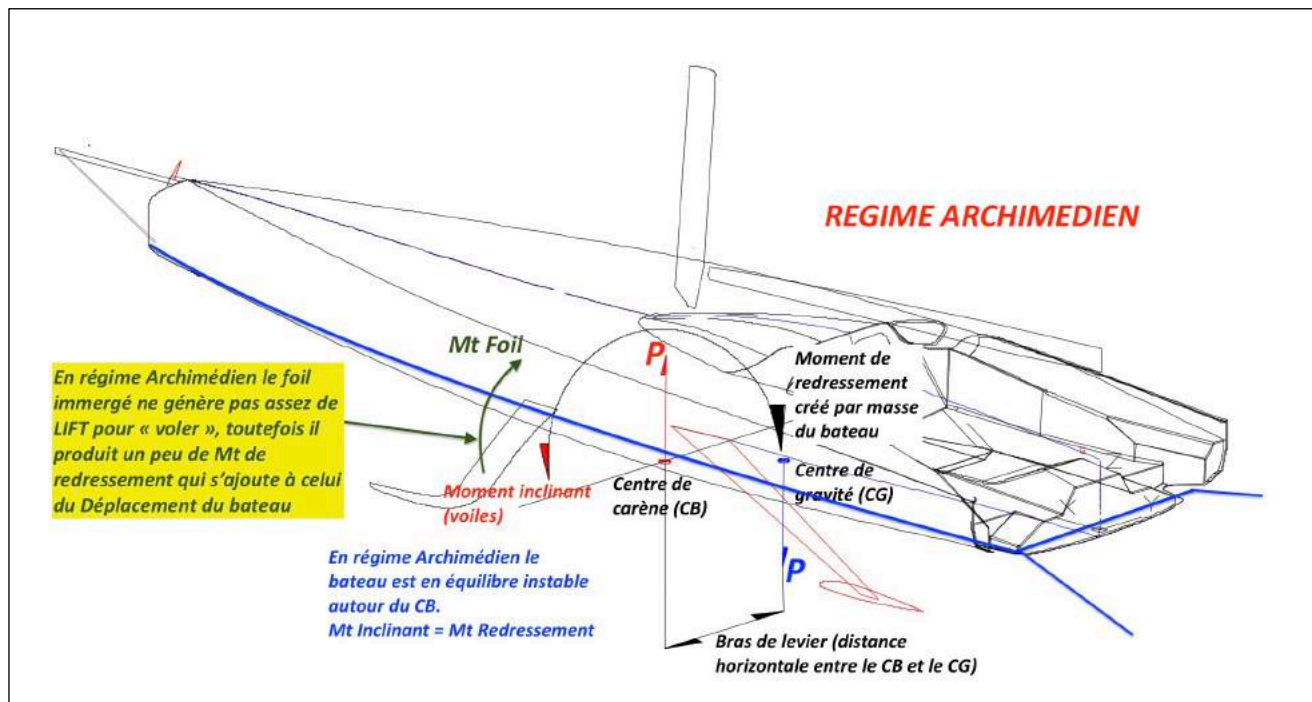
### Le régime Archimédien

Un IMOCA avant de penser voler doit respecter des critères de stabilité lorsque qu'il évolue dans le domaine archimédien avec un déplacement de l'ordre de 7600 kg.

Cela se traduit par les paramètres généraux suivants à respecter :

- Angle de chavirage quille dans l'axe (Avs) : 130° / 133°
- Angle de basculement latéral de la quille (Max 38°) : Avs mini 110 °
- Test d'auto-redressement à 180°
- RM Max (quille dans l'axe): 15.54 T.m
- RM 25° Max (quille angulée et ballasts pleins): 25.5 T.m





Comme on le voit la rotation de la quille au vent (jusqu'à 36°) décale au vent le centre de gravité général du bateau.

Le Foil sous le vent génère une force verticale, qui à cause de la vitesse n'est pas suffisante pour voler. Toutefois cette force crée un couple de redressement qui s'ajoute à celui produit par le poids du bateau.

### Le régime de transition

Pour être complet, la quille, lorsqu'elle est angulée, génère aussi du Lift.

