



Le 18/05/2021

Cohabitation de la navigation des IMOCA FOILERS avec celle des IMOCA Archimédiens.

Deux lois physiques totalement différentes

Les lois Archimédiennes, appliquées à un bateau, permettent une régulation du comportement en mer quasiment automatique. En navigation sous voiles, il suffit d'adapter la voilure au vent et à surveiller son cap pour que tout se passe bien.

On peut énoncer qu'Archimède s'occupe de l'équilibre transversal et longitudinal du bateau.

Même si on part à l'abattée sous spinnaker, ce sont principalement les lois hydrodynamiques qui remettent le bateau « Upright ».

J'exclus le chavirage, car aujourd'hui le range de stabilité est suffisamment grand pour que ce risque n'existe pratiquement plus.

Par contre les lois régissant le « Vol » sont totalement différentes. Elles se résument pratiquement à : Si le plan porteur décroche, l'aéronef tombe.

Il peut éventuellement être récupéré par le pilote, à condition, que le pilote déclenche, sous réserve qu'il puisse le faire, une suite d'actions bien précises pour récupérer la portance et un domaine de vol normal.

On l'a vu lors de la dernière AC36, lorsque le pilote et l'équipage d'AMERICA MAGIC perdent, au passage d'une bouée, le contrôle du vol alors qu'ils sont lancés à près de 35/36 Nœuds.

Erreur funeste qui s'est traduite par un décollage spectaculaire totalement incontrôlé et une chute qui a été quelque peu fatale au bateau.

Un environnement complexe pour voler

Un avion c'est d'abord un autobus qui roule quelques dizaines de secondes sur la piste et qui trouve suffisamment de portance pour décoller et voler dans un fluide relativement stable et homogène.

Un Foiler, c'est d'abord un navire Archimédien qui possède une vitesse théorique de carène (lois de l'hydrodynamique) assez faible (10,5 nœuds pour une longueur de 18,28m) et qui grâce à un dessin de carène adéquat, dépasse cette vitesse Archimédienne afin d'hydroplaner, c'est-à-dire alléger son déplacement en bénéficiant de la portance de la carène lors de son déplacement sur l'eau.

C'est cette vitesse qui permet de générer une portance des foils et donc d'extraire la carène de la surface de d'eau.

Toutefois l'altitude de vol reste très faible (0.80 à 1,30 m environ).

De ce fait, le Foiler évolue dans un environnement instable et non prévisible, généré par l'état de la mer (amplitude des vagues supérieure à l'altitude possible de vol) et l'effet de sol sur les vagues.

Le Foil étant très proche de la surface de l'eau, il évolue aussi dans un fluide moins homogène (eau + air) qui perturbe l'écoulement, donc la portance) autour de l'intrados et de l'extrados du profil.

Un IMOCA : un bateau ambidextre

Pourquoi ce qualificatif ? Simplement parce qu'à la différence d'un aéronef qui passe 99,99% de son temps en vol, un IMOCA se trouve confronté à deux situations :

- Naviguer obligatoirement en mode Archimédien à cause
 - De l'environnement (vent et mer forts),
 - D'une allure défavorable, par rapport au vent, avec la conjonction de gîte et de tangage forts et irréguliers.
- Naviguer en mode Vol, c'est-à-dire extraire la carène de l'eau.

L'antinomie se situe dans la conception des « carènes » relative à chaque mode.

Le mode Archimédien impose d'avoir le minimum de surface mouillée, de trainée des appendices (le relevage possible du safran au vent en est l'exemple, en plus cela le protège des collisions).

Un Foil sous le vent, même partiellement ou totalement rentré représente une trainée sans commune mesure avec celle d'une dérive verticale qui évolue dans le fluide. Certes le Foil apportera un gain de Righting Moment (RM), la Trainée générée par le foil immergé réduit beaucoup l'effet apporté par le gain résultant du RM.

