

STABILITE d'un navire

Histoire

L'un des naufrages les plus spectaculaires du 17ième siècle fut celui du navire de guerre suédois, le VASA, construit par le roi Gustave II Adolphe de Suède, entre 1626 et 1628. Le VASA était un trois-mâts de 62 mètres de long, 52 mètres de haut et 11.7 mètres de large. Il déplaçait 1200 Tonnes et embarquait 64 canons. Le 10 aout 1628, lorsque le navire quitta le port pour la première fois, il chavira brusquement, se renversant sur le côté, et coula en l'espace de quelques minutes. Ce naufrage donna lieu à un procès pour en éclaircir la cause. En réalité, c'est une combinaison de différentes circonstances qui avait conduit au naufrage, modification de la taille et des proportions, ajout de canons dans les hauts etc etc.. de sorte que le centre de gravité s'était déplacé progressivement vers le haut, mais beaucoup plus haut que prévu. Pourtant, dans les jours précédents, les "essais de stabilité" de l'époque avaient inquiétés. Ces essais consistaient à faire déplacer rapidement l'équipage d'un bord à l'autre, le navire étant à quai....



Le naufrage du Vasa – Peinture de Nils Stödberg

La notion de stabilité d'un navire en général est très complexe à appréhender. Est-ce sa capacité à gîter le moins possible sous l'effet du vent, de la houle, des vagues, est-ce sa résistance au chavirement, pour évoquer ce paramètre très usuel et très perceptible dès que l'on pose les pieds sur un bateau.

La stabilité représente l'élément principal des qualités marines d'un navire. En d'autres mots, disons que la stabilité est associée à la sécurité mais n'est pas pour autant opposée aux performances du navire.

1. Les Bases & les Références

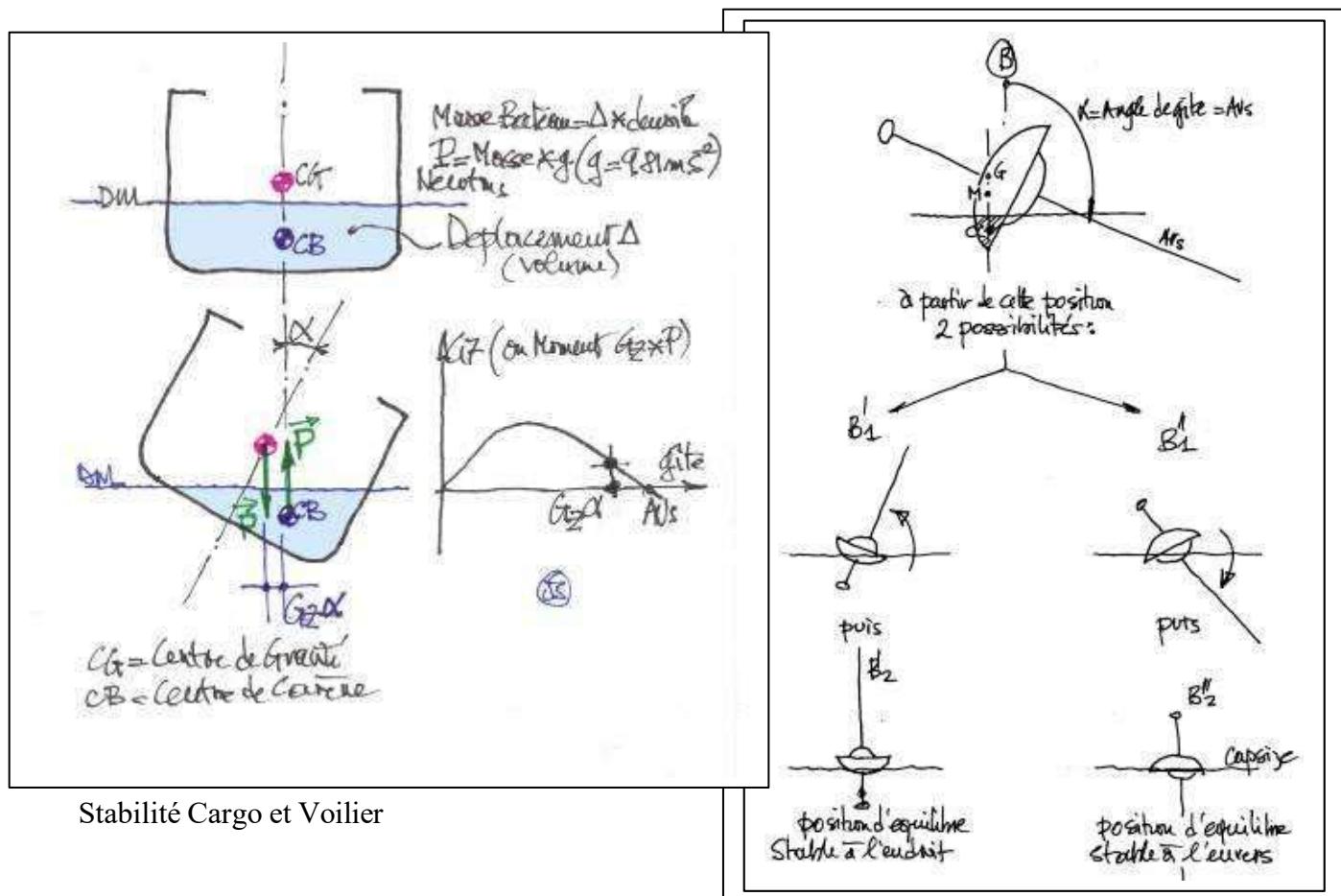
Avant de développer les démonstrations scientifiques, énonçons quelques définitions et références : Prenons l'exemple d'un voilier, car c'est le bateau ou la plage de stabilité est la plus grande et aussi visible mais aussi la plus "palpable".

Tout ce qui est applicable au voilier ne l'est pas pour un cargo, un chalutier, un navire de charge, un ferry. Ces bateaux (exception faite de canot de sauvetage) ne doivent jamais gîter jusqu'à s'approcher de l'angle fatidique de chavirage. Les bureaux d'étude calculent donc ces navires pour que cette situation (chavirage) n'arrive jamais....

Cas du Voilier de plaisance.

- Un voilier possède une position d'équilibre stable¹ au voisinage de 0° "upright" (c'est celle que l'on voit dans les ports, lorsque les navires s'il sont à l'arrêt).
- Tous les voiliers chavirent obligatoirement à un certain angle de gîte, c'est-à-dire qu'il passe de la position « à l'endroit » à la position « à l'envers ».
- Dans le cas d'un voilier, s'il est étanche, ce qui est rare, c'est-à-dire si il n'y a aucune voie d'eau lorsqu'il chavire, ou suffisamment de volume de flottabilité, il trouve une autre position d'équilibre stable à 180° , c'est-à-dire à l'opposé de la position d'équilibre normale (0°).
- Ces deux positions (0° dit « upright ») et (180° dit « capsized ») sont les deux seules positions stables. Entre ces deux positions, toutes les positions angulaires (gîte) sont instables, c'est-à-dire que lorsque l'on abandonne le bateau d'une position angulaire quelconque il revient automatiquement vers la position 0° ou 180° suivant qu'il avait dépassé ou non l'angle ou il chavire (appelé angle Avs).