Ce Lift provient du fait que l'Architecte donne de l'inclinaison longitudinale à l'axe de rotation. Ainsi, le profil symétrique du voile de quille, bien que moins performant qu'un profil asymétrique d'un foil, créera du Lift et paradoxe pour le régime archimédien, générera un couple de chavirage (!!!) puisque le voile de quille est au vent.

Le safran actif étant sensiblement vertical, ne produit par contre aucun Lift.

Au fur et à mesure que la vitesse augmente, les Lifts du Foil et du voile de quille augmentent (avec le carré de la vitesse) provoquant progressivement le décollage du bateau.

Le Foils comme le Voile de quille sortent donc progressivement de l'eau, leurs surfaces actives diminuent, mais cette baisse de surface est compensée par une augmentation de la vitesse.

### Le régime Foiler

Pour voler, il faut nécessairement dessiner et installer des surfaces (aérodynamiques) portantes qui produiront un LIFT vertical de l'ordre de 7600 daN.

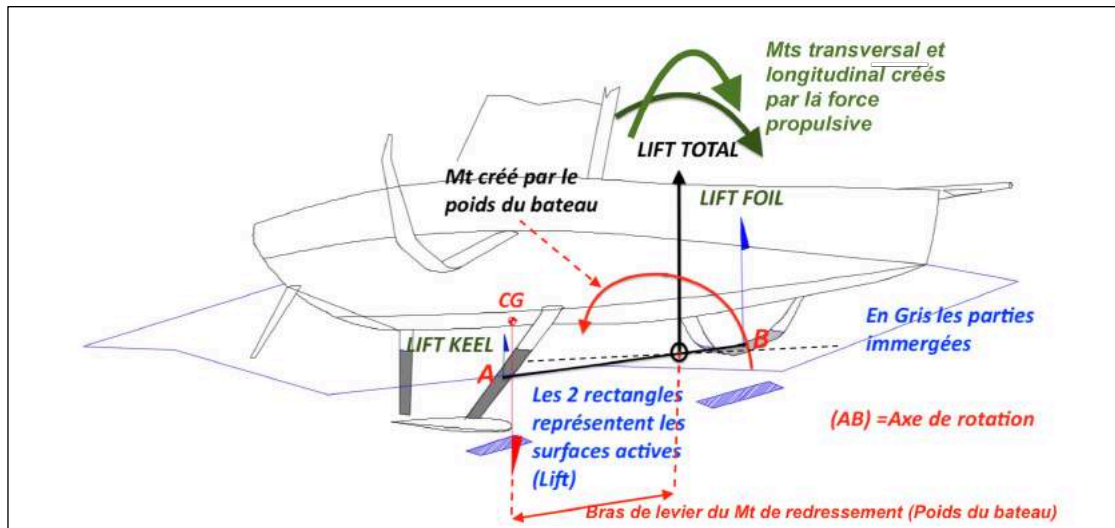
Mais dans cette position de vol, l'équilibre est très fragile.

Les critères archimédiens sont totalement abandonnés.



On peut dire que le bateau fait du ski nautique en étant propulsé par une force « horizontale » située à environ 12 mètres du niveau de l'eau. Cette configuration augmente la propension à l'instabilité à cause de couple (à piquer) généré par la propulsion : (Force Propulsive X distance du plan d'eau).

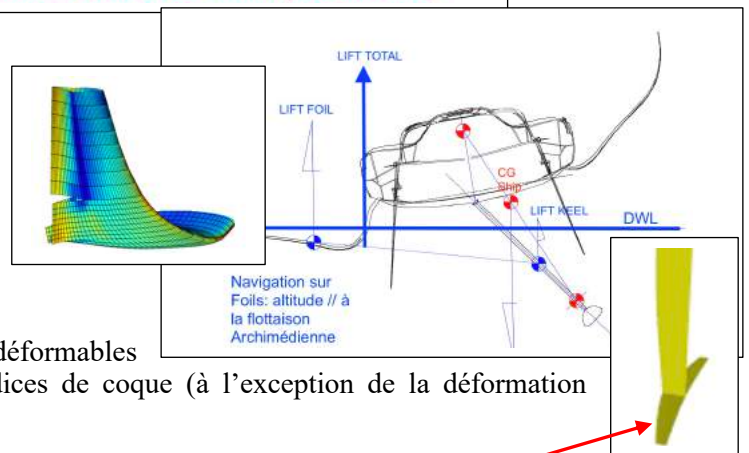
Pour se situer, un avion vole aussi, mais la force propulsive est très proche du plan alaire, ce qui diminue le couple qui est d'ailleurs généralement un couple à cabrer.



