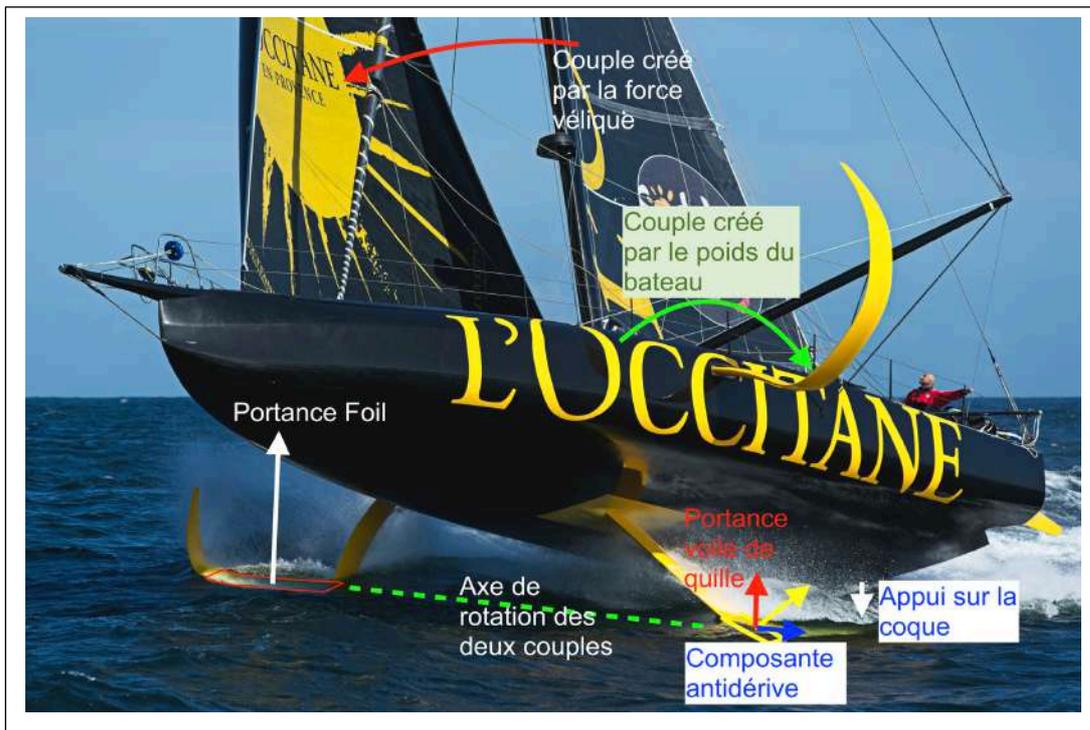


Pour bien appréhender l'évolution architecturale des IMOCA à travers les années 1989 /2020, il est nécessaire de démarrer par un exposé sur la stabilité des bateaux : une notion essentielle à la performance et à la sécurité. La dure réalité océanique a montré la complexité du débat. Il a fallu attendre les années 2000 et l'avènement de la jauge IMOCA pour que des solutions pérennes soient actées. Les bateaux ne chavirent plus... Les formes des voiliers tendent à se stabiliser.

La puissance et la vitesse ne sont plus recherchées qu'à travers les lois de l'hydrostatique et des formes des œuvres vives, mais en utilisant des appendices sustentateurs (Foils) qui extraient la carène de l'eau.



Du coup, la recherche de la performance se concentre sur la légèreté, la résilience de ces appendices avec excès parfois. De nouveau l'IMOCA devra mettre le holà. Il est même envisagé de rendre monotype le 60 pieds. Une alternative est finalement ratifiée qui consiste à standardiser les parties sensibles du bateau comme la quille et le mât sans pour autant pénaliser les bateaux existants. Dans cette « box rule » qui se durcit, difficile pour les architectes de faire la différence... Quand en 2015 apparaissent les premiers Foilers : les dérives sont remplacées par de grands plans porteurs de chaque côté de la coque pour la sustenter. Les Foilers de dernière génération (2018/2020) sont totalement conçus pour ce nouveau mode de navigation et arrivent même à voler au-dessus de la surface de l'eau. Compliqué mais passionnant !

Le Vendée Globe confronté à la Stabilité des bateaux.

La perception de la stabilité d'un voilier équipé d'un lest (qu'il soit extérieur ou intérieur) est très subjective. La pratique architecturale des bateaux de plaisance et surtout les lois usuelles de la physique appliquées aux objets flottants conduisent naturellement à dessiner et construire des bateaux stables¹ depuis des décennies.

L'équation, une coque, un mât, des voiles et sous la coque un lest produit généralement un bateau qui chavire au-delà de 90° de gîte (mât dans l'eau). Certaines formes architecturales, type « plats à barbe » des années 1880 aux USA feront mentir cette loi, mais cela restera épisodique.

Rappelons que les autres types de navires, pêche, transport de passagers, cargos chavirent à des angles beaucoup plus faibles (60,75°...), et pourtant rares sont les navires qui chavirent...

Ce sont les USA, avec la règle de jauge du CCA² qui ont introduit les premiers le paramètre « stabilité » dans la « Régate offshore ».

L'IOR et les règles de course suivantes feront de même, mais l'évaluation (ou la mesure) de la stabilité n'est pas conçue comme un paramètre visant à s'assurer de la sécurité du bateau (résistance au chavirage), mais comme un élément permettant de quantifier les performances du voilier.

La volonté du législateur : « *plus le bateau possède une stabilité initiale importante³ (on parle de bateau « raide »), et donc peut supporter d'être voilé, plus il est taxé par les règles de Jauge* » sera détournée par les architectes qui vont sacrifier la stabilité de poids au profit de la stabilité de forme et de fait réduire l'angle de chavirage, tout en augmentant considérablement le potentiel de vitesse des bateaux à certaines allures.

Quant à la fonction sécuritaire de la stabilité elle restera très longtemps un adage, « *les bateaux doivent être « auto-redressant⁴ »* et cela jusqu'au Vendée Globe 96, malgré une alerte lors du premier VG en 1989.

La réalisation d'un calcul de stabilité, lors de la conception d'un bateau, est un travail très laborieux et long. Il faut attendre la fin des années 80 et le début des années 90 pour que les ordinateurs se diffusent, mais surtout que les architectes abandonnent le dessin manuel et passent à la conception numérique des carènes. En effet un calcul de stabilité avec un programme dédié, impose que la carène et les devis de poids soient entièrement numérisés. Ce sera effectif vers 1998 et imposé pour le VG 2000.

¹ Il faudra attendre la Directive Européenne de 1996 pour que des prescriptions concernant la stabilité soient imposées et qu'une mesure réelle de stabilité soit réalisée sur tous les navires de plaisance mis sur le Marché.

² CCA : Cruising Club of America

³ Ce qui ne signifie pas qu'il possède une grande stabilité

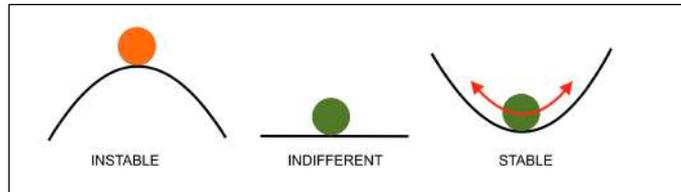
⁴ Les textes anglo-saxons régissant la régate « Offshore » parlent de « Self-Righting »

A - LES POSITIONS D'ÉQUILIBRE DU VOILIER.

1/ Équilibre stable du bateau vs équilibre instable.

La nature d'un équilibre peut avoir 3 états :

- Stable
- Indifférent
- Instable



Le dessin ci-contre est très explicite, la bille verte revient toujours à sa position d'équilibre lorsqu'on l'écarte de cette position : **équilibre stable**.

Par contre la bille orangée roule d'un côté ou de l'autre dès qu'une impulsion quelconque l'écarte de quelques microns de sa position (fragile) d'équilibre. On est en présence d'un **équilibre instable**.

Équilibre stable du bateau

Un voilier possède deux positions d'équilibre stable : une « normale », lorsque le mât est en l'air (droit), l'autre lorsque la quille est en l'air (à l'envers ou « Capsize »). Lorsque le bateau est écarté temporairement d'une de ces deux positions d'équilibre par un moyen mécanique quelconque (vent, mer etc), il revient à sa position originelle, dès qu'on relâche l'effort. Si le bateau est ballasté ou est équipé d'une quille pendulaire basculée sur un côté, le bateau trouve de la même manière deux positions d'équilibre stable à quelques degrés de la verticale : 10° environ lorsque le mât est en l'air pour un IMOCA, 5° lorsque le bateau est chaviré (valeur approximative pour un IMOCA à pont plat).

Les acronymes :

CG - Centre de Gravité du bateau : point d'équilibre des masses des différents éléments constituant le bateau. La position du centre de gravité relève de la conception générale du bateau et est considérée comme invariante, tant que l'on n'utilise pas les ballasts et/ou la quille pendulaire.

CC - Centre de Carène : centre de gravité du volume immergé de la carène. Le centre de carène est différent pour chaque degré de gîte du bateau.