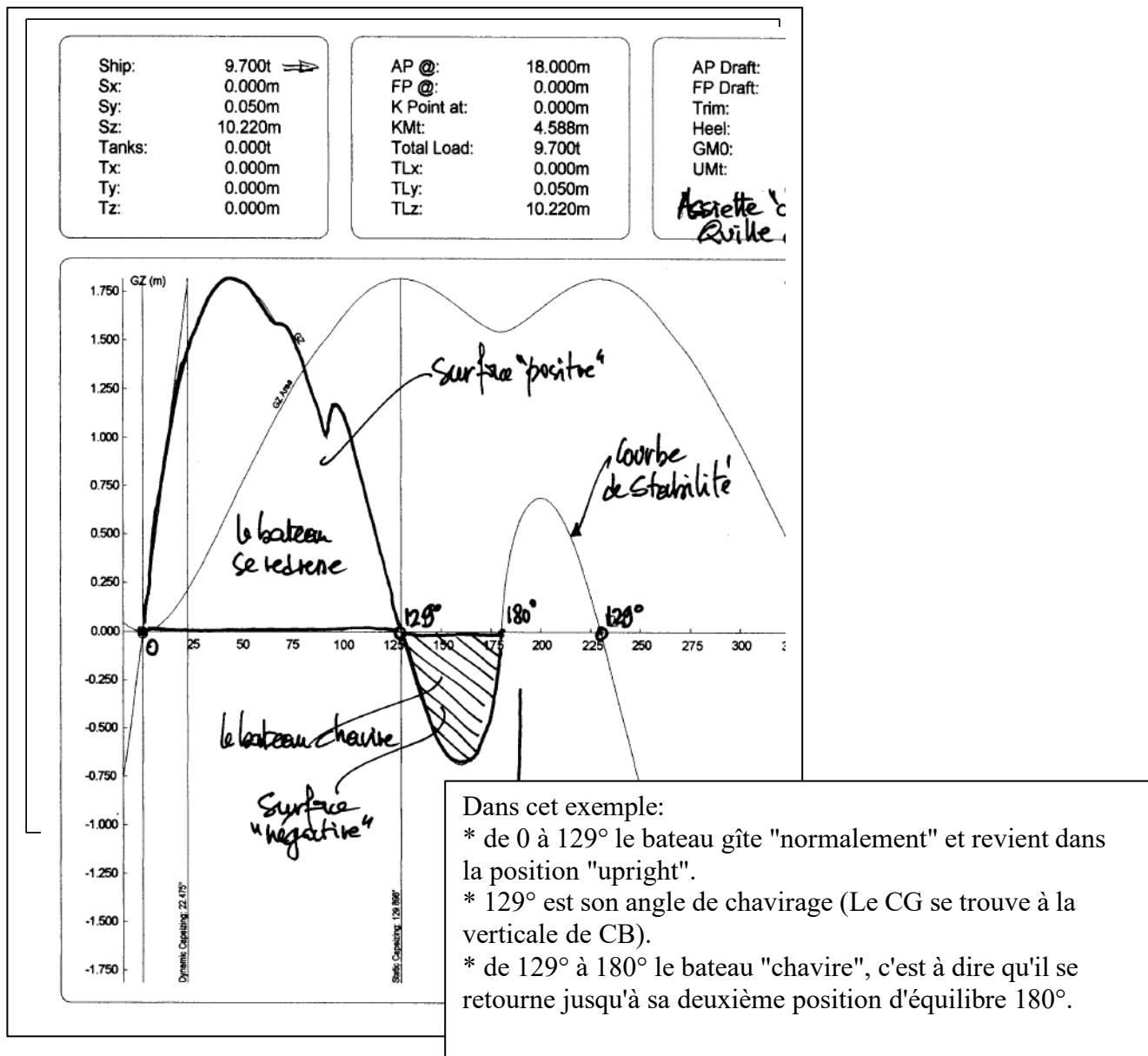
2.



Stabilité Cargo et Voilier

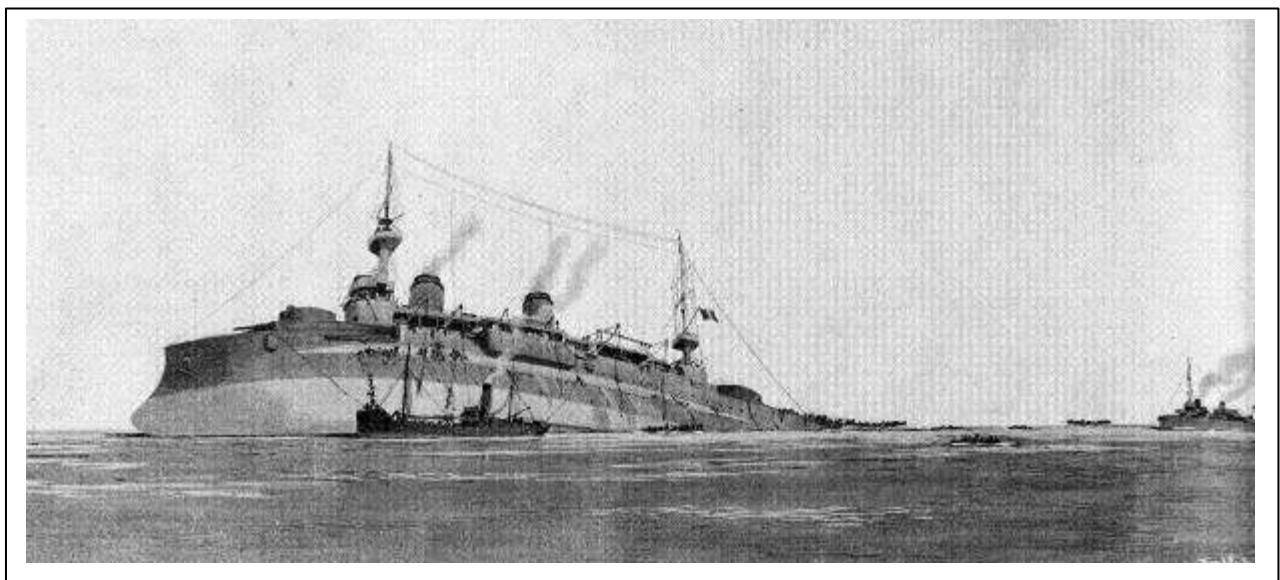
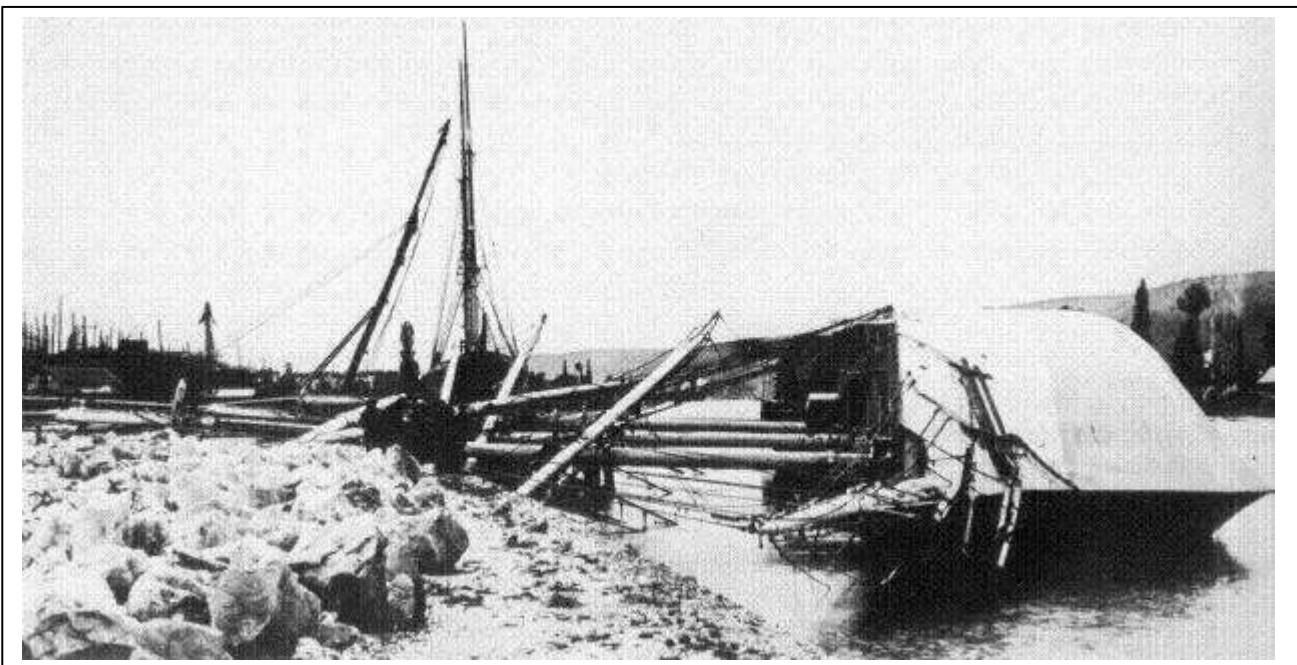
¹ Stable signifiant que si vous écartez de 2° , 10° , 50° , de ($A_{vs} - e$) le voilier de sa position de 0° il revient automatiquement à la position 0° . Le raisonnement est identique pour la position stable de 180° .

Courbe de stabilité Voilier



Quelques chiffres sur le chavirage transversal (ordre de grandeur)

- Un dériveur chavire sensiblement à 80° de gîte
- Un Cargo chavire à 40° de gîte
- Un chalutier chavire à 60° de gîte
- Un trois mats chavirait à 50° de gîte
- Un sandbagger (voilier de la côte est des USA) des années 1865 chavirait à 80° et même moins pour certains dessins.
- Un canot de sauvetage chavire à 160°
- Un voilier des années 70 chavire à 150°
- Un voilier moderne chavire à 120°
- Un multicoque océanique (type Route du Rhum) chavire à 80°
- Un monocoque océanique type IMOCA (Vendée Globe) ne chavire pas avant 127°5.