L'idéal serait de pouvoir escamoter entièrement les foils et les autres appendices de contrôles (si le bateau en est équipé) et de les remplacer par une dérive plus conventionnelle. Mais cela reste une utopie.

Il faut ajouter que le Foil sous le vent ratisse une surface horizontale (environ $4.5 \times 18.28 = 80 \text{ m}^2$) sans commune mesure avec une dérive.

Le mode Vol, en théorie se soucie peu de la carène, la réalité montre que les conditions de vol obligatoirement très proches de la surface de l'eau imposent que la carène et évidemment surtout sa structure soit très renforcée pour résister aux phénomènes de slamming et aux sollicitations en fatigue des assemblages et des matériaux.

C'était déjà vrai sur les IMOCA « classique », c'est encore plus vrai sur les IMOCA FOILERS qui possèdent une capacité théorique d'évolution de 15 m/s (30 nœuds). Il ne faut pas oublier que l'énergie cinétique évolue avec le carré de la vitesse.

Le passage de 20 nœuds (10 m/s) à 30 nœuds (15m/s) représente un facteur accroissement de l'énergie cinétique de 2.25.

Tout cet ensemble de contraintes aboutit à une nouvelle conception des « poutres navire » qui sont, par rapport au modèle « classique à dérive » (sollicitées en flexion normal), soumises à la torsion par le RM généré par la portance du Foil sous le vent).

L'ensemble de ces contraintes se concentrant dans une zone sensibilisée par la présence du puits de quille qui se trouve très proche des puits de Foils et de la compression exercée par le mat.

Au final, les architectes se trouvent confrontés à concevoir deux bateaux en un...

Du pilotage

Le mode Vol implique que l'on évolue en 3 dimensions.

Le mode Archimédien gère automatiquement l'amortissement de la gîte (au contrôle du réglage de voiles près) et du tangage. Le passage dans la mer peut être amélioré mais n'est piloté.

En 3 dimensions, en plus de la trajectoire (cap), deux paramètres doivent être obligatoirement contrôlés en permanence, ce sont l'altitude et l'assiette longitudinale (TRIM).

L'altitude dépend de la portance des Foils (angle d'incidence et/ou vitesse du vent).

Le TRIM est contrôlé par un plan horizontal arrière qui porte ou déporte, c'est-à-dire produit une portance vers le haut ou vers le bas suivant la commande qui lui est donnée.

Le contrôle du TRIM permet de voler horizontalement, ce qui permet de conserver durant la phase de Vol l'angle d'incidence des Foils programmé.

La fonction pilotage des IMOCA FOILER est très simplifiée, puisque que le bateau n'est pas équipé de système de contrôles du TRIM. En clair les IMOCA FOILER volent en « montant » sur le Foil sous le vent et le voile de quille pendulaire et s'appuient sur le tableau arrière (coté sous le vent).

Le bateau ne possède aucun moyen technique pour contrôler l'assiette longitudinale (TRIM).

Deux couples gèrent l'équilibre longitudinal :

- Le couple Vélique, dont la composante propulsive (situé à 15 m / DWL), fait basculer le bateau (rotation autour de la charnière Foil/Quille) sur le nez.
ET
- Le couple lié au centrage AR du bateau (position arrière du centre de gravité du bateau) qui appuie le bateau sur le tableau arrière.

Faute de contrôle physique du TRIM, ces deux couples produisent une navigation assez aléatoire ou l'on voit en baie de Lorient les IMOCA FOILERS voler à 30 nœuds dans un équilibre de quelques petites minutes avec une assiette longitudinale horizontale (TRIM = 0°) ou alors essayer de contrôler à la fois la puissance démesurée produite par les Foils et celle de la voilure afin de rester en appui sur le tableau AR (l'IMOCA FOILER est alors sur 3 points), en limitant l'aptitude à voler, donc la vitesse.