La règle de jauge de la Classe IMOCA limite le nombre d'appendices à 5 « Un appendice de coque doit être obligatoirement soit une Quille, un Safran, un Foil ». Les degrés de libertés autorisés sur ces appendices sont définis pour chaque appendice, soit un seul pour la Quille et pour le Safran et deux pour le Foil. (Le mouvement hélicoïdal est interdit).

A cela il faut ajouter que tous volets et surfaces déformables (Morphing Winglet) sont interdit pour les appendices de coque (à l'exception de la déformation plastique propre à chaque matériau).

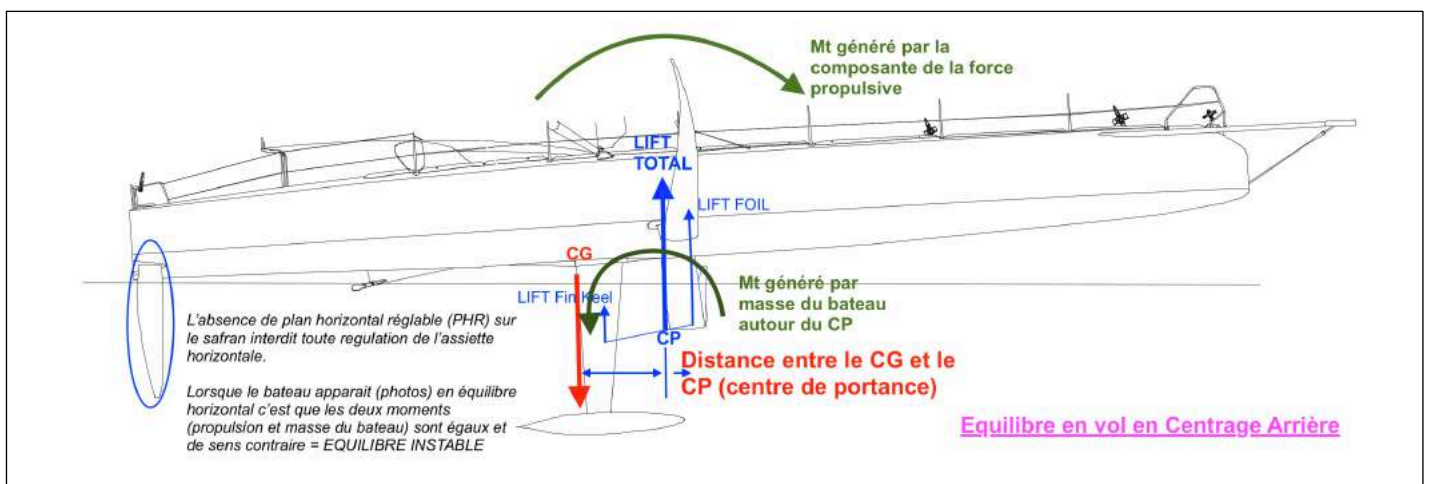
Cela interdit de fait un **plan horizontal de régulation** (PHR) sur chaque extrémité de safran.



Le respect de toutes ces contraintes se traduit par une assiette de vol très cabrée afin d'obtenir une surface d'appui sur « 3 points » :

- Le Foil sous le vent
- Le voile de quille au vent
- La coque au niveau du tableau AR sous le vent.

Ce qui impose un « centrage arrière » volontairement important, puisque qu'il est impossible de contrôler en navigation l'assiette longitudinale.



Le « centrage arrière » se traduit par la position du Centre de gravité du bateau en arrière du centre de portance des surfaces sustentatrices (Foil + Voile de quille).