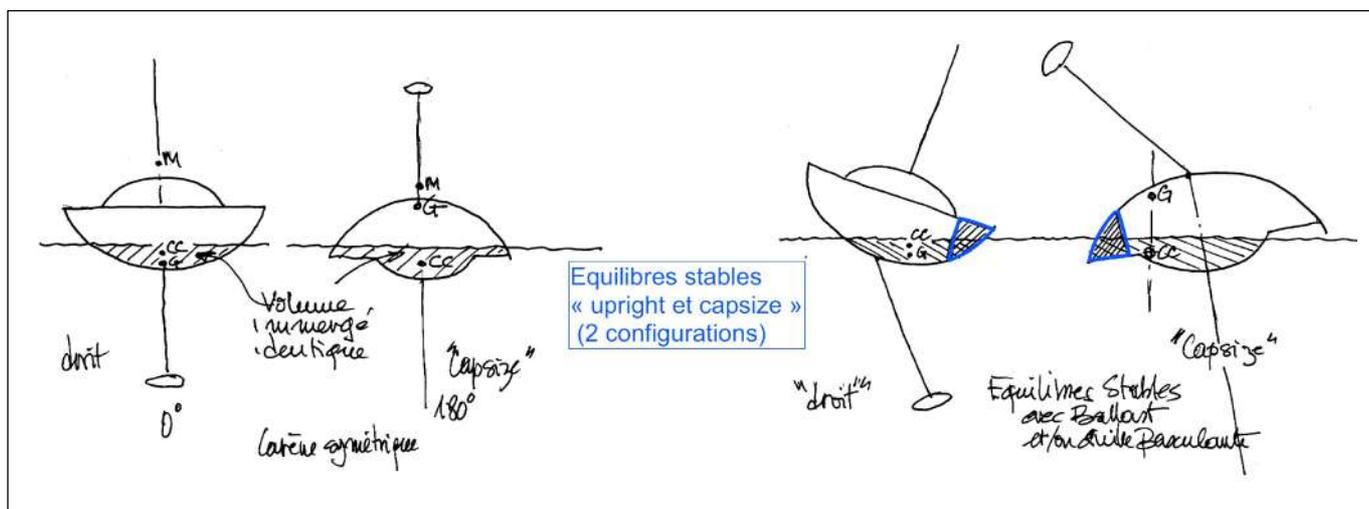
M - Métacentre du bateau : point de rotation du bateau pour chaque angle de gîte.

GZ - Distance horizontale entre le centre de gravité et le centre de carène. Cette distance dépend de la gîte du bateau. On la nomme aussi bras de levier. Le produit de GZ par le poids du bateau donne le Moment de redressement (« Righting Moment »)

Symétrie / Asymétrie - Par essence un bateau est symétrique. Il devient asymétrique si on bascule la quille d'un bord.

Équilibre instable du bateau

Pour un bateau symétrique, c'est-à-dire sans ballast latéral, et avec une quille fixe ou une quille pendulaire immobilisée dans l'axe du bateau il existe une seule position⁵ d'équilibre instable que le bateau atteint à un angle de gîte bien précis. L'angle de gîte correspondant à cette position d'équilibre instable s'appelle angle Avs.



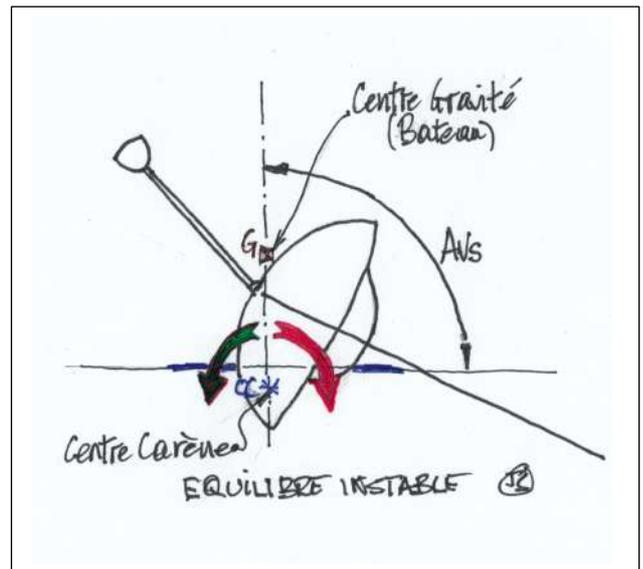
L'Avs est l'angle du chavirage

On parle très souvent de « chavirage ». Cette expression signifie la frontière entre l'état navigable du bateau, (angle de gîte compris entre 0° et Avs où le bateau revient automatiquement vers une assiette droite 0°), à l'état non-navigable ou le bateau se retrouve automatiquement avec le mât à l'envers (« Capsize »). Depuis cette position, si on veut ramener le bateau avec le mât en l'air, il faut le faire gîter de 180°, à 170, 160 ...jusqu'à Avs. Arrivé à cet angle, le bateau « chavire », je dirais pour la bonne cause (à l'endroit), et se retrouve mât vertical.

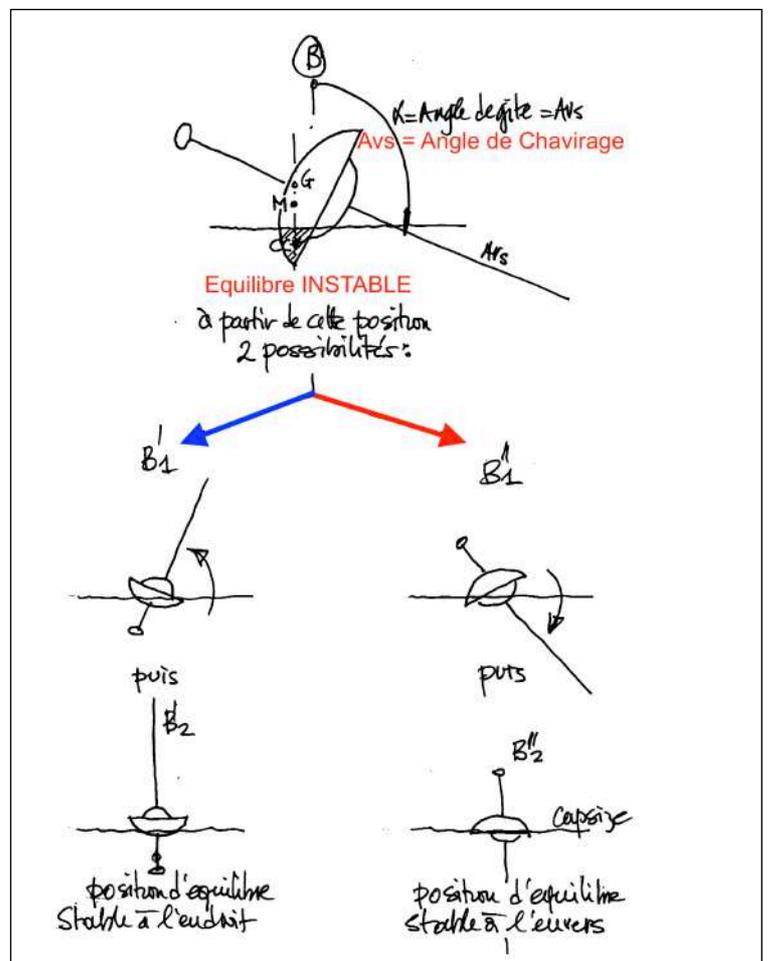
La difficulté est que la position d'équilibre « Capsize » est souvent hyper stable. Contrairement à l'état navigable où c'est l'énergie captée par les voiles qui produit la gîte et l'éventualité de se rapprocher de l'angle Avs fatidique, l'état non-navigable ne peut compter que sur le mouvement et l'état de la mer (angle des vagues) pour espérer atteindre l'angle Avs et ainsi revenir dans la zone de l'état navigable.

⁵ En réalité il y en a deux, car le bateau peut trouver cet angle d'équilibre instable sur bâbord ou sur tribord, mais quel que soit le côté ou il gîte, cet angle d'équilibre instable est identique.

Mais mettre le mât à toucher l'eau n'est pas chavirer, sauf si l'angle Avs du bateau est inférieur à 90° ou très voisin de 90° . Lorsque le mât est dans l'eau, et que l'Avs est de 120° (par exemple), les voiles ne génèrent plus d'énergie. Ce sont alors l'inertie générée par la gîte, la portance de la coque perpendiculaire au vent (près de 70 m^2 pour une coque l'IMOCA) et la pente des vagues (20° ?), si la mer est très formée, qui produiront le reste pour atteindre l'Avs et provoquer le chavirage.



Pour un bateau ou le chargement est dissymétrique avec des ballasts latéraux et/ou une quille pendulaire pivotée sur un bord, c'est un peu plus compliqué car le centre de gravité du bateau n'est plus dans le plan de symétrie du bateau. Dans ces conditions il y a effectivement, pour une asymétrie (quille et ballast sur bâbord ou sur tribord), un angle Avs (bâbord) et un Avs (tribord). Ces deux angles Avs sont différents. On reviendra sur ce point plus loin dans ce document.



2/ Pourquoi ces trois positions d'équilibre sur un voilier, deux stables et une instable ?

Lorsque l'on étudie ces trois positions d'équilibre « Droit », « Capsize », « Avs » on constate qu'elles possèdent toutes les trois un point commun : les deux points caractéristiques CG (centre de Gravité du bateau) et CC (Centre de Carène) sont sur une même verticale.

Le CG peut être situé au-dessous ou au-dessus du CC, cette dernière position correspond à la configuration (gîte 0°) de tous les bateaux de croisière vendus dans le monde.

Sur un IMOCA, mât en l'air (gîte 0°) le CG est sous le CC (il est même sous le fond de coque) et en cas de « Capsize » (gîte 180°), il se retrouve au-dessus du CC.

Lors de l'étude de la stabilité, degré par degré de gîte du bateau, c'est la position verticale du point, très particulier, « M », Métacentre⁶ et la valeur de la distance entre chaque métacentre M et le Centre de Carène (CC) correspondant à un angle de gîte, nommé Rayon Métacentrique (ro) qui permet d'évaluer la qualité de la stabilité entre 0° et Avs.