L'évolution 2021 de la règle de Jauge

Le développement des Foils apparaît après l'arrivée de l'édition du VENDEE 2012/2013.

D'abord timide, il explosera littéralement entre 2016 et 2020.

A la veille du départ du VENDEE 2020, la victoire annoncée, mais aussi l'écrasement du record, passe par ces nouveaux FOILS.

Leurs surfaces et envergures deviennent ce qu'est l'augmentation de la cylindrée sur une voiture.

80 jours après, c'est un IMOCA FOILER qui gagne, mais avec à peine 24 heures d'avance réelle sur le 3^{ième} qui est un IMOCA à dérive. La moyenne est de 12.4 nœuds.

Toutefois tous les skippers, femmes et hommes, ont de nouveau montré, que terminer un VENDEE, quel que soit la technicité de leur bateau, représente un exploit personnel hors norme.

Les résultats annoncés n'ont pas été au rendez-vous, l'excuse de la Météo, qui ne convainc quand même personne, ne tient pas.

Il apparaît clairement, et cela a été écrit et documenté bien avant de départ, que ce sont les orientations technologiques qui ont conduit à ces contres performances. On est tenté de dire, cherchez le bug.

En fait l'IMOCA, qui était, à l'origine en 1989 (l'IMOCA est née en 1998) une jauge OPEN, devient au fil des années une jauge Monotype à restrictions. De plus en plus d'éléments du bateau sont monotypes (standardisés).

Les Foils restaient, ces dernières années, un des rares domaine de liberté et d'innovation. Les règles de la classe IMOCA étant très contraignantes, elles laissent assez peu d'ouvertures aux ingénieurs.

La littérature et les expériences sur les Foils existants depuis des décennies, le Foil extérieur sous le vent est apparu pour un IMOCA comme la solution pour acquérir un saut de vitesse important.

Si on ajoute à l'absence de règles dimensionnelles sur les Foils, les progrès dans la fabrication des poutres en composite carbone et les évolutions des caractéristiques des fibres de carbone, on s'est retrouvé avec des ailes d'albatros de chaque côté de la coque.

Tout cela sans aucun contrôle possible du vol avec un appendice arrière (contrôle indispensable), puisque la règle de classe de l'IMOCA limite le nombre d'appendice à 5 (un voile de quille, deux foils, deux safrans).

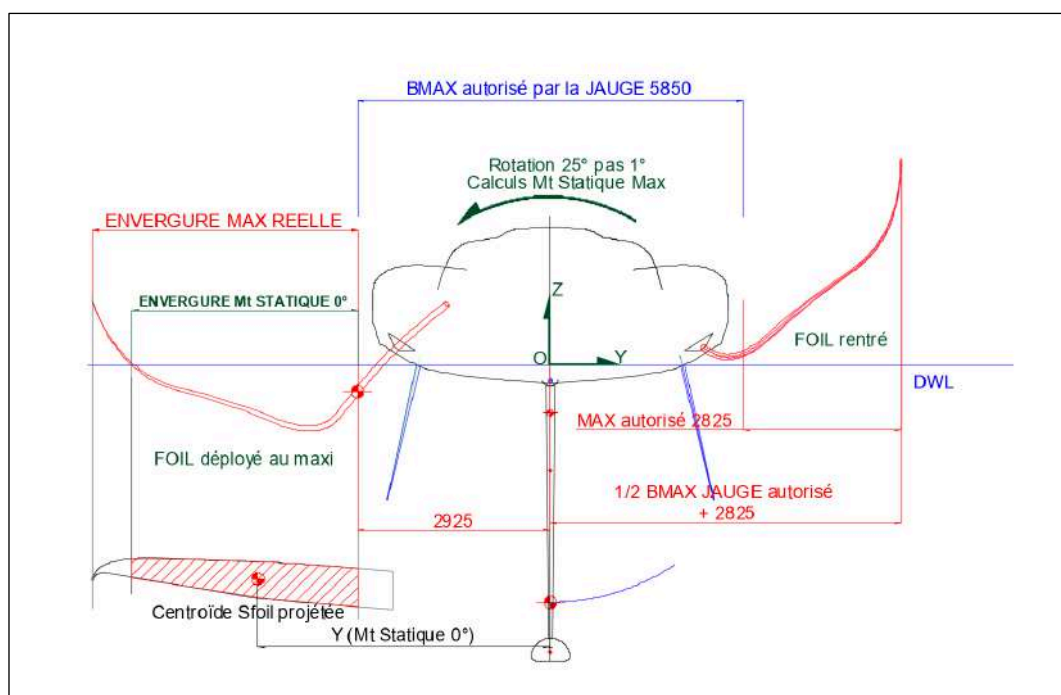
Ajoutons à cette configuration que les skippers ne barrent pratiquement pas les bateaux et que les pilotes automatiques possèdent obligatoirement qu'une seule fonctionnalité : suivre un cap.