Mécaniquement cela se traduit schématiquement par :

Moment créé par le poids du bateau autour du Centre de portance > Moment créé par « la voilure ».

L'absence de possibilité d'ajustage de la régulation de l'assiette de vol, introduit une incertitude sur l'équilibre en vol, comme le montre ces deux photos :



Le safran sous le vent est visible (tableau AR décollé).



Le cabrage est maximum (appui Foil/Quille + Tableau AR)

Le visionnage de la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=3WotTHU3wYk> montre que l'assiette de vol est assez aléatoire, ce sont les forces extérieures (véliques et sustentations) qui pilotent l'assiette de vol.

Il faut ajouter que le contrôle de l'incidence du Foil (Rake en anglais) ne gère pas l'assiette longitudinale de vol, le « Rake » permet uniquement de contrôler l'intensité du Lift.

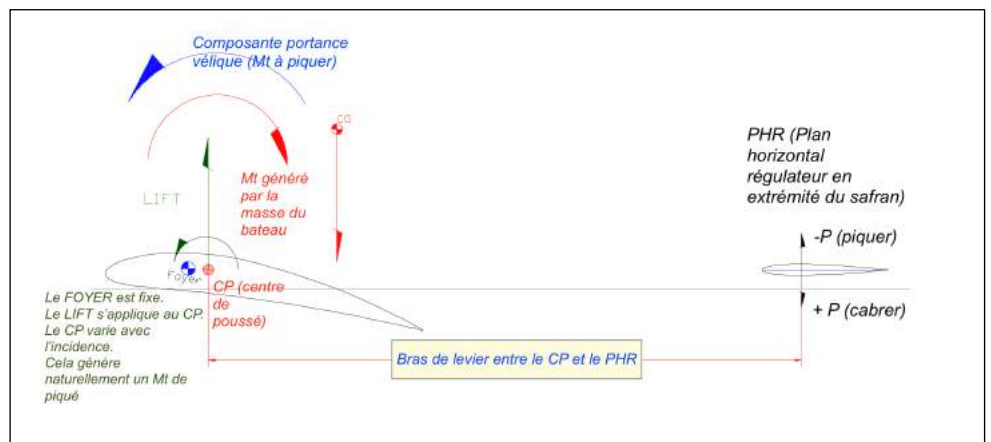
### Quelle évolution prévisible ?

Dans le principe il n'y a rien à inventer, la seule solution possible est d'autoriser le plan horizontal arrière (PHR) sur ces bateaux.

C'est une technique issue de l'aviation (depuis les premiers vols), qui a été reprise sur les Moth, les catamarans de l'AMERICA CUP et maintenant sur les AC75 (Monocoque).

Son principe est le suivant :

- Le point de rotation se situe sur le centre de portance des plans sustentateurs centraux (CP).
- La portance vélique crée un couple à Piquer.
- Le poids du bateau enfonce le bateau sur l'arrière



Le PHR implanté en extrémité de safran (profil symétrique) pivote sur son axe longitudinal (axe perpendiculaire à l'axe de rotation du safran) et génère une portance positive ou négative qui assure une assiette horizontale au bateau.

Comme le PHR est éloigné du Centre de Portance (CP), le bras de levier est important, ce qui permet de voler avec un PHR ayant une surface relativement faible et d'obtenir une régulation douce.

Le contrôle de l'assiette de vol est donc réalisé en ajustant en permanence le calage du PHR. Le contrôle de l'incidence (Rake) assure le Lift en fonction des variations de vitesses du bateau, qui dépendent de la pression du vent, qui contrairement à un réacteur d'avion n'est pas constante.

## De l'intégration des Foils et du contrôle de la stabilité en vol.

La vitesse dans l'absolu n'est pas l'objectif principal des compétiteurs et cela quel que soit la discipline. En fait c'est la vitesse relative par rapport aux autres concurrents et la capacité évolutive qui y est liée qui importe.

On peut traduire ce gain comme un « *petit plus* » par rapport aux autres concurrents.

Tous les sports mécaniques sont encadrés par des règles techniques très strictes. Les équipes d'ingénieurs des différents teams, connaissent la forme générale d'une évolution technique.