Ces chiffres correspondent à des valeurs calculées lorsque l'on fait gîter le bateau en « appuyant » sur le mat comme le ferait le vent dans les voiles ou le vent sur la muraille du navire ou les mouvements de la mer ou encore d'autres forces extérieures (chalut, drague etc).

Dans la réalité cette mécanique statique n'existe pas car seule la mécanique dynamique nous environne, c'est-à-dire que l'on doit prendre en compte les forces d'inertie qui dépendent des masses du navire et des accélérations qui leurs sont appliquées.

Cela n'est pas sans effet sur l'angle Avs. Au final l'angle réel de chavirage est toujours plus faible de 5°, voir 10° ou plus par rapport à l'Avs statique.

En d'autres mots, il faut savoir, à titre d'exemple, que sur un multicoque océanique de course, lorsque le mouvement de gîte transversal est enclenché² et que le bateau est à 15 ou 20° de l'angle théorique de chavirage, même en choquant les voiles, le chavirage se produira.

1. A quoi sert la stabilité ?

Il y a plusieurs réponses ou plutôt plusieurs manières de comprendre le terme « Stabilité ». Pour certains, la stabilité se traduit par la raideur à la toile (ancienne expression de la marine à voile), c'est-à-dire la capacité du bateau à ne pas trop gîter sous l'effet du vent. En maritime cela se nomme couple de redressement, il est égal au produit du déplacement du bateau par la distance horizontale entre les verticales passant par le CG et le CC. Pour un voilier la stabilité représente sa capacité à résister au chavirage et pour certains à revenir de la position Capsize.

Pour un chalutier la stabilité, c'est plus, la capacité du bateau à résister à l'état de la mer, aux couples inclinants créés par les forces extérieures dues aux arts de pêche et aussi de faire face aux conditions de chargement qui sont toujours fluctuantes et très extrêmes sur ce type de bateaux. Pour un cargo, un porte container, la stabilité dépend du chargement, ce qui n'est pas toujours simple à évaluer.

Ces deux notions de raideur (au petits angles) et de capacité à résister au chavirage sont antinomiques, dans le sens où plus on augmente la raideur, plus on diminue l'angle de chavirage (Avs). Cela se voit immédiatement sur un multicoque qui à sa raideur maximale lorsqu'il navigue sur un flotteur, les autres flotteurs étant à fleur d'eau, soit 10° environ de gîte, par contre son angle de chavirage statique est voisin de 80°. A l'opposé un canot de sauvetage à sa raideur maximale vers 80° et son angle de chavirage vers 160°.

Les événements de mer tragiques relatifs à des chavirages frappent le plus souvent des voiliers, des navires de pêche, quelquefois des ferry. Les cargos, porte-conteneurs sont plus frappés par des ripages de cargaisons qui provoquent une gîte importante (10, 20°), ce qui revient à flirter dangereusement avec le seuil de chavirage.



² Ce n'est pas pour un multicoque un chavirage transversal, mais diagonal, toutefois la théorie de l'énergie reste applicable.

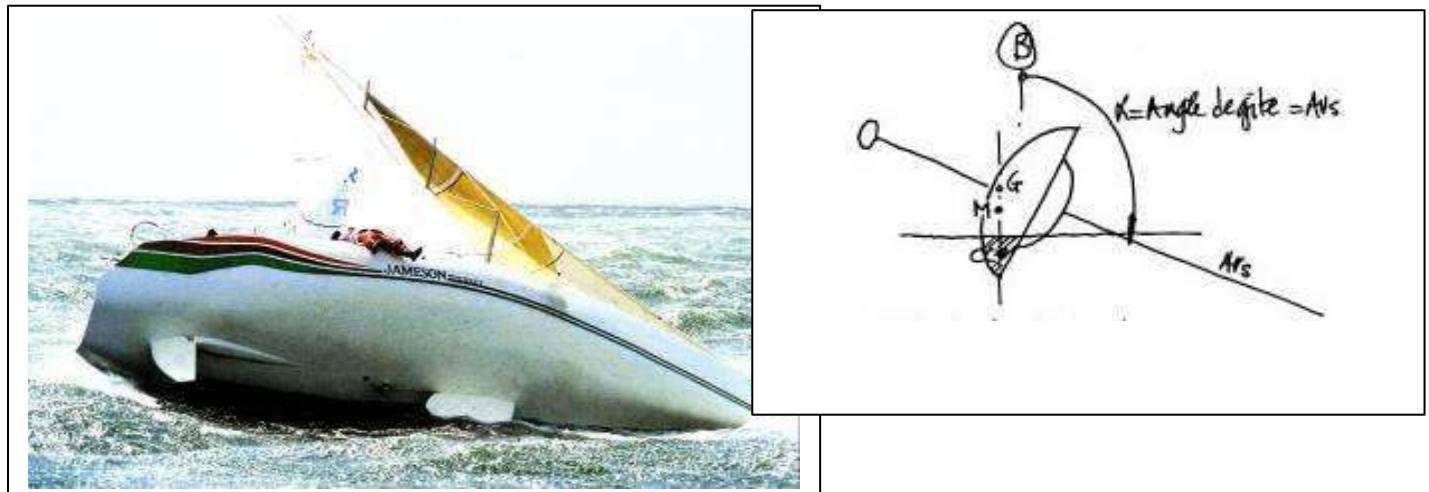
2. Pourquoi un voilier (ou un navire) chavire ?

Excellente question ! La réponse est à la fois simple et complexe.

Simple : Le voilier (ou le navire) chavire lorsque le Centre de Gravité du voilier (CG) dépasse la verticale du Centre de Carène (CB).

Complex : parce que la position relative de ces deux points caractéristiques varie dans l'espace sous l'effet des angles de gîte successifs entre 0° et 180° et des assiette transversale et longitudinale que cette inclinaison génère.

Durant toute la giration du bateau (différents angles de gîte), le bateau s'appuie sur son Centre de Carène (CC, principe d'Archimède), ce dernier évoluant au gré du volume de carène immergé.



En fait la position de chavirage (angle de gîte Avs) est une position d'équilibre instable. Lorsque le bateau se trouve dans cette position, il suffit en théorie, pour un voilier, qu'un papillon se pose sur la quille et le bateau revient à 0° ou sur le mat et il plonge vers 180° .

3. Les paramètres de la stabilité transversale

On distingue 3 paramètres de base, que l'on utilisera pour la suite des calculs :

- Le Centre de Gravité du bateau (CG)
- Le Centre de Carène (CB)
- La distance horizontale entre les deux verticales passant par le CG et le CC

Centre de Gravité (CG)

Toute pièce volumique possède une masse (exprimée en kg) et un point d'équilibre tel que si on suspendait, ou si on posait la pièce sur ce point, elle serait en équilibre quel que soit sa position spatiale. Différentes méthodes, calcul ou expérience, permettent de déterminer ce point d'équilibre.

La méthode mathématique (calcul du Barycentre) associe la masse de chaque élément constituant la pièce volumique et la position spatiale des CG de chacun de ces éléments.

Pour un voilier la méthode la plus simple consisterait à « peser » à terre le voilier couché à 90° avec 3 pesons accrochés à l'étrave, au bas de la quille et au tableau arrière.

Connaissant les distances (d_1 , d_2 , d_3) entre les 3 points d'accrochage et les masses respectives mesurées au peson (m_1 , m_2 , m_3) on déduit immédiatement la position du CG et la masse totale du bateau ($m_1+m_2+m_3$).

La méthode est « simple » au sens où il n'y a que 6 mesures faciles à prendre, mais par contre il faut couper le bateau à 90° et mettre en œuvre grues, ce qui rend, au final, la méthode beaucoup moins attractive et très peu utilisée. Pour cette raison, on choisira deux autres méthodes qui s'appliquent au navire à flot. La première dite « mesure aux petits angles », la deuxième appelée « méthode à 90° », plus précise mais demande plus de moyen et d'espace et n'est applicable qu'aux voiliers.

L'idéal est de déterminer le CG à vide car il représente la référence de base et dont on est toujours certain de retrouver la configuration. En effet en navigation, le chargement du bateau est différent, les voiles, le GO, l'eau, l'équipage sur le pont, la nourriture, les mouillages, le port en lourd vont contribuer à « monter » le CG.... Donc, à diminuer la stabilité. Cela est vrai quel que soit le navire.