Alors les bureaux d'études vont rechercher l'appui de centrale inertielle, d'algorithmes très complexe, « d'intelligence artificielle », de « couches d'intelligence » dans les pilotes afin de résoudre cette quadrature du cercle qui est « **VOLER sans moyen physique de contrôle de l'assiette longitudinale (TRIM)** ».

Aujourd'hui on entend dire que l'expérience acquise (des millions de données captées) lors du dernier VENDEE doit d'améliorer, voir résoudre, le contrôle du TRIM en navigation pour vraiment sauter le pas de la vitesse, ce qui permettrait de conserver les orientations technologiques existantes (dimensions, formes générales des Foils).

Toutefois après d'après discussion la Classe IMOCA a décidé d'encadrer à partir de 2021 le dimensionnement des Foils. Certes ils ne seront pas monotypes, comme les voiles de quille ou les mâts ou les bômes, mais devront rentrer dans une « Box-Foil » très directive et au final très contraignante.

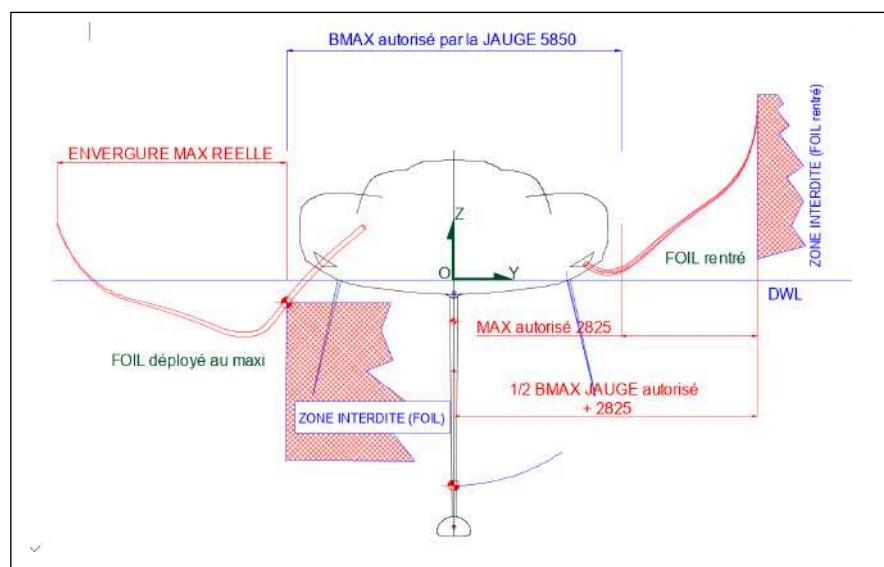
- D'abord les interdits :
 - Foils en T ou en Y.
 - Les constructions qui intègrent du « morphing » (foil déformable au niveau du bord de fuite sans utiliser de flap, volet etc)
- Ensuite les deux limites physiques nouvelles sont créées :
 - Moment statique maximal : **8m³**
 - Surface développée intrados + extrados : **7.70 m²**On reviendra plus loin dans l'explication de ces paramètres.
- La limite maximale de l'envergure des Foils en position rentrée est imposée : 5.750 m / plan de symétrie du bateau.