Sur les voiliers, on évoque l'angle Avs, qui est plus facilement identifiable, car contrairement à un navire commercial la position du centre de gravité varie très peu. Sur un bateau de croisière de 8 000 kg le déplacement de l'équipage de 10 personnes (800 kg) de la cabine sur le pont provoque une élévation du CG du bateau de quelques centimètres, ce qui est négligeable dans le calcul de l'Avs.

3/ La courbe de stabilité (bateau quille fixe ou angulation 0°)

Lorsque le bateau navigue sous voile il est en totale sécurité lorsque la gîte est comprise entre 0° et l'angle Avs (129° sur la courbe ci-contre).

Lorsque l'angle de gîte atteint la valeur Avs, le bateau chavire irrémédiablement. L'équipage ne peut pas s'y opposer, et cela jusqu'à la position « Capsize » 180°.

Seul Yves Parlier (Aquitaine Innovations) a réellement montré qu'il était possible (autre que théoriquement) de revenir d'une position « Capsize » avec un bateau à pont plat et une quille à bulbe fixe et un plan d'eau plat.

Reste que dans un environnement réel (vent et mer ayant provoqué le chavirage), cette opération est impossible.



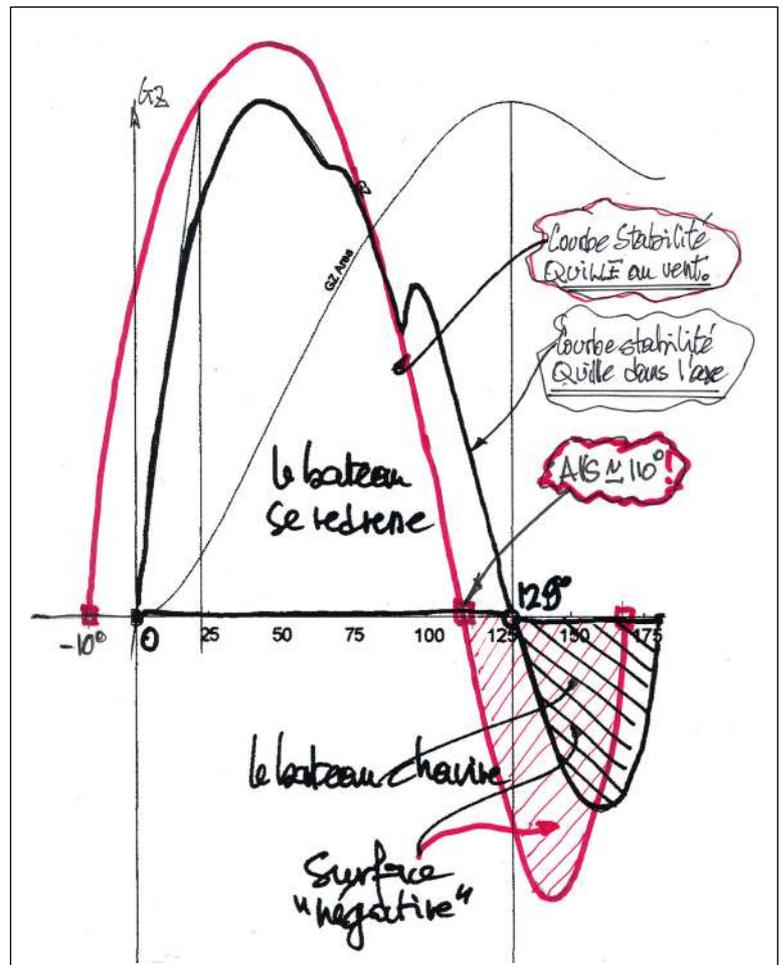
⁶ Le Métacentre de Carène, est défini comme l'intersection de la verticale passant par le centre de carène (CC) à chaque degré de gîte avec l'axe de symétrie de la carène.

Même en imaginant que l'état de la mer aide et fournit quelques 20° de gîte naturelle et un peu de gîte inertielle, les 3 ou 4 m³ d'eau dans le **poste avant** génèrent une carène liquide compliquée à maîtriser et à évacuer. L'assiette longitudinale retrouvée à 0° de gîte (l'étrave du bateau est pratiquement totalement immergée) produit un équilibre très précaire.

4/ La courbe de stabilité (bateau équipé d'une quille pendulaire)

Lorsque la quille est angulée ou le ballast rempli dans le but d'augmenter la stabilité ou plutôt ce que l'on nomme raideur initiale, la position de stabilité mât en l'air (voiles non hissées) est négative. Le bateau gîte du côté où la quille est inclinée et où les ballasts sont remplis (-8°, -10°, -15° suivant la carène, la masse de la quille, son angulation et des ballasts éventuels).

On remarque deux courbes très proches l'une de l'autre (mauve et bleu), qui débutent pour cet exemple à environ -10° de gîte. Ces deux courbes concernent la quille pendulaire angulée au vent avec ou sans le ballast rempli. On constate que jusqu'à 52° (pour cette étude) le moment (Mt) de redressement (Multiplication de GZ par le déplacement) est de l'ordre de 30% plus élevé que celui produit

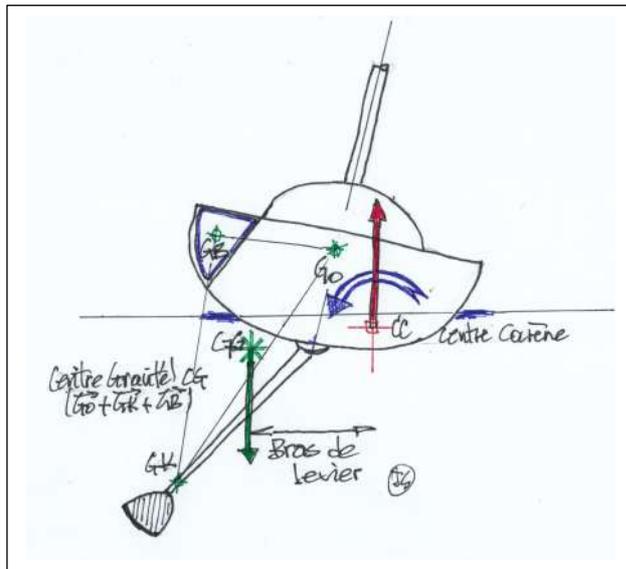


lorsque le bateau est configuré avec la quille dans l'axe et le ballast vide. Cela confirme, si nécessaire, que mettre du « poids » au vent améliore l'aptitude à résister à la gîte, et donc augmente la puissance du bateau.

Toute médaille ayant son revers, le gain important de puissance entraîne mécaniquement une diminution de l'angle de chavirage Avs (passage de 130° à 116° soit -10%). Il existe alors un paradoxe, entre la raideur qui augmente, aux angles de gîte de navigation en régates, et la « stabilité -Avs- » qui diminue. La raideur permet de porter plus de surface de voilure, ce qui intrinsèquement augmente le potentiel de vitesse surtout pour des carènes planantes. C'est le point le plus important pour un régatier. La perte de « stabilité d'un navire,

diminution de l'Avs », c'est-à-dire sa propension à résister au chavirage, passe alors au second plan. Le paradoxe est d'ailleurs double, car à l'inverse si on angule la quille sous le vent (et que l'on remplit aussi les ballasts latéraux sous le vent), on constate que l'angle de chavirage Avs « recule » vers 150°.

B – LIBERTE DE CONCEPTION



Cette interrogation sur l'évaluation, le contrôle de la stabilité et surtout sur la mise en place de prescriptions très draconiennes, n'aurait jamais existé sans l'idée d'une régates autour du monde par les trois caps en laissant la liberté de conception des bateaux.

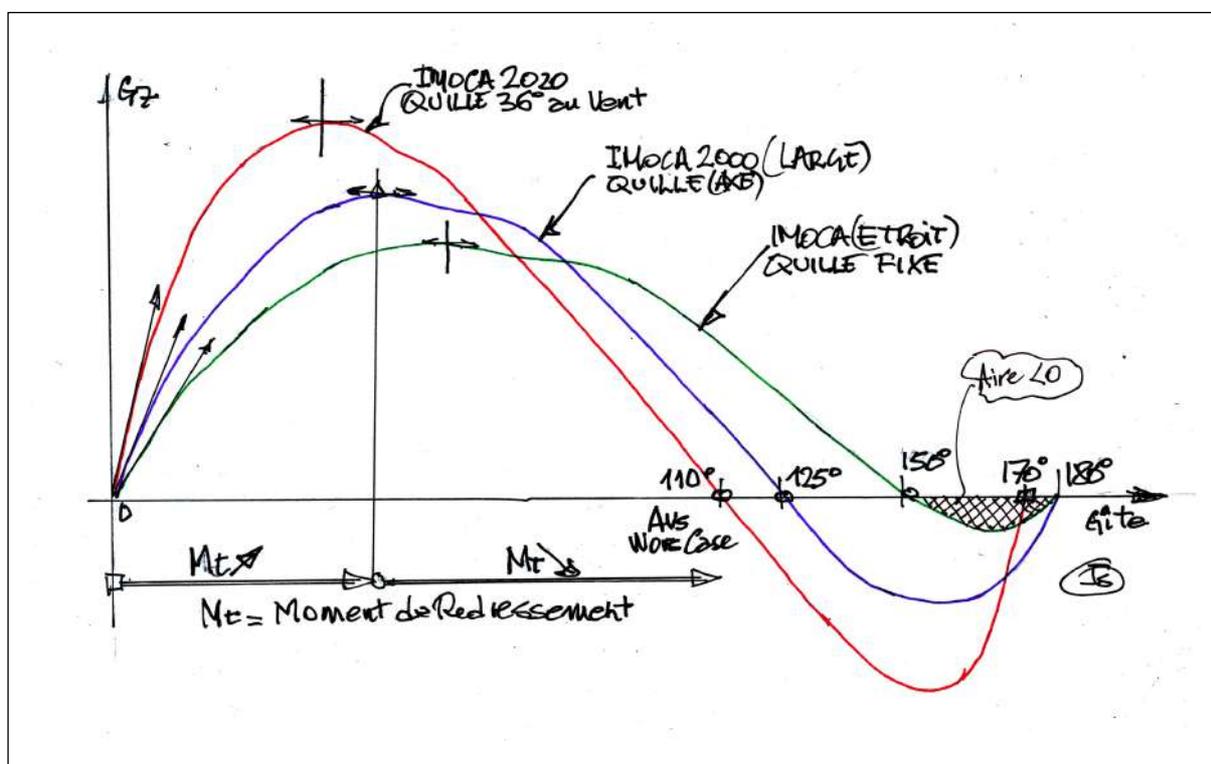
C'est ce qui se produira avec la création du BOC Challenge puis celle du Vendée Globe. La seule contrainte étant, au début, la longueur hors tout et le tirant d'eau pour des impératifs portuaires (Les