La situation se complique pour les bateaux possédant des ballasts et/ou des quilles pendulaires. Dans ces configurations on se retrouve avec un chargement asymétrique, le CG n'est plus dans le plan de symétrie du bateau. Le but des ballasts et des quilles pendulaires sur les voiliers est d'augmenter la raideur (donc son couple de redressement et sa capacité à porter plus de surface de voile) Remarquons que c'est ce qui se passe en dériveur lorsque l'équipier ou même les équipiers sont au trapèze. La course au large n'a fait que transposer cette notion de trapèze en basculement de la quille au vent ou en ballastage en eau, mais dans les deux cas, si le moment de redressement maximal est augmenté, l'angle de chavirage à quelque peu diminué.

A partir de la détermination par l'expérience du CG (bateau vide), l'architecte ou celui qui est chargé du contrôle calculera l'évolution du CG en conditions de navigation et établira les critères de stabilité correspondants. Les cargos, pétroliers etc... ne navigue pas toujours avec une charge commerciale. Il faut bien décharger les marchandises dans un port et il est rare que le cargo trouve du chargement équivalent dans le même port. Dans ce cas, le cargo remplit des ballasts en eau de mer et navigue sur ballast. C'est un chargement minimum qui doit assurer suffisamment de stabilité pour naviguer sans danger.

Le Centre de Carène (CB)

C'est le centre de gravité du volume d'eau correspondant à la carène immergée. Ce volume d'eau (origine du mot déplacement) est égal à la masse du bateau, corrigé par la densité de l'eau. Un cas de chargement (masse en kg du bateau et CG du bateau invariants) appliqué à une carène, donnera un équilibre du bateau donc une assiette longitudinale (on considère que le chargement est symétrique). Cet équilibre se traduira par un CG et un CB sur la même verticale pour la position 0° et 180°. Pour les autres angles de gîte, le CG et le CB seront dans le même plan vertical, perpendiculaire au plan de symétrie du bateau, mais distant de la valeur nommée Gz (bras de levier).

Le CG et la masse associée sont invariants pour chaque volume, c'est le cas pour le navire. Par contre la forme du volume d'un navire n'admet qu'un plan de symétrie. Cela signifie que lorsque l'on met le « flotteur » (le navire) dans l'eau et que l'on fait gîter le flotteur, à chaque angle de gîte correspond un centre de gravité du volume immergé (Centre de carène CB). On parle d'Isocarènes. Ce centre de carène est obligatoirement dans le même plan vertical que le CG).

A l'époque, pas si lointaine, où il n'y avait pas d'ordinateur et de programme commercialisé, l'architecte ou le bureau de contrôle réalisait ces calculs à la main (tout au plus avec une règle à calcul ou une « mini » calculatrice électrique). A l'impossible nul n'est tenu et au lieu de travailler sur des flottaisons isocarènes, l'architecte travaillait sur des flottaisons iso aires sur le maître couple. On considérait que le bateau tournait autour d'un axe perpendiculaire à ce maître couple. Cette approximation simplifiait les calculs et donnait des résultats que l'on considérait comme suffisamment précis. Toujours est-il que pour faire une « stab » complète il fallait une bonne journée de travail.

Aujourd’hui la CAO, travaille en isocarène, puissance de calcul oblige, et réalise un calcul de stabilité complet en 30 secondes !!!

Moment de résistance au chavirage (appelé aussi moment de redressement)

Pour un angle de gîte α quelconque, on identifie rapidement :

- Le centre de gravité CG du bateau pour la configuration étudiée
- Le centre de carène CB correspondant à la gîte α
- La distance horizontale (appelée aussi bras de levier) entre les deux verticales passant par CG et CB.
- En CG s’applique la force verticale (dirigée vers le bas) égale au poids du bateau (daN)
- En CB s’applique la force verticale (dirigée vers le haut) égale au poids du bateau (daN), correspondante à la fameuse poussée d’Archimède « Euréka j’ai trouvé ... »
- L’ensemble de ces deux forces associées au bras de levier forme un couple qui tend à ramener le bateau vers la position 0° Ou vers la position 180° Si on a dépassé le point de chavirement (gîte Avs). Ce couple est par exemple équilibré en navigation par celui créé par la portance des voiles. Choquons les voiles et le couple de redressement ramène le bateau en gîte 0° .

La Courbe de stabilité

Elle représente la traduction degré par degré (au diable l’avarice du temps de calcul) des produits (Poids X Bras de levier) en ordonnée (axe vertical) pour chaque angle de gîte α (axe horizontal).

Elle met en évidence :

- Le point de chavirage lorsque la courbe coupe l’axe horizontal
- Une forme de « cloche » au-dessus de cet axe et une forme de « cloche » normalement plus petite (pour un voilier) en dessous de cet axe.
- Le point maximal de la courbe situé au-dessus de l’axe des abscisses correspond au moment de redressement maximal pour l’angle de gîte correspondant (comme le poids du bateau est invariant, cela signifie que pour cet angle de gîte le CG et le CB sont horizontalement le plus éloignés).
- Plus la pente de la courbe est « raide » à 0° de gîte, plus le bateau est dur à éloigner de la position d’équilibre 0° , donc plus il est raide à la toile. En réciproque, plus la pente de la « cloche » est raide au point Capsize (180°), plus il sera difficile de s’éloigner de cette position pour espérer revenir à l’endroit. En fait lorsque le bateau est Capsize, c'est-à-dire quille en l’air, le problème est identique à la position Upright (0°) qu’il a normalement, à savoir : il faut le faire « chavirer » pour revenir à la gîte 0° .
- On remarquera que plus la courbe « monte » haut avec une pente ascendante raide... plus la chute est rapide et l’angle de chavirage (Avs) faible ... voir les multicoques... ce que l’on gagne d’un côté est perdu de l’autre.
- La surface comprise entre la courbe de stabilité et l’axe des abscisses, positive entre 0° et l’angle de chavirage Avs) et négative entre Avs et 180° , représente l’énergie nécessaire (vagues, vent) pour arriver au chavirage mais aussi l’énergie qu’il faudra trouver dans les vagues pour sortir de la position Capsize et franchir le point Avs. Plus cette surface située sous l’axe des abscisses est importante, plus la situation du bateau à 180° sera préoccupante et irréversible.

En conclusion

La stabilité est un difficile équilibre entre le centre de gravité, le centre de carène et le déplacement, paramètre qui sont constamment perturbés par le vent, les mouvements de la mer et la dynamique du navire.

La pratique du dériveur de compétition montre que l'on peut pousser très loin cet équilibre qui se termine quelque fois cul par-dessus tête, mais c'est sans danger pour ce type de pratique.



J. SANS
26-11-2010



**EXperts-
Yachts**

Jean SANS

Expert honoraire près la cour d'Appel de Rennes

7 rue du Ldv Bourely - BSM de Kéroman , 56100 LORIENT - France

+33 (0)6 07 10 24 03 Jean.Sans@wanadoo.fr

Expertises Maritimes (Privées ou Judiciaires) - Consultant technique

Arbitrage - Relevés de carènes (Photogrammétrie)

Mesures et calculs de stabilité - Jauge IRC

LE 7 JUIN 2022

REFLEXIONS sur l'ORIGINE d'un EVENTUEL CHAVIRAGE

L'introduction en 1998 de la certification CE des navires de plaisance de 2.5 à 24 mètres mis sur le marché Européen devient la clef de voûte de la sécurité des voiliers. Cette certification¹ « CE » impose une norme régissant la stabilité et la flottabilité minimum que doivent respecter tous les voiliers navigants en offshore (et aussi en Inshore). Ainsi l'ensemble des constructeurs (et architectes) mondiaux qui souhaitent vendre sur le marché européen (400 Millions de consommateurs potentiels) doivent respecter ces critères. L'esprit de cette certification s'étendra tout naturellement au monde entier.

La norme (ISO 12217-2) s'appuie sur des principes scientifiques et sur une expérience de stabilité réelle.

Pour le **domaine des Courses Offshore**², des critères de stabilité assez sévères apparaissent, dont les trois principaux sont :

- **DSPL * Agz > 172000**
(DSPL = Déplacement minimal et Agz = surface positive sous la courbe de stabilité).
- **Avs = (130 – 0,002*DSPL) mais toujours ≥ 100°**
- **STIX >32 en catégorie A (offshore)**

Le STIX³ représente un Index de Stabilité. Il est calculé à partir des paramètres de chaque bateau afin de définir une évaluation de la capacité d'un monocoque à résister et à se redresser lorsqu'il a été couché à 90° (Knock Down) ou lorsqu'il se trouve proche de la position de chavirage (Avs).