- La Forme générale du foil en position déploiement maximal :
Aucune limite dimensionnelle unique est imposée, mais le Foil doit respecter une combinaison entre le **Moment Statique** et la **Surface Développée de l'intrados et de l'extrados**.
Il faut ajouter :
 - Un seul degré de liberté en translation
 - La zone du foil qui entre et sort de la carène doit posséder des sections constantes.
 - A partir de la section du foil qui se trouve à $Y = 2.925$ m du plan de symétrie de la coque, la valeur Y du centroïde (Centroïde= centre de gravité de la surface du profil normal) des sections (profils) successives doit toujours croître.
 - Seule une exception en extrémité de foil est autorisée (en fait pour créer un Winglet, ce qui diminue la trainée à extrémité du foil) et cela sur 210 mm vers le haut.

La seule liberté qui reste se situe entre le point de sortie de la coque et le point du foil d'abscisse $Y = 2.925$ m.

- Les fences sont autorisés mais limités en dimensions (50 mm).
- Un 2^{ème} degré de liberté est autorisé mais avec un range de 5° (réglage de l'incidence du foil).



Une limite du Moment statique à « 8 m3 » qui fait penser à un volume !!

En fait le texte de la Règle de jauge identifie cette limite (8 m3) comme un MOMENT STATIQUE, c'est-à-dire physiquement comme le produit d'une force (en Newtons) par un bras de levier (en mètre).

L'écriture de la règle est quelque peu abusive puisqu'elle parle de « MOMENT » (un moment s'exprime en m^3N) et utilise comme unité le « m3 ».

En fait cette valeur de 8m3 est l'image du produit de la Portance d'un foil (force verticale) par la distance horizontale à l'axe du bateau.

Soit : $C = (0.5 * 1025 * C_z * \text{SFOIL} * V^2) * (\text{distance entre l'axe du centre de portance et l'axe du bateau})$

La partie entre parenthèse est exprimée en Newtons.

La partie en rouge est exprimée en mètres.

On arrive ainsi à cette expression en « m3 » en disant que les paramètres suivants : 0,5, 1025, C_z et V sont identiques pour tous les IMOCA. C'est évidemment faux, mais pas gênant puisque les potentiels de vitesses de ces IMOCA FOILERS sont quasi identiques.

On va même aller plus loin et donner à ce produit la valeur 1 alors que dans la réalité il est égal à $0.5 * 1025 * 0.3 * 10^2$ soit 15375.

Donc au lieu de calculer $C = (15375 * S_{FOIL}) * (\text{distance entre l'axe du centre de portance et l'axe du bateau})$ on calcule $S_{FOIL} (m^2) * \text{Distance} (m) = \text{valeur en } m^3$, valeur que l'on fixe arbitrairement 8 m³.

Voilà pourquoi on utilise une « fausse » unité de volume qui en réalité correspond bien au produit d'une portance par un bras de levier.

Aux Architectes de rester dans cette limite...