Sables d'Olonne). On parlait d'ailleurs de Courses Open... ouvertes... libres... sans les carcans imposés par les jauges.

La première réelle course autour du monde sera la Whitbread en 1973. Le Golden Globe en solitaire lui est antérieur (1968), mais ressemblait plus à un « Challenge d'aventurier » qu'à une régates, ce qui n'enlève rien à cet événement. La particularité de la Whitbread (course en équipage) repose sur l'utilisation de la règle de jauge IOR pour classer les bateaux. Une règle internationale qui impose une mesure et un calcul de la stabilité mais aussi une limite basse de cette stabilité. Certes, la méthode de calcul, bien que reprenant les bases de l'architecture navale est assez loin de la méthode normale qui prend en compte la forme réelle des bateaux. Toutefois la technique employée impose aux bateaux une certaine stabilité de poids.



Par exemple, le ketch [Sayula](#), (Swan 65), vainqueur de la première Whitbread 73/74, mesure 19,98 m (LHT), affiche un BMAX de 4,94m, pèse 33 tonnes, et possède un Avs de 130°/135°. Actuellement un IMOCA affiche 7,8 tonnes pour 18,28 m, un BMAX de 5.60 m, un Avs quille non angulée de 125° et un Avs quille angulée de 110°. Ce ne sont pas du tout les mêmes dessins de carène. Le ratio BMAX /LHT et de 0,247 pour le Swan 65 et de 0,310 pour l'IMOCA, montrant ainsi que les IMOCA sont beaucoup plus orientés en stabilité de forme. En fait la règle IOR joue un rôle régulateur et sécuritaire. D'ailleurs jusqu'en 1997, les règlements de sécurité (en régate offshore) stipulent que « les bateaux doivent être auto-redressant », « Self-Righting » en anglais.



L'ambiguïté porte sur la notion « d'auto-redressabilité » pour un voilier. Dans l'esprit de l'époque, « auto-redressant » signifie que l'on se redresse systématiquement suite d'une « mise au tapis » (je préfère l'expression « Knock Down » le mât dans l'eau (90° de gîte ou à l'extrême un peu plus). C'est ce qui arrivera d'ailleurs à plusieurs bateaux durant la traversée de l'Indien et du Pacifique lors de l'édition 73 de la première Whitbread. Mais ces bateaux IOR ne sont évidemment pas « auto-redressant ». Si l'angle de gîte dépassait l'Avs, ce qui se traduirait par le chavirage, pour se trouver en position « Capsized » (180°). Ils resteraient alors à l'envers.

D'ailleurs en position « Capsize », ils couleraient assez rapidement, puisque qu'ils sont pratiquement dépourvus de cloisonnements étanches. A cause de cette ambiguïté sur l'expression « auto-redressant », on pense qu'un bateau n'atteint jamais l'Avs fatidique qui le conduit au « Capsize ». Alors, lorsque les règles de course s'affranchissent de l'IOR (pour le BOC Challenge), les architectes sachant qu'une grande partie du parcours se fait au portant, insufflent progressivement un peu plus de stabilité de forme que la « norme IOR » ne l'autorisait (et par conséquent moins de stabilité de poids) afin de dessiner des bateaux beaucoup plus larges et plus légers à longueur identique et surtout qui planent et supportent plus de voilure. En corollaire, la hauteur de francs-bords diminue, les roofs se réduisent, les ponts deviennent plats. Diminuer le poids dans les hauts permet la diminution des déplacements. La largeur des bateaux augmentant, notamment à l'arrière, les doubles safrans angulés apparaissent afin d'être verticaux à la gîte de navigation.

C-DANS LE VIF DU SUJET

Le BOC Challenge de 1983/84 sera donc la première réelle course en solitaire autour du monde avec escales. Philippe Jeantot fait dessiner par Guy Ribadeau-Dumas un sloop en alu de 17m avec un BMAX de 4,55 m, un tirant d'eau de 3m, un déplacement de 15 tonnes et 2 ballasts de 1500 litres.

Philippe Jeantot survole les 4 étapes et gagne en 159 jours devant, il est vrai, des dessins plus conventionnels.

Pour la deuxième édition (1986/87) Jeantot demande un nouveau bateau, toujours à Guy Ribadeau-Dumas. Le déplacement reste dans les 15 tonnes, mais pour 18,28 m, 5,10 m de largeur et 3.30 m de tirant d'eau. Le bateau possède aussi un ballast liquide de 2 tonnes. Il gagne de nouveau avec un temps cumulé de 134 jours, soit 25 jours de moins qu'en 1982. Le deuxième, Titouan Lamazou, arrive 3 jours après, et Jean-Yves Terlain, troisième 12 jours plus tard.

Le premier Vendée Globe

Pour sa première édition en 1989, la course non-stop en solitaire autour du monde s'appelle le Vendée Challenge. Se côtoient des bateaux de pointe du BOC, de nouveaux dessins dans le même esprit, et un vétéran : le Pen Duick III skippé par Jean-François Coste. Le bateau d'Alain Gautier (plan Finot-Conq) préfigure le plus par son design - pont plat, roof minimal, tableau arrière droit et large (95% du BMAX), francs-bords bas, grande largeur (5,80m) - ce que seront les futurs IMOCA de la première génération. Mais on reste encore sur un

déplacement de 13/14 tonnes, un tirant d'eau de 3,80 m sans bulbe et une quille fixe.

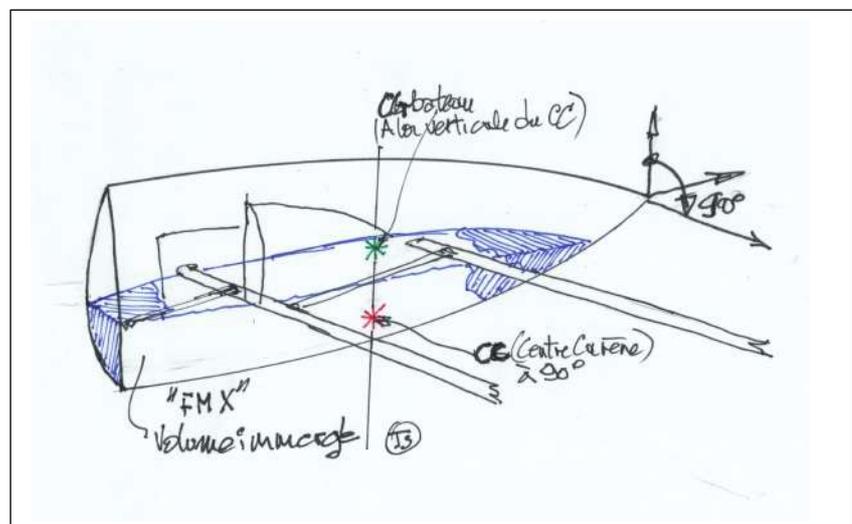
Reste que l'incident de survenu en décembre à Philippe Poupon à bord de son FM X interroge. Avant le départ, l'UNCL en responsabilité du règlement technique, avait repris la prescription initiée par le BOC : à savoir que sous l'effet des ballasts (il n'y a pas encore de quille pendulaire en 1989), la gîte maximale autorisée serait limitée à 10°. Cette prescription s'appuyait sur deux fondements : le premier était d'éviter qu'un skipper se retrouve avec un bateau pris à contre toutes voiles bordées (les pilotes automatiques étaient souvent volages) avec une gîte trop importante (celle produite par les voiles plus celle des ballasts qui se trouvent alors sous le vent), le second découlait des bases livrées relatives aux calculs de stabilité modifiés par le ballastage latéral.

La jauge de ces bateaux (la classe IMOCA n'existait pas encore) se limite donc, pour le départ en 1989 à trois prescriptions obligatoires suivantes :

- Longueur (comprise entre 50 et 60' soit 15,24 m à 18,28 m)
- Tirant d'eau (4,5 m)
- Gîte sous l'effet des ballasts limitée à 10°
- Longueur des dépassements (bout dehors + queue de malet ou bôme) limitée à 1,82m.
- Cloisonnements intérieurs en plusieurs volumes étanches conseillés.

Remarque : les trappes de sortie sur le tableau arrière ne sont encore pas imposées.