¹ On parle de DIRECTIVE CE. La première version 94/25 adoptée par les États Européens en 1998 évoluera quatre fois, mais conserve toujours son esprit d'origine.

² Ces valeurs s'appliquent à la catégorie « A », c'est-à-dire en théorie « toutes les mers de la Planète ».

³ STIX : Nombre sans unité

Le paradoxe étant que ce ne seront plus les architectes qui optimiseront la stabilité vers la limite basse, pour obtenir un TCC avantageux, mais les chantiers qui demanderont aux architectes ou à leurs bureaux d'études de calculer les bateaux afin d'être le plus près possible du STIX de 32, afin d'avoir des coûts de production le plus bas possible (dans cette condition, le poids des tests, les échantillonnages diminuent).

STIX 2011 - ISO/FDIS 12217-2-2002								
Nom du Bateau	JS 2021-STAB				Facteur			
Référence	Simulation STIX				Nom			
Excellence de Stabilité	CHARGE CMA (ISO)				Calculé			
Cas de chargement					Retenu			
Personnes à bord	1							
Masses minimales de navigation	m_{min}	kg	4 140,00					
Longueur de coque	L_{sh}	m	10,622					
Bau de coque	B_{sh}	m	3,500					
Longueur de flottaison	L_{fl}	m	9,530					
Bau à la flottaison	B_{fl}	m	2,570					
Aire positive sous la courbe	A_{up}	m rad	1,164					
Angle de dispersion de stabilité	Φ_{up}	deg	131,6					
Angle d'enfoncement	Φ_{down}	deg	131,0					
Theta D = Theta V sans Age = Aire positive sous la courbe jusqu'à Theta D								
Bras de levier de redressement à 90°	GZ_{90}	m	0,980					
Surface positive des voiles	A_{up}	m^2	72,000					
Hauteur du centre de surface de A_{up}	h_{cs}	m	6,470					
Insensibilité (cour1 / non0)			0					
Hauteur du centre de surface immergé	h_{sf}	m	0,00					
Bras de levier de redressement à Φ_{up}	GZ_{up}	m	0,00					
	OK							
Angle de dispersion de stabilité supérieur au minimum de la catégorie A								
	A							
	STIX	36,262			Catégorie de conception			
		A						
Catégorie A: STIX > 32 et $m_{min} > 3000\text{kg}$								
Catégorie B: STIX > 23 et $m_{min} > 1500\text{kg}$								
Catégorie C: STIX > 14								
Catégorie D: STIX > 5								

Certaines Classes (IMOCA par exemple), n'imposent pas que les bateaux soient certifiés CE, par contre les architectes doivent intégrer dans leurs projets, des critères propres aux Règles de Classe beaucoup plus sévères.

Extraits de règles IMOCA :

- *Un bulbe dont la masse est limitée à 3000 kg (dessin libre).*
- *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°.*
(« WC pour Worst Case : Configuration de chargement la plus défavorable)
- *Enfin un ratio des surfaces positives et négatives de la courbe de stabilité > 5 à 1.*
La surface négative de la courbe de stabilité correspond à l'énergie nécessaire pour sortie de la position « capsise ».

Finalement, le siècle se termine par une standardisation quasiment mondiale des critères de stabilité et de sécurité, ce qui incite progressivement au tout début des années 2000, les Classes ou évoluent les professionnels, à mutualiser de plus en plus d'équipements, mat, voile de quille etc...afin d'améliorer évidemment la sécurité, mais aussi la fiabilité et les coûts des études et des fabrications.

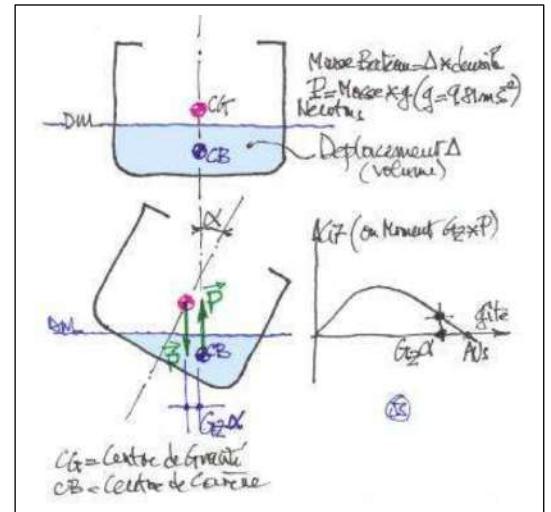
Pour le domaine de bateaux supérieurs à 24 m (donc hors certification CE). Ces bateaux, dessinés et construits à l'unité, régatent pour la plupart en utilisant la Jauge à handicap IRC. Ils relèvent du régime général des navires et passent obligatoirement par une société de classification, comme le Bureau Veritas ou le Rina, ou encore le Germanischer Lloyd.

Aujourd’hui la participation aux courses offshore est réglementée par les règles OSR (Offshore Special Regulation) éditées par World Sailing. Ce règlement se réfère aux critères CE en les étendant au-delà de la limite de longueur à 24 m.

Ainsi, tous les bateaux semblent posséder aujourd’hui une stabilité à priori suffisante pour régater autour du Globe...

Question : Est-ce pour autant la réalité ?

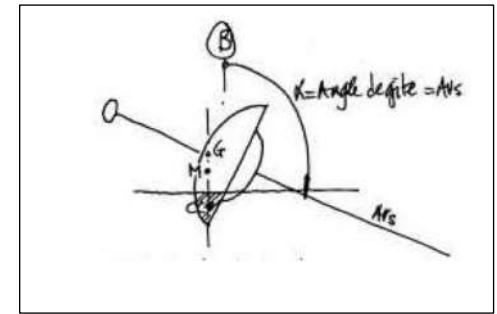
La réponse est assez compliquée. Car ramener la stabilité à trois formules ou calculs comme cela est présenté usuellement ne permet pas de répondre à cette question (voir l’encadré en page 1).



L’angle de chavirage (Avs) « Avs minimal » représente évidemment une des bases essentielles de l’appréciation de cette stabilité :

$$Avs = (130^\circ - 0.002 \times 4500) \text{ mais toujours supérieur à } 100^\circ.$$

Mais dans la pratique on associe faussement stabilité et sécurité. En fait tous les architectes savent qu’un navire peut chavirer. Le chavirage se produisant lorsque le centre de gravité passe de l’autre côté du centre de carène. Un Paquebot, un Ferry, un Chalutier possèdent des Avs inférieur à 70° et ne chavirent pas.



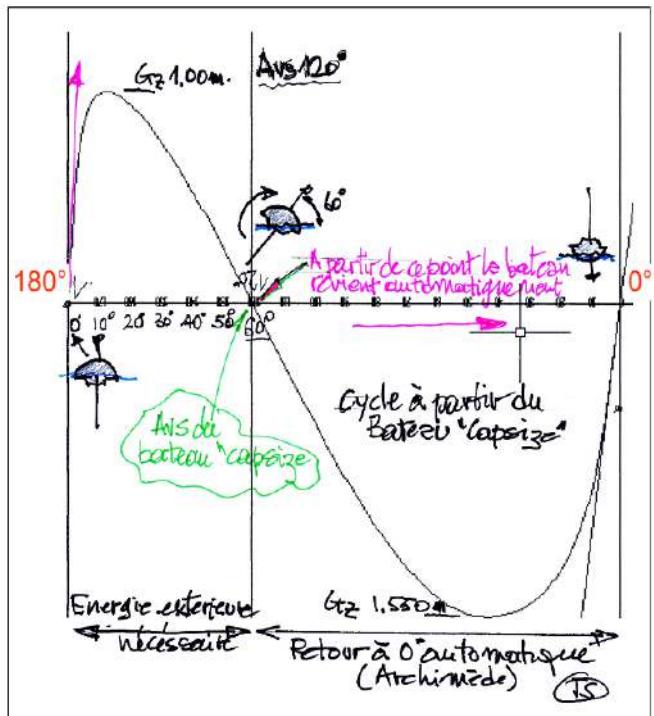
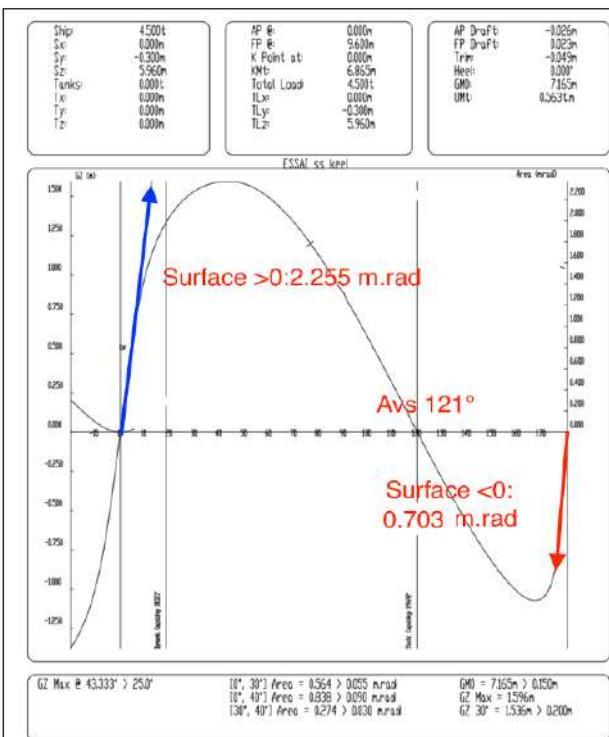
Les voiliers bénéficient d’une sorte de protection ou de mythe qui veut que, du fait qu’ils possèdent une quille lestée, ils reviennent systématiquement toujours dans la position 0° de gîte.