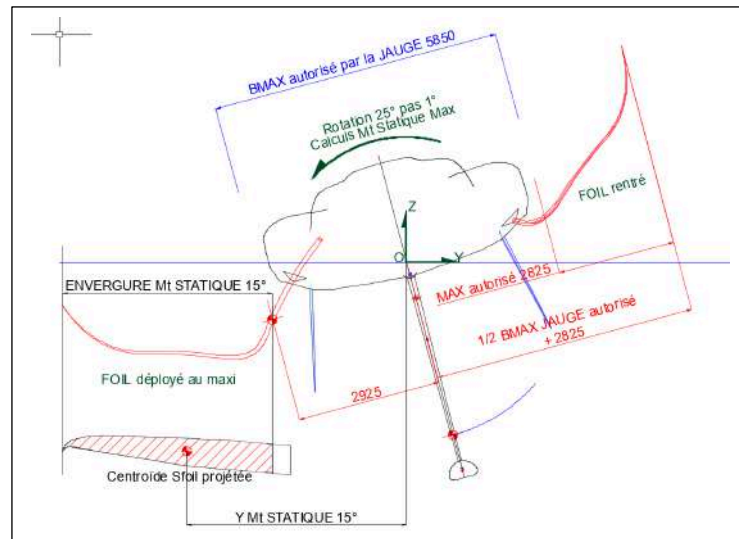
Pourquoi introduire un Moment statique ?

Cela permet de limiter le moment de redressement (RM) apporté par le foil. Dorénavant l'étude sera réalisée de la gîte 0° à 25°, degré par degré. On recherchera la valeur maximale qui devra être inférieure à « 8m³ ».

Il ne faut pas oublier que le mat (Monotype) a été calculé pour un bateau strictement archimédien, certes avec un coefficient de sécurité, mais pas pour une augmentation du RM comme celle que produit le foil... surtout en mode dynamique. N'oublions pas qu'en mode VOL, le bateau ne gîte pas sous l'effet des surventes, comme c'est le cas en Archimédien ou la gîte amortie d'effet de la survente.

C'est pour cette raison que les alarmes sont installées sur le gréement, l'étai, la base du mat, etc.

Actuellement en mode VOL, le mat travaille en dehors de son range Archimédien en utilisant la plage de sécurité calculé par le fabriquant du mat !!!



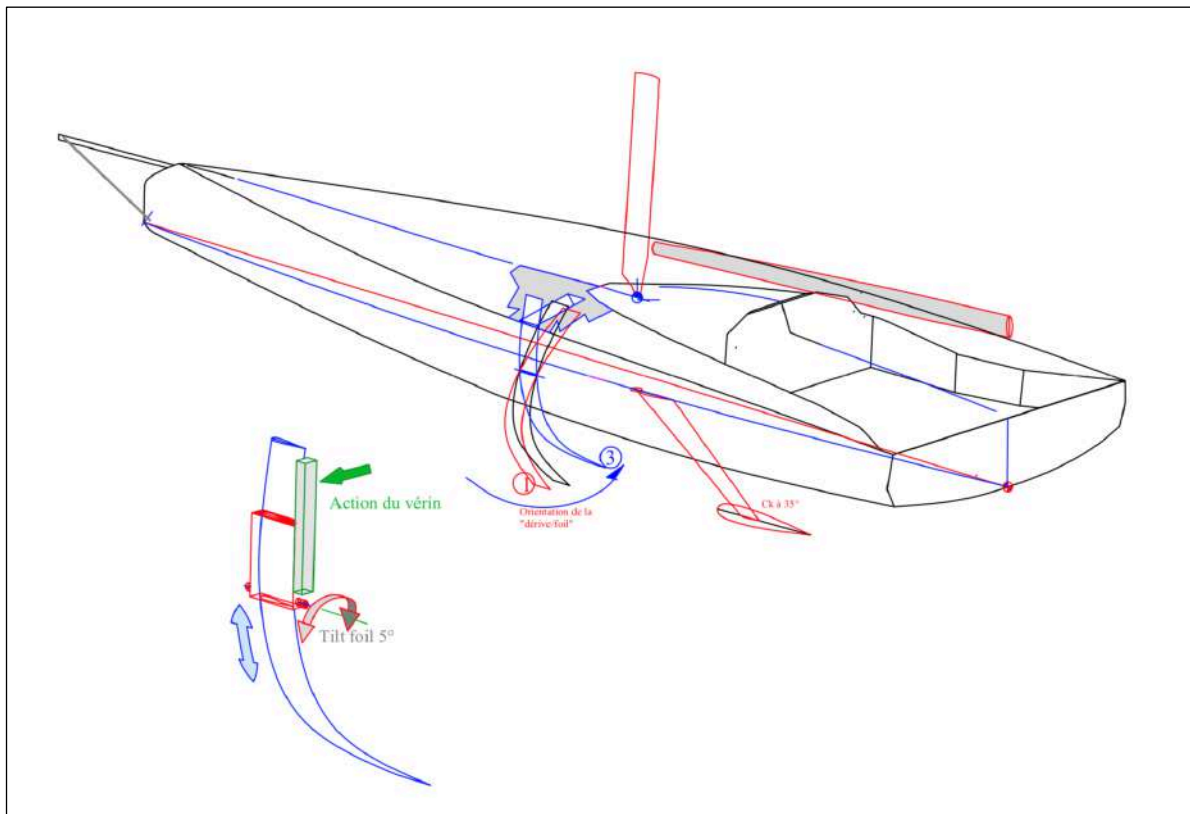
Une absence remarquée... et une standardisation visuelle des bateaux