Beaucoup de choses seront écrites sur le « chavirage » de Philippe Poupon ». Il apparaît que l'incident s'est produit avec les ballasts au vent remplis, ce qui diminue l'Avs de quelques 10 à 12°. Dans cette configuration, alors que l'Avs d'origine (sans le



gréement d'artimon) était prévu vers 110°, la stabilité s'est trouvée très dégradée lorsque l'artimon sera ajouté. Elle sera évaluée à un Avs de 90/95°, ce que confirment les photos du bateau couché. En fait, la dégradation de la stabilité depuis l'étude d'origine (Avs 110°) a progressé insidieusement. Le CG remonte cm après cm au fur et à mesure du chargement du bateau et des

modifications, sachant que tout ce qui ajouté se trouve à 90% au-dessus de la flottaison... En 1989, les moyens d'analyses de la stabilité étaient loin d'être ceux que l'on aura 10 ans plus tard (VG 2000).

Rapidement après la fin du premier Vendée Globe, il y aura la troisième édition du BOC Challenge en 1990/91. Deux nouveaux bateaux exploiteront encore plus ces nouvelles idées d'architecture. Ils seront dessinés par JM Finot.

Toutefois on reste malgré tout dans des déplacements assez lourds (11 à 15 tonnes) tout en étant très larges et équipés de ballasts latéraux. Ces deux bateaux se classent 1^{er} et 2^{ème} (Christophe Augin et Alain Gautier). Philippe Jeantot termine 3^{ème}. Les temps de course passent respectivement à 120/122 /129 jours.

La nouvelle tendance se dessine

Pour cette deuxième édition (1992/93) du Vendée Globe et suite à l'incident de Philippe Poupon, il est imposé aux architectes d'avoir un GZ minimal de 0.4 m pour 90° de gîte. Vu les plans de voilure de l'époque et les déplacements assez importants des bateaux qui fournissent de la stabilité de poids, on pense qu'avec cette prescription l'angle Avs atteindra les 120°. Toutefois en 90/91 (préparation des règlements pour le VG 92/93), on est encore très « pauvres » à la fois en moyen de calcul numérique (programme dédié à l'architecture navale) notamment pour l'intégration des ballasts dans la stabilité et en compatibilité des échanges des fichiers informatiques. Il y aura encore 50% d'abandons lors de ce deuxième VG. On déplore la disparition de Nigel Burgess puis celle de Mike Plant survenue au NE des Bermudes lors de son voyage⁷ en solitaire entre les Antilles et les Sables d'Olonne. Toutefois, on ne relève pas de problème de stabilité mais essentiellement des soucis techniques, quelque fois surprenant comme le délaminage de la coque du bateau de Loïck Peyron. Si la tendance architecturale des futurs IMOCA se dessine, elle n'est toutefois pas flagrante. Certes le nouveau bateau en composite fabriqué par CDK (l'ancien était en aluminium) pour Alain Gautier (Bagages Superior) s'impose, mais c'est un bateau étroit (Helvim à VDH) qui prend la deuxième place suite au démâtage en fin de course de Philippe Poupon. « Bagages » reprend les idées du bateau du premier VG avec en plus les enseignements du dernier BOC. Le poids de la coque a diminué de près de 2 tonnes (le déplacement au départ est 10.5/11T). Le bulbe approche les 3,2T avec un voile de quille de 900 kg en carbone. On note qu'Alain Gautier privilégie le gréement de Ketch comme

⁷ Le bateau, très inspiré des plans de JM Finot en plus extrême, sera retrouvé chaviré (Capsize) vers les Açores, sans son bulbe de quille. Il apparaîtra que le bulbe en plomb de 3 tonnes était assemblé par 5 vis verticales vissées dans le voile de quille en monolithique carbone (!!!). Les errances sur les voiles de quille commençaient... Mais ce drame, s'étant produit hors course, occultera les problèmes liés à l'utilisation du carbone pour la fabrication du voile de quille.

Fleury Michon. Les surfaces au près et au portant sont identiques à ce qui se pratique encore aujourd'hui (300 m² et 600 m²) mais les rendements aérodynamiques sont inférieurs (gréement Ketch). Les mâts en carbone sont assez nouveaux et surtout les nuances de tissus en carbone n'offrent pas les caractéristiques mécaniques que l'on connaît depuis une dizaine d'années. D'autres bateaux, comme celui de Yves Parlier, confirment une tendance extrême : pont plat, roof minimal, grande largeur (BMAX 5,90m), grand tirant d'eau (4,20m).

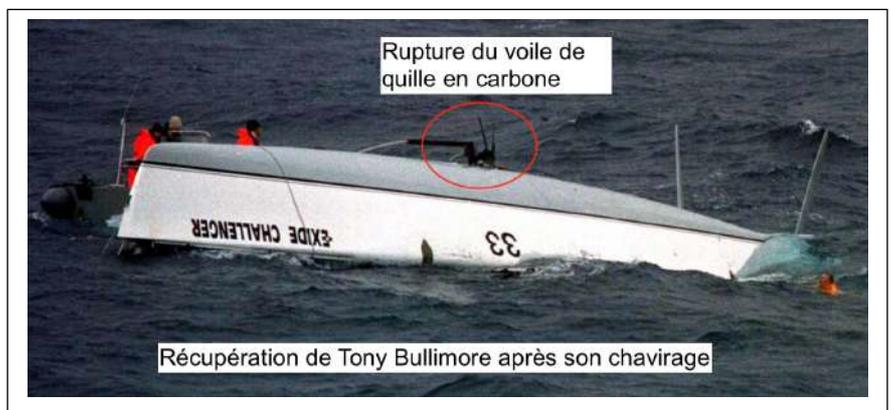
Le 3^{ème} VG invite à une grande remise en question

Au départ du troisième VG (96/97), on se posait la question des rencontres hasardeuses (growlers, iceberg, mauvais temps...) lors du tour de l'Antarctique. La réalité sera tout autre. Ce sont les problèmes de stabilité qui réapparaissent dès le début de l'Océan Indien et cela malgré le fait d'avoir imposé un Gz à 90° de gîte supérieur à 0,4m dès le VG de 92/93. En plus, comme il n'y a pas eu d'incident de stabilité lors du 2^{ème} Vendée Globe suite à cette prescription, une certaine confiance s'était installée, bien que nous fussions conscients que si un bateau se retourne il a toutes chances de rester à 180°.

Sur 16 bateaux au départ, une petite douzaine sont récents. Les voiliers flirtent maintenant avec les 9 tonnes de déplacement. Les matériaux à hautes caractéristiques mécaniques s'implantent et remplacent le composite Verre/Polyester. La quille pendulaire a fait ses débuts en 1993 (Plan Jean Berret pour Isabelle Autissier – BOC Challenge), le cloisonnement intérieur étanche, mieux décrit, devient obligatoire, comme la trappe d'évacuation sur le tableau arrière.

Cette édition du VG est techniquement catastrophique avec plusieurs chavirages (4 bateaux chavirent si on compte celui de Raphaël Dinelli, qui était hors course) dont un

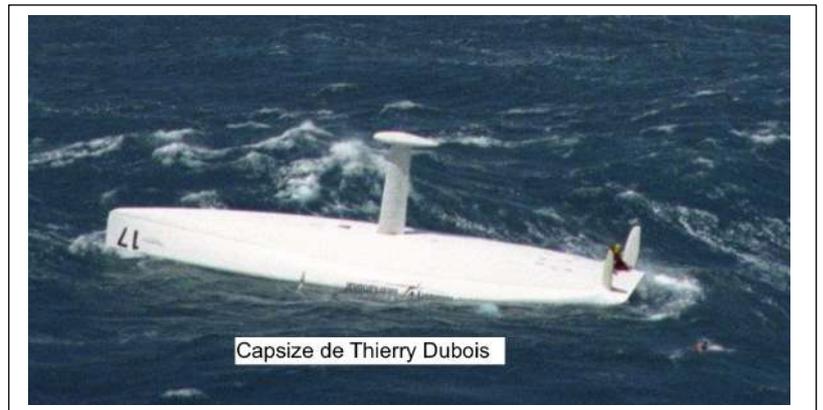
conduira à la disparition d'un concurrent (Gerry Roufs). On a toutefois la confirmation que les bateaux flottent à l'envers et que la mer si elle contribue au chavirage, peut aussi ramener dans certain cas



un bateau à l'endroit, malgré sa quille fixe. S'ajoutent des ruptures de mèches de safran, des ruptures de voiles de quille fabriqués en composite carbone, des problèmes de structure. Il faut se rendre à l'évidence, la recherche de vitesse,

de puissance (raideur à la toile) conduit les architectes et les skippers à des solutions architecturales et techniques de plus en plus hasardeuses qui génèrent des incidents et des accidents.

Au lendemain de ce périlleux VG, une analyse approfondie est engagée par tous les acteurs. Elle conduit à imposer des critères de plus en plus draconiens notamment en termes de stabilité (prescriptions et surtout pour la première fois des contrôles et des calculs⁸ de vérification). Ces



décisions sont confortées par le chavirage en 1998 d'Isabelle Autissier durant le 4^{ème} BOC Challenge, par vent maniable et une mer très formée : le bateau reste à l'envers et cela malgré de basculement de la quille pendulaire pour le redresser.

Cet accident permet de vérifier que l'utilisation d'un équipement (quille pendulaire) ne suffit pas à lui seul pour ramener à l'endroit un bateau qui a chaviré. Il est nécessaire que l'analyse de la résistance au chavirage, comme celle du retour à la position à l'endroit, soit globalement calculée et vérifiée avant le départ.