Cette croyance va très loin, puisque jusqu’au VENDEE GLOBE de 1996, ou plusieurs bateaux se retrouvent quille en l’air, les règlements internationaux imposaient tout simplement que les bateaux soient « **Self Righting** » (Auto-redressable). Cette particularité apparaissait comme une évidence.

Le plus troublant étant que TOUS les bateaux, quel qu’ils soient, sont évidemment AUTOREDRESSABLES... jusqu’à ce qu’ils chavirent, au moment où leurs angles de gîte atteignent l’angle Avs fatidique de chaque bateau !

En fait dans l’inconscient collectif cette notion d’auto-redressabilité signifiait qu’un voilier se redressait toujours, et que tant que l’on avait la quille sous les pieds le chavirage n’existait pas. Erreur funeste...





La courbe de Stabilité de gauche représente la courbe « Normale » de 0° et 180°. Celle de droite représente celle qui correspond au bateau chaviré (quille en l'air) à 180°. Dans la stabilité « Normale » le bateau chavire à 121°, lorsqu'il est chaviré, le bateau doit gîter de (180-121) soit 59° (60° sur le Dessin) afin d'arriver à l'angle de gîte qui le fera « rechavirer » pour revenir à 0°. En régime Normal le RMmax = Gzmax * DSPL = 1.59 * 4.5 = 7.15 T.m En position Chaviré le RMmax = Gzmax * DSPL = 1 * 4.5 = 4.5 T.m (ce qui est loin d'être négligeable). On remarquera qu'en position Chaviré la pente à la courbe de stabilité est presque verticale, ce assure une raideur très importante, qui signifie que le bateau est très « stable » dans cette position.

Le sud de l'Océan Indien comme celui du sud du Pacifique, représente une proportion très grande de la surface des océans, pour autant ce ne sont pas des zones où la pratique de la navigation est courante, fut-elle en Course au Large même durant l'été Austral.

Restons quand même réaliste, les normes se réfèrent à des conditions de navigation « normales et usuelles », et bien qu'elles prennent en compte des environnements exceptionnels très localisés, elles ne doivent pas être prises comme une protection infaillible.

Cela signifie que pour tous les voiliers, le domaine de sécurité se situe entre 0° et l'angle Avs. Les anglo-saxon parlent d'un « Range of Stability ». Toutefois, si, suite à une situation immatrisable le bateau chavire (à 180°) malgré sa quille (et flotte encore), il faut être conscient que sa capacité à revenir à l'endroit apparait très faible, voire nulle.

Dans la situation du bateau à l'envers (Avs du bateau 121°), pour revenir de « 180° » à « 121° » (en d'autres termes parcourir 59°), « Archimède » ne participe pas, il s'oppose même. Plus la tangente (rouge) à la courbe de stabilité est proche de la verticale, plus le bateau est raide, et s'oppose pour l'extraire de la position chavirée.

Question : Alors, quelles sont les causalités qui conduisent à un chavirage ?

Réponse 1 : La vitesse

Dans les discussions relatives à ce risque, beaucoup de gens opposent l'historique des courses, en argumentant que durant les nombreuses éditions de la Whitbread, courues sur des bateaux IOR, ou même en 2018 ou Jean-Luc Van Den Heede gagne le Golden Globe Challenge sur des bateaux antérieur à 1988, il n'y a eu aucun chavirage.

Ces types courses possèdent toutes un point commun, un déplacement du bateau relativement important qui limite la vitesse aux allures portantes, à la vitesse archimédienne de la carène (voir l'Acte 7).

Sur ces bateaux, une survitesse momentanée sur une vague peut se produire pendant quelques dizaines de secondes, mais en aucun cas provoque une allure continue au planing.

Par exemple les bateaux de la Whitbread de 18m voire 20 m puis 24 m (durant la période IOR) culminait à 15 ou 17 noeuds dans le sud. Même les bateaux comme « Merit » (LH 25.98m, Bau 5.84m, DSPL 30T, SV au portant 560 m²) ou « Steinlager II », qui étaient des ketches de 24 m surtoilés, se contentaient de moyennes globales de 10 à 11 noeuds. Il faudra attendre le passage au VOLVO Open 70 ou « Ericsson 3 » atteindra la moyenne de 12,75 noeuds sur l'étape Qingdao (Chine) / Rio de Janeiro (Brésil) en contournant le Cap Horn.



Cette génération de bateaux n'était alors plus des architectures IOR, mais des carènes planantes.

Toutefois en 1997, la nouvelle génération des VOLVO 60⁴ (LH 19.40 m et 5,25 m de Bau) accusaient encore 13500 kg à vide et une surface de voile au portant de 500 m² contre 9000 kg pour un « IMOCA 2000 » (LH 18.28 m Bau 5.50 m et 400 m² au portant).

Le ratio m² par tonnes (calculé en unités homogènes) est favorable à l'IMOCA (0.965 contre 0.946 au V60). Pour se rendre compte de l'évolution, un calcul identique sur « Merit » ou « Steinlager II » donne un ratio de 0.760 !

Ces calculs sont réalisés à partir des déplacements à vide. En navigation le VOLVO 60 accuse un déplacement plus important, évalué à près de 2000 kg supplémentaires.

⁴ Les VOLVO 60 sont aussi nommés VOR 60

Suite à la décision d'abandonner les bateaux IOR pour la Whitbread et les remplacer par le VOLVO 60 puis 70, puis la création des Courses Open régentées par aucune règle de jauge exceptée la longueur de 18.28m et le tirant d'eau de 4.5m, régater autour du monde, donc dans les mers du sud entre dans un nouveau paradigme.

L'architecture des bateaux s'oriente alors vers des déplacements progressivement plus légers et très voilés.

Les capacités de planing s'améliorent, ce qui se traduit par une augmentation des vitesses de manière conséquente. On passe alors de 12-15 noeuds (dans le meilleur des cas en IOR) à des vitesses au portant de 25 à même 30 noeuds dans certains cas, ce qui modifie beaucoup le comportement des bateaux et surtout, il apparaît que l'on est plus contraint de dessiner des bateaux de 25 mètres.

Réponse 2 : L'énergie cinétique

Ou on passe de la vitesse à l'énergie cinétique.

Un objet de masse « m » en mouvement de translation à une vitesse « v » produit de l'énergie cinétique, dont l'expression est : $E_{c-trans} = 0.5 * m * v^2$ (ma masse « m » en kg et la vitesse « v » en m/s).

Rapporté à un bateau de 9000 kg le passage de 15 noeuds (7.7 m/s) à 30 noeuds (15.4 m/s) représente une augmentation de l'énergie cinétique est multipliée par 4 ...

Une image de l'énergie cinétique : Votre voiture est stoppée sur terrain plat. Vous devrez la pousser de 4m. Avec votre passager, vous la poussez, c'est un peu difficile au départ, puis la voiture roule ... sauf qu'au des 4 m à parcourir, elle continue toute seule... elle restitue alors l'énergie cinétique qu'elle a emmagasinée.