Dans le cas des foils, des centaines de milliers de pages résumant des essais, des calculs, des compte-rendu d'essais ont été publiés et sont disponibles.

Les grandes lignes de l'équilibre en vol sont aussi connues.

**Il est donc très difficile de trouver l'adéquation entre ce qui serait optimum pour intégrer ces nouveaux équipements (les Foils) et ce que le règlement autorise de développer.**

**Le respect des prescriptions impose quelque fois de dégrader la technicité du système.**

**C'est par exemple le cas pour le IMOCA ou le nombre d'appendices étant limité, l'implantation d'un PHR n'est pas possible.**

Pour autant, il est évident que les Teams ne vont pas abandonner l'idée technique (implantation et utilisation des Foils), cela va les conduire à rechercher des adaptations ou faire des impasses et naviguer ainsi.

Les périodes de vitesses extrêmes sont visibles sur les vidéos disponibles, mais ce sont des instantanés au regard de ce que l'on attend de ces bateaux, naviguer autour du monde pendant une longue période en étant à la merci de conditions météorologiques difficiles.

J'ajoute qu'il n'y a qu'un seul marin à bord et qu'il confie le pilotage à 90% au pilote automatique.

Malgré toute la technicité du pilote automatique, cet équipement sera handicapé par l'impossibilité de réguler l'horizontalité du vol.

Si on met en équation, **l'homme** (il doit pouvoir dormir), **le potentiel des foils**, **les conditions de navigation** (vent et état de la mer), **les performances du pilote automatique**, **le passage du régime Foiler au régime Archimédien** (et vice-versa), on obtient très vite une équation impossible à résoudre.

### Quels risques sans PHR ?

Le risque, s'il n'y a pas de PHR, se situe dans l'impossibilité de réaliser un vol horizontal, puisque que le skipper ne dispose pas de moyens techniques lui permettant de réguler l'altitude du vol.



*Avec les foils ancienne génération au dernier VENDEE GLOBE*

L'action à piquer peut résulter d'une perte de Lift, mais elle sera d'autant plus forte qu'un cabrage préalable et les forces d'inertie qui en résultent amplifieront l'action à piquer.

Comme dans tous les sports mécaniques, la tendance est toujours d'ajouter, de concevoir « plus grand », ainsi entre deux VENDEE GLOBE (4 ans) la surface des Foils augmente.

*Pourquoi ?* Simplement afin de posséder un « petit plus supplémentaire » par rapport à la « concurrence ».

Il est évident que lorsque la surface du foil augmente, le bateau décolle plus vite, donc se cabre encore plus, mais avec l'absence de PHR, l'action à cabrer, dès que l'équilibre est rompu, se termine par un piqué plus violent.

Une surface de Foil plus importante signifie que lorsque le vent monte, le « moteur » devient plus puissant, même à la limite surpuissant, de là à favoriser les « sorties de route ».

Il faut aussi ajouter un paramètre important, lors des actions violentes de cabrage, non contrôlées, l'angle d'incidence du foil augmente avec le risque de décrochage (perte instantanée du Lift), à moins de compenser en temps réel le « Rake » (incidence).

Cette action est techniquement possible. Elle est « simple » et peu gourmande en énergie si on agit sur un volet de bord de fuite, comme sur les AC75 de la COUPE. Elle est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre si on agit directement sur la rotation du Foil.

Pour les IMOCA, l'ajout d'un volet sur le bord de fuite afin de modifier la cambrure du profil du Foil est assimilé à un appendice supplémentaire, donc interdite.

A l'opposée, celles résultantes d'un piqué violent peuvent générer une incidences « négative » qui inverse le LIFT (de bas en haut, il devient de haut en bas !), et fait plonger le bateau.

Dans ce cas de figure, le bateau sera bloqué quasiment instantanément (quelque secondes), et toute l'énergie emmagasinée se transformera en couple de chavirement totalement incontrôlable.

Les actions collatérales sont une perte de contrôle du safran (ventilation) et un pivotement du bateau sur lui-même.

On peut même ajouter que si le bateau étant stoppé sur sa trajectoire, le vent apparent adonne instantanément sur des voiles bordées, ce qui amplifie encore plus le couple de chavirage.