D – LES TEMPS MODERNES

1/ Des prescriptions associées à des contrôles techniques s'imposent.

La période 1997/2000, c'est-à-dire entre la fin du 3^{ème} Vendée Globe et le suivant, apparaît comme la charnière entre deux époques puisque les coureurs, les architectes, l'organisateur et ses conseillers techniques (UNCL et IMOCA) prennent conscience que les bateaux chavirent comme des dériveurs et qu'ils restent à l'envers. Les personnes en charge de qualifier l'éligibilité des bateaux par rapport aux règlements techniques imposés, s'interrogent sur l'évolution des dessins et surtout sur l'inadéquation des règles techniques existantes avec ces évolutions.

Mais comme toujours dans les sports mécaniques, la nouveauté, les gains spectaculaires de vitesse, l'utilisation de nouvelles techniques font écran à la dure réalité des lois physiques et des calculs. Il faut aussi inclure les difficultés produites par le décalage de 3 ou 4 ans entre la période de conception, de

⁸ Possible avec la généralisation des ordinateurs personnels et des logiciels d'architectures navales.

construction, de recherche de partenaires pour participer à un Vendée Globe et les évènements qui se produisent en navigation.

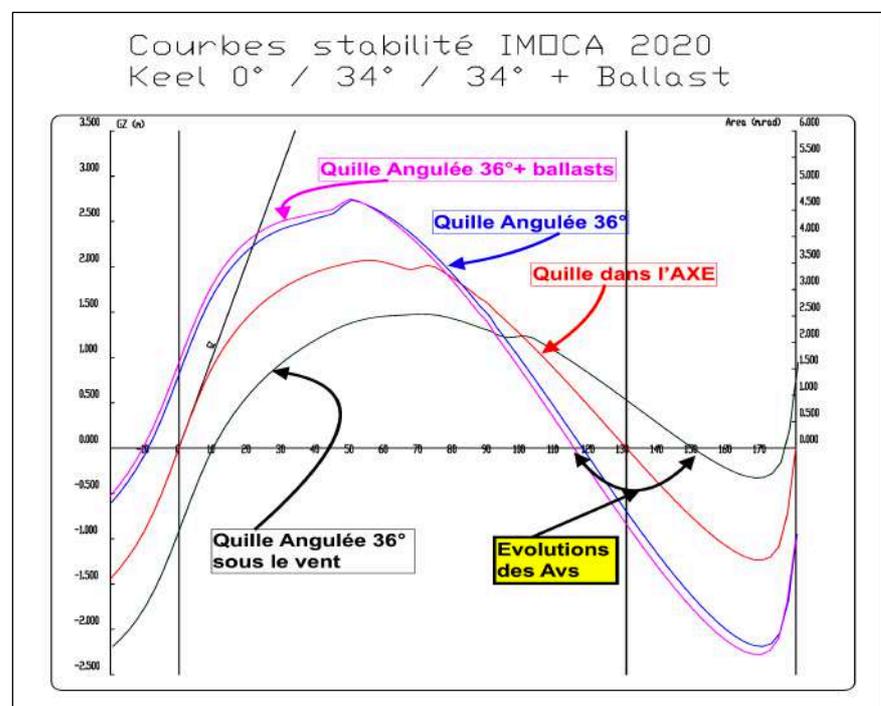
Les évènements de fin 1996 et début 97 concernent des bateaux conçus au mieux en 1994 avec des moyens de calculs (ordinateurs), souvent incompatibles techniquement entre eux et des algorithmes moins performants à cause des capacités mémoires des ordinateurs.

Deux acteurs agiront : l'UNCL⁹ qui œuvre depuis 1978 pour la FICO¹⁰ afin d'établir les règlements techniques pour les voiliers participant à des courses OPEN (monocoques et multicoques) et l'IMOCA¹¹ créée par les skippers. Pour le Vendée Globe 2000/2001 les deux règles techniques IMOCA et FICO sont utilisées pour

l'agrément des bateaux. Sur les 24 bateaux inscrits, 17 seront conformes au règlement FICO et 7 au règlement IMOCA. Sur le fond, ces deux règlements sont très voisins, ils imposent tous les deux un angle Avs, quille dans l'axe, voisin de 125° (en fait il y a deux angles, 127.5° et 125°, possibles pour les calculs : un qui autorise la grand-voile

à poste, l'autre qui l'exclut). La seule différence porte sur l'appréciation de l'aptitude à revenir de la position « Capsized » (180°).

L'IMOCA impose le test réel et spectaculaire à 180° (sans le mât) alors que la FICO gère la validation de cette prescription par un calcul de stabilité et un ratio de 1 à 5 entre la surface positive située sous la courbe de stabilité (entre la gîte de 0° à l'Avs) et la surface négative comprise dans la partie de la courbe de stabilité située sous l'axe des abscisses (de l'Avs à 180°). En d'autres mots l'énergie positive doit être 5 fois supérieure à l'énergie négative. L'IMOCA

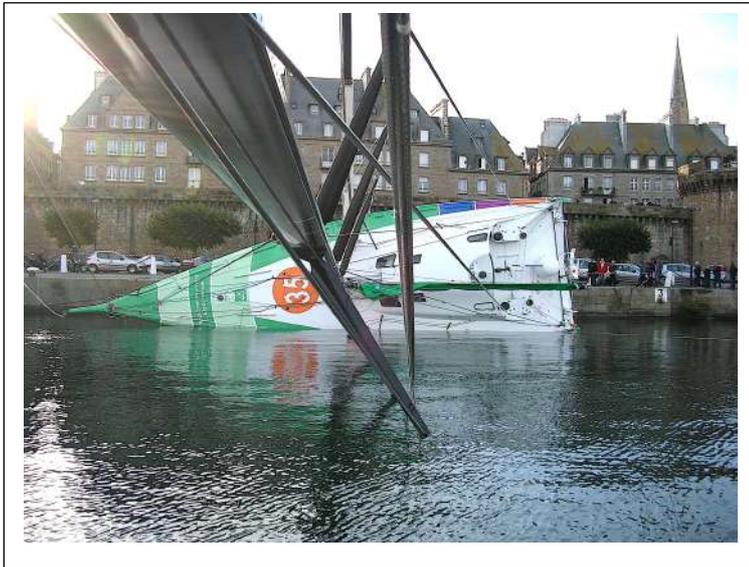


⁹ UNCL : Union Nationale pour la Course au Large

¹⁰ Forum internationale de la Course Océanique

¹¹ Constituée en 1991, la Classe IMOCA ne sera reconnue par l'ISAF qu'en 1998.

abandonnera en 2015 ce test réel à 180° et le remplacera par une simulation permanente, par calculs, tout au long de la vie et des évolutions techniques de chaque bateau.



2/ Les optimisations des bateaux deviennent plus complexes.

Les prescriptions en termes de stabilité conduisent inévitablement les architectes à s'approcher des limites autorisées. C'est une évidence que concevoir un bateau avec un Avs de 135°, alors que la « ligne jaune est fixée à 125° », n'a aucun intérêt en termes de régates car cela impose de descendre le CG final du bateau. Ce qui revient à, soit diminuer le poids de la coque et du gréement, soit augmenter la masse du bulbe, mais alors on augmente le déplacement. Chaque option possède un revers, la première, risque de fragiliser le bateau, la deuxième, diminue son potentiel de vitesse. Les recherches s'orientent surtout vers une augmentation de la surface de voilure, une diminution de la trainée dans l'eau, un bateau le plus « raide » possible aux allures de puissance, notamment au large, comme souvent autour du monde, cap à l'Est.

Les optimisations concernent :

- Les matériaux et les échantillonnages
- Le tirant d'air (surface de voilure)
- La limite en termes de francs-bords
- Le volume du roof optimal (masse minimale)
- La masse du voile de quille minimale
- La masse du bulbe minimale et sa trainée la plus favorable.
- Une forme de carène qui permet de limiter la largeur des bateaux, donc la masse des coques (naissance du bouchain de coque).

En 2004, les quilles pendulaires sont généralisées, les architectes s'orientent alors vers l'optimisation de l'angle d'angulation afin d'obtenir le plus de couple de redressement dans le range usuel de navigation. Rappelons que plus le couple de redressement est important aux « petits angles », 20°, 30° de gîte, quille angulée, plus l'Avs diminue. Ces optimisations nous amènent à constater que lorsque la quille est angulée, la courbe de stabilité se rapproche de plus en plus de l'Avs de Ph Poupon sur Fleury Michon X en 1989 qui avait une quille fixe !!!

L'efficacité de la quille pendulaire (par rapport aux ballasts) est incontestable, le moment de redressement croît sans augmentation du déplacement du bateau, mais simultanément l'Avs diminue pour flirter avec des zones dangereuses proches de 105°, 100° (peut-être moins) ... On revit les affres des scénarii « Poupon » ou d'autres similaires.

E- La création de l'AVS worst case¹² (Avs WC).

Pour contrer ce risque il devient impératif d'imposer un « Avs Worst Case ». Les quilles pendulaires lorsque qu'elles sont angulées au vent, augmentent le moment de redressement, c'est l'objectif recherché, mais génèrent la diminution de l'angle de chavirage (Avs). Ainsi un Avs de 125°, quille dans l'axe (la mesure imposée) se met à flirter avec les 105° lorsque la quille est angulée à 40°. L'Avs WC est une donnée fondamentale de la jauge IMOCA. Il s'obtient par un calcul hydrostatique. Pour le VG 2008 il est fixé à 108° par l'IMOCA. La mise en place de l'Avs WC, pose peu de difficultés. Il amorce même indirectement la résolution des problèmes récurrents de fragilité qui apparaissent sur les voiles de quille. En fixant, sans l'écrire, une limite au moment de redressement il bloque de facto leur allégement néfaste et dangereux. En 2015, l'Avs WC passe à 110° : une décision résultant de la monotypie des voiles de quille dont le poids avoisine les 900 kg.