Exit les dérives dans la liste des appendices de coque. Il ne subsiste expressément dans les Règles IMOCA 2021 que les FOILS, le ou les SAFRANS, la QUILLE.

On pourrait considérer qu'une dérive peut être un Foil suivant sa forme, encore faut-il qu'elle soit courbe (et orientable latéralement), mais les 13 articles qui définissent les Foils, et le (g) principalement enterrer les dérives :

(g) Un foil ne doit traverser la carène de coque qu'une seule fois. L'intersection du foil avec la carène de coque doit être au-dessus du plan de flottaison lorsque le bateau est au repos, à gîte nulle et en configuration légère.

Certes on peut imaginer des dérives à la hollandaise, mais en aucun cas les dérives telles qu'elles ont existé qu'elles soient centrales et droites, latérales et inclinées ou courbes vers l'intérieur.



Une « grand-father clause » autorisera les IMOCA anciens (à dérive) dans les régates, mais à la lecture du texte actuel, il paraît impossible de construire un nouvel IMOCA à dérive.

Pourquoi cette exclusion ? Veut-on marquer le changement de paradigme entre les anciens et les modernes qui ne voient les IMOCA qu'en bateaux pseudo-aériens ?

En fait la réponse semble plus complexe. L'ajout de règles encadrant de plus en plus, au fil des années, le descriptif des bateaux conduit inexorablement à **un bateau « image »** facilement identifiable par le public.

Déjà à l'origine, le parcours du VENDEE typait les bateaux, ensuite la monotypie des mâts, des voiles de quilles, l'encadrement du plan de voilure, des formes avant de la carène, du nombre d'appendices ont conduit progressivement vers un « dessin unique ».

Certes la majorité de ces mutualisations et de ces limites ont été nécessaires afin d'améliorer la sécurité des skippers et la fiabilité des bateaux mais cela a restreint comme peau de chagrin les domaines où les architectes, les ingénieurs peuvent encore s'exprimer, avec comme effet connexe, une augmentation des coûts sans contrôle possible.

La nouvelle norme des Foils

La règle 2021 ne fait qu'encadrer les développements et l'architecture des implantations des foils dans une « boîte » dont les contours sont calqués sur les dernières évolutions des bateaux phares.

Cette règle restreint l'imagination des architectes car bien que l'objectif soit toujours d'améliorer les performances donc un gain de vitesse, cette recherche passe exclusivement par le VOL sur deux ailes latérales : Un FOIL sous le vent et un Voile de Quille au vent.

Afin d'éviter toutes digressions, la forme générale du Foil est très encadrée, notamment en interdisant (bateau en assiette 0°) qu'à la sortie du puits du foil, celui-ci se développe vers l'axe du bateau avant de s'écarter vers l'extérieur.