Sur un bateau, lorsque la trajectoire est linéaire et le comportement archimédien du bateau contrôlé, l'énergie emmagasinée ne constitue pas de problème, elle est même intéressante puisqu'elle produit une sorte régulation de la vitesse (V Speedo).

Les ennuis peuvent arriver lorsque la trajectoire du bateau effectue, d'une manière incontrôlée, une rotation par rapport au cap à suivre.

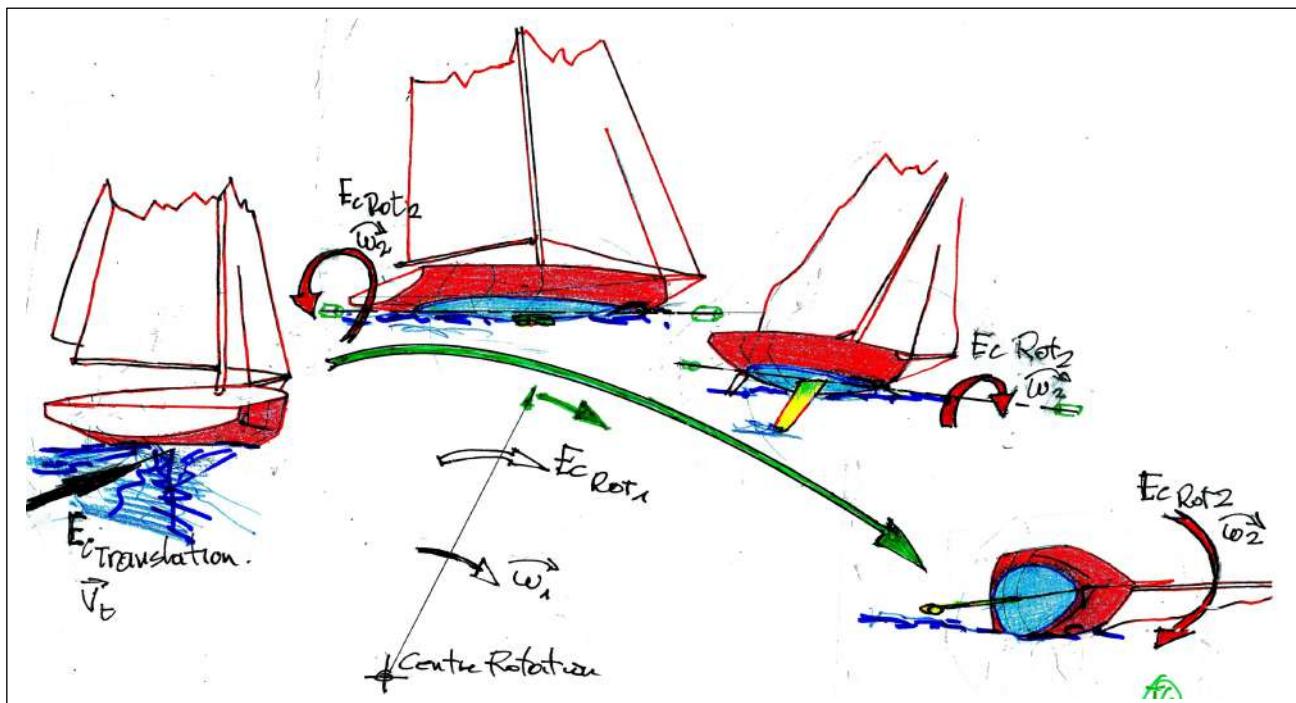
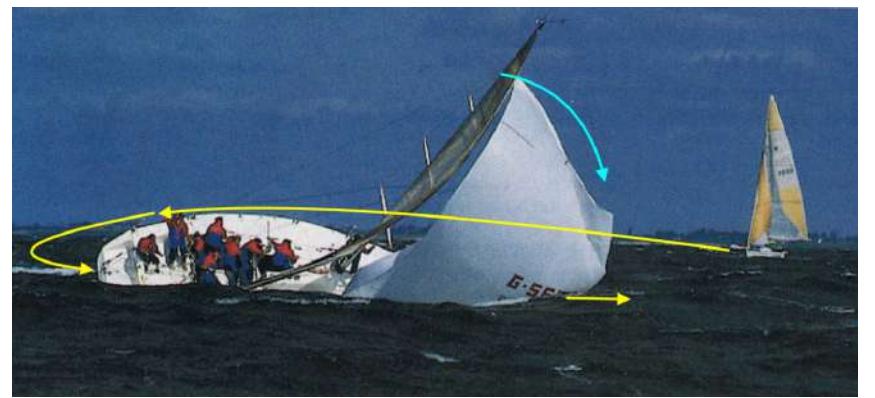
Ce « virage » transforme le mouvement linéaire (valeur au Speedo) en double mouvement circulaire autour d'un point situé sur le plan d'eau et autour de l'axe du bateau.

L'énergie cinétique d'un solide en rotation s'exprime ainsi : $E_{c-rot} = 0.5 * I * \omega^2$.

I étant l'inertie de l'objet en rotation autour d'un axe ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) et ω = Vitesse angulaire (rad/s).

La photo ci-contre ainsi que la représentation phase par phase des trajectoires et mouvements de rotations permettent d'identifier comment l'énergie cinétique en translation se scinde en deux mouvements :

- ⇒ **Une rotation autour d'un point du plan d'eau** (le bateau décrit plus ou moins un cercle).
- ⇒ **Une rotation autour de l'axe longitudinal du bateau** qui correspond à la gîte du bateau.



Réponse 3 : Les appendices au cœur du problème

Ce domaine technique pourrait se comparer aux effets produits sur la trajectoire d'une voiture par des plaques de verglas sur les routes d'hiver.

En trajectoire linéaire rectiligne, l'équilibre hydrostatique du bateau se situe dans un domaine de navigation pratiquement stable. Cela signifie que, à la fois, les positions relatives dans l'espace, du centre de carène, du centre de gravité, du centre vélique, du centre de portance du plan de contrôle arrière vertical (Safran) et celles des forces appliquées en ces points sont telles que le bateau est dans un domaine de navigation sous contrôle. Cela se traduit par 2 conditions :

- **Somme géométrique des Forces Extérieures appliquées au Solide = 0**
- **Somme des Moments des Forces Extérieures au Solide par rapport à un point = 0**

La conservation de cet équilibre s'ajuste en permanence en intervenant avec modération sur le contrôle du safran, et des voiles.

Lorsqu'un paramètre évolue subitement, d'autant plus s'il est souvent incontrôlable comme par exemple la vitesse et la direction du vent, cet équilibre est bouleversé. Cela impose des manœuvres plus violentes, comme un angle de barre plus important.

Une remarque identique peut être faite avec l'évolution de l'état de la mer, qui modifie notamment l'assiette longitudinale, la gîte du bateau, donc la position de son centre de carène (CB).

Pour faire face à ces évolutions, deux appendices régulateurs sont utilisables, le safran et la régulation de l'angle d'incidence et de la forme volumiques des voiles.

Le safran est un appendice profilé symétrique. Lorsqu'il est orienté (axe proche de la verticale) par rapport à la trajectoire, le profil génère de la portance dont la composante transversale modifie la route du bateau.

Le safran évolue dans une zone très proche de la surface de l'eau (interface eau / air), qui manque d'homogénéité car « polluée » par des bulles d'air. Ces bulles d'air peuvent être provoquée par les mouvements des vagues, le passage d'un autre bateau, mais aussi par des éléments appartenant au bateau comme l'hélice et sa transmission, la quille et même la carène lorsque les formes arrière sont torturées.

Tant que la vitesse du bateau reste basse, ces petites bulles d'air provoquent des perturbations sans importance. Mais lorsque la vitesse augmente, deux problèmes importants risquent d'apparaître :

La Cavitation

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

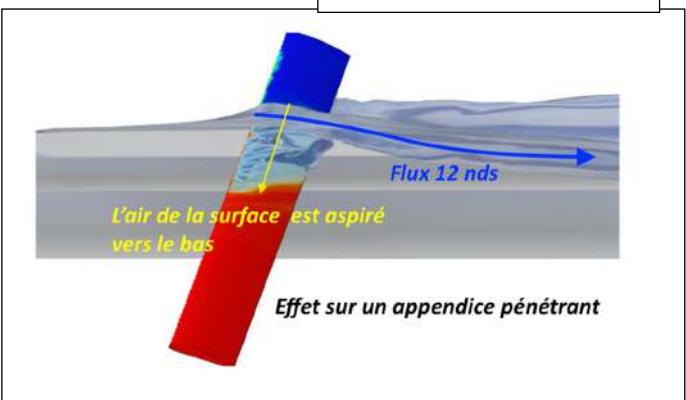
La cavitation se traduit physiquement par une perte radicale de la portance. Elle commence au niveau du bord d'attaque (phénomène de vaporisation de l'eau) et progressivement se développe sur l'extrados, détruisant la portance et ainsi l'effet de contrôle de la trajectoire du bateau.