3/ VG 2004/VG 2008 : Beaucoup de casse.

Le bilan technique du VG2004/2005 met en évidence que les problèmes de quilles restent toujours récurrents. C'est aussi vrai pour les safrans et les mâts qui apparaissent comme les éléments fragiles des bateaux.

Lors de l'édition de 2008/2009 on comptabilise 12 bateaux classés et 18 abandons dont 17 pour problèmes techniques majeurs :

- 3 pour des problèmes de quille
- 2 endommagés après avoir été couchés violemment par une déferlante (sans pour autant chavirer)
- 6 pour démâtage ou problèmes de gréement

¹² Worst case = le pire des cas

- 1 pour la casse de son safran.
- Les autres bateaux ont connu des difficultés diverses mais ingérables.

Les vitesses des bateaux progressent mais les bateaux manquent énormément de fiabilité, de résilience. Certes il y a les chocs avec des objets semi-immergés, mais les détachements de bulbe, les casses de tête de quille, d'axe de rotation, de nez de vérin, de voile de quille, de mât, montrent que les optimisations destinées à améliorer les performances se font au détriment de la fiabilité générale.

Par exemple, pendant près de dix ans, les teams expérimenteront toutes les possibilités afin d'optimiser le binôme voile de quille/bulbe :

- Carbone avec stratification en moule sous vide
- Carbone à partir de barreaux juxtaposés et assemblés par collage
- Carbone avec casques en tôles épaisses d'acier inoxydable pour l'accrochage du vérin et de l'axe de rotation
- Tôles d'acier assemblées en mécano-soudé
- Fonte GS moulée en sable
- Acier forgé
- Profilés forgés en titane et soudés en vis-à-vis par bombardement électronique sous vide

Le carbone a le vent en poupe dans tous les teams. Il apparait comme le matériau miracle.

Comparaison des composites à base de fibres, des aciers et alliages			
Matériaux	Résistance à la traction (Gpa)	Module d'Élasticité (Gpa)	Densité
Carbone	3.5	230.0	1.75
Kevlar	3.6	60.0	1.44
Titane	1.1	110.0	4.3
Acier	1.1 à 0.55	210.0	7.8
Fonte GS	0.5 à 0.5	210.0	7.8
AG4MC	0.20	70.0	2.7

Effectivement les performances du carbone, 3.5 Gpa (soit 3 500 daN/mm²) et ajoutées à un très important module d'élasticité pour une densité de 1.75 sont impressionnantes. Utilisé pour fabriquer un voile de quille sa déformation élastique reste faible lors des sollicitations en flexion.

Ensuite vient l'acier à hautes caractéristiques mécaniques, 1.1 Gpa (1 100 DaN/mm²) et un module d'élasticité sensiblement égal à celui du carbone, mais avec une densité presque 5 fois supérieure à celle du carbone. Un voile de quille c'est 150 dm³ (0.150 m³) de matière soit 1 170 kg pour l'acier et seulement 270 kg pour le carbone. L'utilisation du carbone impose par contre des échantillonnages localement plus importants, principalement dans les zones sensibles comme le passage de l'axe de rotation, l'accrochage du vérin et du bulbe. Le volume de carbone devient ainsi proche de 200 dm³, soit une masse totale de 300 à 350 kg. Néanmoins le bilan apparaît donc nettement en faveur du carbone, avec 700 kg de « gain » par rapport à l'acier. L'acier possède toutefois d'autres ressources, notamment avec la construction en mécano-soudée (les fameuses tôles en Veldox ou équivalent). En mécano-soudé, on concentre la matière là où il y a des sollicitations mécaniques : ce qui conduit à concevoir un voile de quille creux (Vincent Riou stockait le gasoil dans son voile de quille !). Dans ces conditions on arrive à une masse du voile de quille de 500 à 550 kg. Le delta avec le carbone diminue. La sophistication relative à la mise en œuvre du carbone fait pencher de nouveau la balance du côté de l'acier. Se posent alors les opérations de soudage et leurs conséquences sur l'évolution métallurgique de l'acier. Les opérations de soudage sont très bien maîtrisées (normes, soudeurs très qualifiés), mais le chauffage très localisé de l'ordre de 900°C crée des tensions internes dans le métal qu'il faut supprimer par un recuit de détensionnement. Cette opération qui se fait à 600°C, elle impose que l'on dispose d'un four de près de 5 m de capacité (voile de quille IMOCA) et surtout du temps de refroidissement : ce qui se révèle être une contrainte. Le risque de fissurage est aussi très élevé.

F – L'ÂGE DE RAISON

L'IMOCA, les coureurs, les sponsors, l'organisateur... pensent alors à un bateau monotype. L'idée est séduisante, puisque qu'elle permet de concevoir un bateau « solide », certes plus lourd, certes un peu moins performant, mais beaucoup plus fiable. Tous les skippers sont alors à armes égales : c'est le modèle français du Figaro. Mais ce concept est très complexe à mettre en œuvre.

Le Vendée Globe, par son histoire, est devenu un laboratoire technique permanent qui utilise des ingénieurs, des techniciens de fabrication de haut niveau regroupés autour d'un skipper. Ce qui est antinomique avec l'idée de monotypie.

L'IMOCA adopte alors la solution intelligente (peut-être en s'inspirant de la Formule 1) qui consiste à imposer certaines éléments du bateau « monotypes ». Ce seront les voiles de quille et les mâts.

Par cette décision, l'IMOCA fiabilise la construction des bateaux.

En résumé, un IMOCA « moderne » c'est :

- Un voile de quille avec son axe de vélin livré fini prêt à peindre.
- Un descriptif technique impose l'ingénierie relative à la rotation de la quille.
- Un bulbe dont la masse est limitée à 3000 kg (dessin libre). Il n'y a pas de masse minimale imposée car le « 180° » bloque toute velléité d'utiliser un bulbe très léger.
- Une angulation de quille maxi 38°.
- Un tirant d'air de 29 mètres.
- Des ballasts limités à 4 et en volumes.
- Un « Avs WC » minimal de 110°.
- Enfin un ratio des surfaces positives et négatives de la courbe de stabilité de 5 à 1.
- Les prescriptions liées à la stabilité sont simplifiées, ainsi le test à 180°, spectaculaire, qui était réalisé qu'une seule fois (sans le mât), est remplacé par un calcul à chaque étape de la vie du bateau
Et par logique déductive de l'ensemble des nouvelles prescriptions imposées, la limite de la gîte à 10° sous l'effet de la quille et des ballasts, ainsi que l'Avs à 125° (quille dans l'axe) sont aussi supprimés. Ces deux items devenaient redondants avec les autres prescriptions.

Pour information, la fabrication du mât est confiée par contrat à Lorima.

Pour la quille, c'est plus compliqué :

De toutes les tentatives de conceptions et de mode de fabrications du voile de quille, c'est « le forgeron » qui l'emportera. Le voile de quille sera donc en forgé à partir d'un lopin d'acier puis mis en forme finale par usinage.

- Le dessin est produit sous le contrôle de l'IMOCA
- Le matériau est un acier inox (APX4)¹³ produit par Aubert & Duval.
- Les opérations de forgeage sont réalisées en France
- L'usinage en commande numérique 4 ou 5 axes est réalisé par la société AMPM (La Motte Achard).

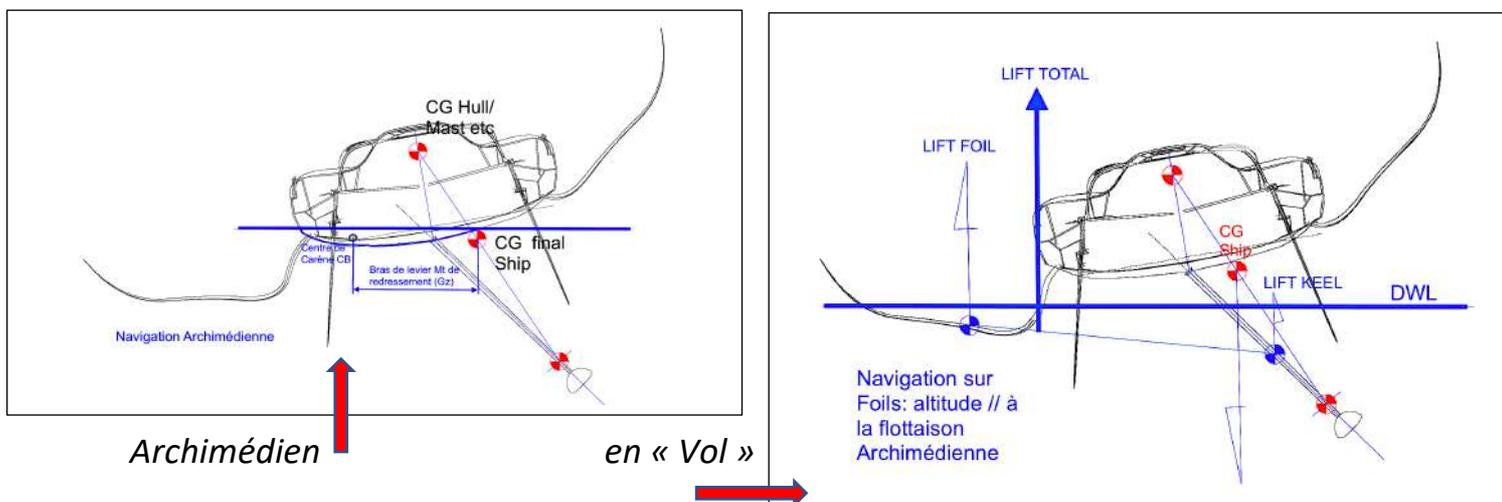
Ainsi, par les décisions de 2015, la Classe IMOCA aboutit à un bateau archimédien hyper performant, beaucoup plus fiable et sécuritaire, tout en laissant aux teams, aux architectes et aux skippers les possibilités d'exprimer leurs talents.