Une telle possibilité aurait été une piste intéressante afin d'améliorer l'angle de descente au portant, car à la gîte normale de navigation de 15°, cette forme de Foil déplace la verticale du Lift vers l'axe de bateau, ce qui permet d'améliorer l'angle de la trajectoire au portant.

L'obsession du « VOL » et son corolaire « la Vitesse »

La régates se définit par la conjonction de la stratégie et de la vitesse, ne dit-on pas « la vitesse rend intelligent... ». Mais la vitesse par elle-même ne signifie pas obligatoirement grand-chose, si elle est trop fluctuante.

Actuellement circule une sorte d'obsession du « VOL » et de son corolaire « la Vitesse »

Parler de 30, 35 nœuds, impressionne mais ne signifie rien si on ne précise pas le contexte dans lequel cette vitesse est atteinte.

Les IMOCA Foilers tel qu'ils sont conçus peuvent voler, c'est une réalité.

Ils possèdent une surface sustentatrice (FOIL + Voile de Quille) et une surface de voilure qui leurs permettent d'extraire la coque (masse 8.5 Tonnes) de l'eau. Je dirais que ce n'est pas le challenge le plus complexe à réaliser.

Par contre Voler, impose d'autres contraintes technologiques et non des moindres car en plus d'extraire le bateau de l'eau, il faut le maintenir à une altitude constante et être capable de le diriger et le contrôler.

Ces objectifs n'étaient pas atteints durant le VENDEE 2020/21, ce que tout le monde savait.

Les nouvelles règles sur les Foils, ne solutionnent pas le problème !

L'architecture générale des éléments permettant le Vol est incomplète et tout le monde est d'accord sur ce constat. En effet si la surface sustentatrice, qui permet d'extraire le bateau de l'eau (Foil + voile de quille) existe et fonctionne correctement, le système de contrôle du vol est toujours totalement absent. Voler ne signifie uniquement pas s'élever hors de l'eau mais en même temps doit intégrer le contrôle du Vol en lacet (avec le safran) et en tangage. Et sur un IMOCA, aucun système permet de contrôler le tangage, c'est-à-dire conserver le bateau en vol horizontal. Ce n'est pas l'encadrement des formes des Foils qui permettra de réaliser de manière continue un vol avec une assiette horizontale.

Il n'y aurait donc pas de solution à un vol stabilisé ?

En fait le problème est plus compliqué car il n'est pas uniquement technique. Tous les techniciens savent que pour voler horizontalement de manière continue, il faut avoir un plan régulateur horizontal à l'arrière (sur le safran).

L'obstacle pour un IMOCA, est le plan d'eau qu'il va rencontrer, c'est-à-dire l'état de la mer et non la technologie. Car le plan d'eau (l'état de la mer, la force du vent, l'allure) contraint l'IMOCA à retrouver le domaine archimédien et dans ce cas tous ses appendices extérieurs (Foils et si on veut voler un plan horizontal de régulation arrière) vont représenter des freins considérables.

On pourrait imaginer que les foils se rétractent entièrement, mais alors il est impossible d'avoir des fentes, ou des rayons de courbure trop prononcés. On pourrait imaginer un ensemble unique safran et empennage horizontal sur le tableau arrière et escamotable...Mais surtout, il faut lier ensemble tous les contrôles de ces appendices avec le PA (pilote automatique) et cela se nomme asservissements, et c'est interdit...

A lire la presse spécialisée, à écouter les Architectes, la solution passerait par l'amélioration de la connaissance de l'environnement (état de la mer) et de la rapidité du traitement des mouvements, des sollicitations mécaniques subies par le bateau et par la conception d'algorithmes plus évolués... J'attends de voir, mais je doute que ce soit possible, car si cela l'était il y a longtemps que les aviateurs auraient supprimé les empennages arrière horizontaux des avions et leurs éléments de commande.

JS (18/05/21)