Ainsi le domaine du vol sur un Foiler, qui n'est déjà pas simple à gérer lorsqu'il est contrôlé, à cause des paramètres vent et mer, devient quelque peu hasardeux lorsqu'aucun moyen de pilotage efficace et précis existe.

Mais le PHR seul ne résout pas tout le problème, son contrôle doit être actif en permanence (dès que les foils sont opérationnels), ce qui signifie qu'il faut un pilote automatique qui gère en 3 dimensions soit :

- La route à suivre avec le Safran
- L'assiette du bateau (Trim longitudinal) avec le PHR
- Le Lift avec l'incidence du Foil (le lift de la quille est quasiment incontrôlable)

### **De l'adaptation des règlements aux innovations technologiques**

C'est le problème le plus complexe à résoudre.

Il faut se souvenir qu'à l'origine, le VENDEE GLOBE est une Course Offshore ou la route des bateaux est libre, la définition du parcours se limitant à laisser l'Antarctique à tribord et que les bateaux autorisés sont de monocoque OPEN, régit par une règle très libre, sans les contraintes d'une règle de jauge.

Les évolutions des bateaux montreront que l'idée d'une route libre sur ces océans (hémisphère sud en été), comme celle d'une règle OPEN sont des utopies.

Aujourd'hui c'est le Directeur de Course qui définit pratiquement la route à suivre dans l'Océan Indien et le Pacifique.

Au fil des années, la règle s'est enrichie de prescriptions techniques visant à conserver à la flotte une certaine homogénéité et aussi à limiter les accidents.

Mais avec trop de prescriptions, on se retrouve avec des bateaux strictement monotypes, ce qui n'est pas dans l'imaginaire du VENDEE GLOBE.

L'autre difficulté se situe dans le contrôle des évolutions techniques. Tant qu'une évolution permet d'améliorer la vitesse de 0.5 ou même 1.5 nœuds par moment, elle est assimilable et acceptée. En plus l'amplitude de ce gain n'altère pas la fiabilité ou la sécurité des bateaux.

Par contre lorsque le bateau quitte, même si ce n'est pas en permanence, le régime Archimédien qui est à la base des règlements de ces bateaux, pour évoluer en régime Foiler, c'est un réel changement

de logiciel. Il n'existe pas de liaison entre les caractéristiques des Foils équipant les IMOCA (principalement leurs surfaces actives) et les équations Archimédiennes.

Une libéralisation totale du nombre d'appendices amènerait à dessiner des bateaux totalement différents des dessins actuels.

Toutefois ces nouveaux dessins répondraient aux critères archimédiens actuels.

Dans ce nouveau régime de navigation, les paramètres qui évoluent le plus spectaculairement sont la Vitesse (+ 10 à 15 nœuds) et le Vol du bateau.

Un spectateur voit que le bateau va très vite et se trouve au-dessus de l'eau.

Il est certain que le plan horizontal de régulation (PHR), indispensable au contrôle du bateau, sera autorisé dans quatre ans, ce sera la fin des générations exclusivement Archimédiennes.

Il sera aussi nécessaire d'encadrer techniquement cet appendice (PHR), comme il sera impératif de limiter le nombre de Foil actif (un seul en plus du voile de quille et du PHR) et sa surface active (projection du foil sur un plan horizontal en Gîte 0°. Solution qui avait été retenue, il y a 20 ans sur les Trimaran ORMA (1 m2 maximum).

Alors se posera une autre question cruciale :

**Est-ce que les Hommes pourront piloter, contrôler ce type de bateau pendant 60 ou même 50 jours ?**

Premier VENDEE GLOBE, 109 jours	: Moyenne 10 Nœuds.
Dernier VENDEE GLOBE (avec dérives courbes) 78 jours	: 14.9 Nœuds
Premier VENDEE GLOBE ou les Foils apparaissent, 74 jours	: 15.7 Nœuds
Projection sur 70 jours	: 16,6 Nœuds
Sur 60 jours	: 20 Nœuds
Sur 50 jours	: 23 Nœuds

Jean SANS  
2 Octobre 2019