¹³ « APX4 » : Résistance mécanique Rm = 950 Mpa (1.6% chrome, 4% Nickel, 2% Molybdène, 0.06% de Carbone).

G- LES BATEAUX SE REVENT EN ALBATROS...

S'extraire du régime archimédien est un vieux rêve des marins. Les premiers IMOCA à foils apparaissent en 2015. L'idée n'est pas récente, loin de là. Dès le début de l'aviation, des « illuminés » ont réussi à naviguer au-dessus de l'eau, portés par des plans sustentateurs (ce que l'on nommera les Foils).

Voler au-dessus de l'eau sous-entend qu'on abandonne les lois archimédiennes, la notion de Centre de carène, de surface mouillée, de longueur à la flottaison, de courbes de stabilité, pour entrer dans un autre monde, celui du « Vol » où on parle de Centre de portance, de portance, de profil de foil, d'angle d'incidence, de décrochage, de cavitation, ventilation, de pilotage en 3 dimensions...



Mais avant de « Voler » encore faut-il décoller afin d'extraire le bateau du domaine archimédien et pour cela il faut disposer de beaucoup de puissance.

La portance (force qui va soulever le bateau : Lift) est proportionnelle à :

- La masse volumique de l'eau (1025 kg/m³)
- Au coefficient de portance du profil du foil (de l'ordre de 0.3)
- La surface projetée du foil sur le plan horizontal de vol
- La vitesse du bateau élevée à la puissance 2.

Soit :

$$\text{Portance (LIFT)} = 0.5 * \text{masse volumique de l'eau} * C_z * \text{surface foil} * \text{vitesse}^2$$

Envisager de faire voler un monocoque IMOCA de 8 500 kg de déplacement impose que les plans sustentateurs (le foil sous le vent et la quille pendulaire au vent) produisent un Lift (poussée verticale) de plus de 83 000 Newtons (l'équivalent de 8 500 Kg en unité plus commune).

Dans la pratique, un Foiler (de type IMOCA) se comporte comme un avion qui roule (régime archimédien) sur la piste avant de décoller pour passer en régime Vol en étant sustenté sur ses ailes et stabilisé par son empennage arrière. On comprend très bien que la vitesse est le facteur primordial car les autres

paramètres sont pratiquement figés. Le seul sur lequel le skipper peut agir est le coefficient de portance en augmentant l'angle d'incidence du foil : le « Rake » (les variations du Rake sont de 2 à 6°). Pour la phase de décollage le pilote d'un avion sort les volets de bord de fuite afin d'augmenter la surface de l'aile et la cambrure de son profil et donc sa portance (on ne peut pas modifier directement le Rake d'une aile d'avion). Il est obligé de faire cette opération car la puissance (donc la vitesse) de l'avion est limitée.

Sur un voilier, c'est d'autant plus complexe que la puissance disponible qui dépend du vent apparent et de la surface de voilure est difficilement modulable. Un exemple simple : si le voilier possède une surface de voiles lui permettant de décoller par 15 nœuds de vent réel¹⁴, dès qu'il sera sur ses foils sa vitesse va littéralement exploser pour atteindre 25, 30, 35 nœuds (c'est l'objectif de la navigation sur foils). Cela se traduit immédiatement par un vent apparent de plus en plus refusant et largement supérieur au vent réel et par une surpuissance de son plan de voilure initial.

Quelques précisions sur la mobilité d'un foil.

Définitions et actions

(Ox = axe transversal / Oy = axe vertical / Oz = axe longitudinal)

Le déploiement du foil dans son puits est réalisé par translation entre deux cales qui possèdent des degrés de liberté.

SHAFT : partie plus ou moins verticale en sortie de la coque

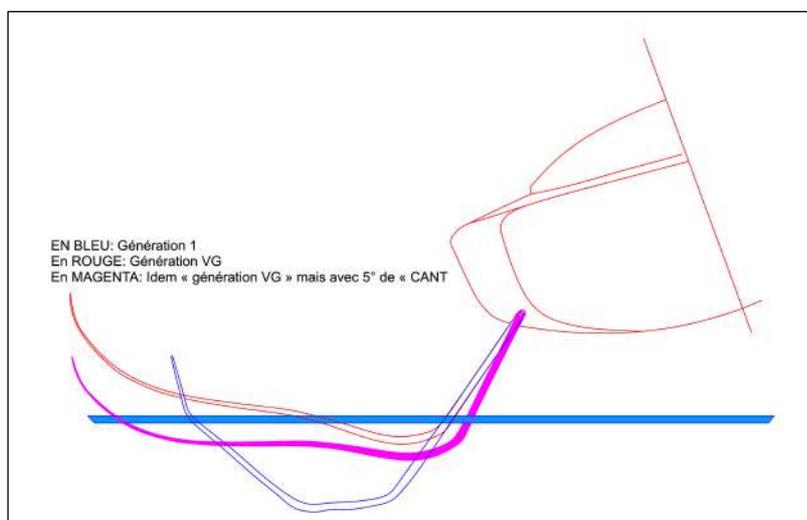
ELBOW : coude de liaison entre le SHAFT et le TIP

TIP : partie pratiquement horizontale du foil (fournit 90% du lift)

RAKE : Rotation Ox = Réglage de l'angle d'incidence

TILT : Rotation Oy = Réglage de l'angle d'incidence du SHAFT (sans modifier le RAKE)

CANT : Rotation Oz = Réglage de l'immersion du Foil sans modifier les incidences



¹⁴ A la conception du bateau, le Rake, la surface des foils, la surface des voiles sont calculés pour produire un Lift supérieur à la masse du bateau dès 15 nœuds de vent réel.

Après le décollage, il faut contrôler la trajectoire dans les 3 dimensions (le bateau archimédien évolue en 2 dimensions, ce qui est beaucoup plus simple) afin de trouver une assiette, qui dans l'idéal devrait être la plus horizontale possible dans le but de diminuer la traînée de la coque dans l'air, tout en contrôlant la trajectoire par rapport au vent.

Un IMOCA « vole » à une altitude de 0.3 à 0.9 mètre (ordre de grandeur).

Pour évoluer en 3 dimensions, le skipper doit contrôler :

- La barre (le cap).
- La puissance fournie par le plan de voilure (la vitesse).
- La portance produite par les surfaces sustentatrices : Foil + voile de quille (Lift).
- L'assiette longitudinale.

En 2 dimensions, le skipper gère 3 variables : l'angle de barre, les réglages des voiles et l'angulation de la quille.

En 3 dimensions, il faut en théorie ajouter 4 variables : le déploiement du foil, le Rake, le Tilt, le Cant. En réalité il doit être possible de gérer le vol avec uniquement 2 variables. Mais la navigation en 3D représente une attention de pilotage très forte de la part du skipper, attention qui est amplifiée par la vitesse (jusqu'à 15m/s).

Cela sous-entend une réactivité, en présence d'un événement, au-delà des capacités humaines, et dans cet environnement je ne compte pas la fatigue. Seul le pilote automatique (PA) peut gérer ce type de bateau (IMOCA Foiler), de manière continue, c'est-à-dire pour une navigation offshore (24/24).

L'analyse des fonctionnalités, de l'environnement, des contraintes imposées par la Classe IMOCA, auquel sera soumis un PA sera présenté dans un chapitre spécial de cet ouvrage.

H- De la stabilité

L'apparition des foils remet d'actualité la problématique de la stabilité débattue à la fin du siècle dernier sur les IMOCA archimédiens. Quels doivent être les critères de stabilité à prendre en compte lors des phases de vol ou de transitions brutales entre le mode vol et le mode archimédien (dans un sens ou dans l'autre) ? Pas facile d'écrire un protocole. Mais il me paraît évident qu'un crash à 25/30 nœuds du mode vol au mode archimédien avec un enfournement jusqu'au mât, qui se traduit par un centre carène très avancé, une assiette en piqué et une décélération sur quelques secondes sera difficile à sécuriser.

Ajoutons que l'envergure et son corollaire, l'augmentation de la surface sustentatrice des Foils (donc du lift possible) actuellement non encadrés par la

jauges, ressemblent comme deux gouttes d'eau à la problématique des années passées avec la hauteur des mâts ou la raideur à la toile excessive entraînant la diminution de l'Avs. On voit que transformer un voilier qui doit son équilibre aux lois archimédiennes en un engin volant au ras de l'eau dont l'équilibre est régi par des lois physiques totalement différentes, demandera des études approfondies. Les règles imposées par l'IMOCA, notamment en 2015 pour limiter le mode archimédien, devront être amplifiées afin de s'appliquer aux surfaces sustentatrices de ces bateaux, afin de stabiliser le mode Vol pour s'adapter à l'état de mer, ce qui représente sûrement la plus grande difficulté du fait de la faible altitude de vol.

J. SANS (30/10/2020)