La Ventilation

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

La vitesse de déplacement et l'incidence du safran génèrent sur l'extrados du profil un creusement de la vague de surface. Une aspiration de l'air situé à l'interface se crée alors.



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

Au final l'extrados du safran, se comporte comme une sorte d'autoroute qui guide et diffuse le mélange gazeux sur toute la surface balayée en se propageant vers l'extrémité de l'appendice.

L'effet de la ventilation se traduit physiquement de manière identique à celui de la cavitation, c'est-à-dire une perte d'efficacité pratiquement instantanée du safran.

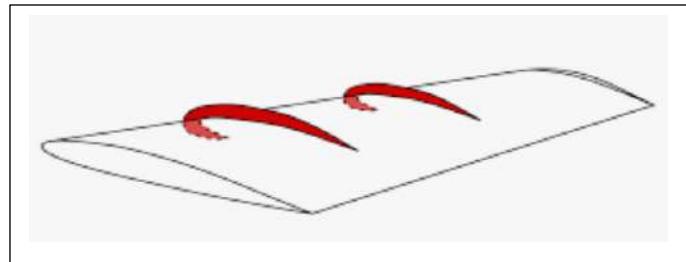
Toutefois l'élément vitesse n'est pas primordial comme dans le déclenchement du phénomène de cavitation.

On parle alors de « décrochage », lorsque le barreur souhaite contrer (angle d'incidence) une trajectoire non prévue.

Ce phénomène de ventilation affecte plus souvent les safrans extérieurs. La solution la plus rependue pour éviter que cette perturbation se produise, consiste à installer des barrières perpendiculaires au profil afin de dévier le déplacement de la cavité. Ce sont les « **fences** » que l'on voit assez souvent sur les ailes des avions.

Dans le cas d'un safran sous la voute arrière, la voute joue une peu ce rôle en canalisant l'interface eau/air.

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



Conclusion

La marche d'un bateau génère 3 paramètres physiques :

- *La vitesse.*
- *L'énergie cinétique produite et emmagasinée.*
- *Les écoulements de fluides autour d'un profil « aérodynamique » et la portance du profil.*

⇒ **La vitesse représente** l'essence même de la régate, on dit souvent : « la vitesse rend intelligent » ... Mais la vitesse possède son corollaire qui se nomme « Énergie Cinétique » ou la vitesse intervient au carré dans le calcul de cette énergie.

⇒ On distingue **deux formes d'énergie cinétique** :

- L'énergie **Cinétique de Translation**

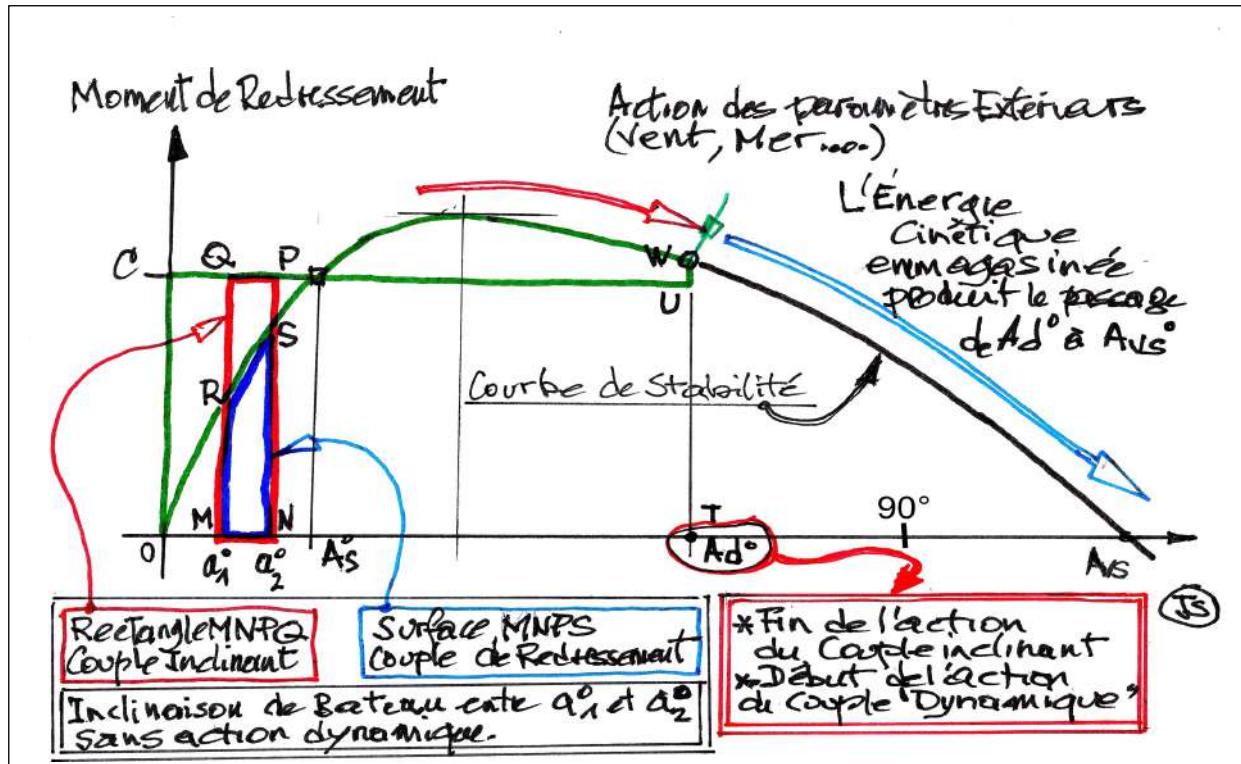
Comme nous l'avons vu précédemment, c'est celle emmagasinée lorsque le bateau suit sa route (rectiligne).

- L'énergie **Cinétique de Rotation**

Cette forme de l'énergie cinétique, est la conséquence d'une « sortie de route ».

⇒ **La portance dépend** des écoulements (Ventilation, Cavitation) des fluides autour du safran, donc de l'état de surface du profil (il suffit de poncer), de la vitesse, de la forme du profil. L'angle d'incidence du profil par rapport à la route suivie génère la portance. Trop d'angle et la portance devient nulle et le safran décroche.

Au final, on revient à la stabilité latérale du bateau, c'est-à-dire sa rotation autour de son axe longitudinal mais avec la prise en compte de l'énergie cinétique en rotation que l'on introduit en plus du calcul de stabilité en statique. Cette stabilité dynamique intègre 4 paramètres : **Vitesse / Énergie Cinétique / Portance safran & quille / pilotage**.



Dans ce dessin ci-dessus qui retrace la partie positive de la courbe de stabilité, il y a deux lectures.

1 / On fait gîter le bateau lentement, par exemple en utilisant une drisse. On peut l'amener ainsi jusqu'à 90° de gîte. Dans cette méthode d'inclinaison, il n'y a pas d'énergie cinétique emmagasinée pendant la rotation du bateau, puisque la vitesse de rotation peut être considérée comme nulle. On est en pure analyse « statique ». C'est ce qui est réalisé lorsqu'un logiciel calcule et trace la courbe de stabilité du bateau.

2/ Lorsque le bateau se déplace en suivant son cap (translation). Il est dans un mode « uniformément accéléré » (l'accélération pouvant être >0 ou <0). Toutefois les accélérations sont modérées. Du fait de sa vitesse de déplacement V et de sa masse, il produit de l'énergie cinétique en translation. Si, par exemple, on enlevait les voiles (donc plus de « moteur »), le bateau continuerait sa route, à son cap, en consommant l'énergie cinétique emmagasinée.

On introduit alors l'environnement « dynamique ».

Lorsque le bateau, lancé à pleine vitesse en ligne droite, fait une giration (rotation) incontrôlée plus ou moins brutale. Les éléments extérieurs (vent, état de la mer, décrochage du safran...), génère un couple de chavirement important. Le bateau gîte, les voiles battent violemment. Il suit alors degré après degré la courbe de stabilité statique jusqu'à l'angle A_d .

A ce moment les paramètres extérieurs ne produisent plus de gîte (le mat se trouve assez proche de l'horizontale, les voiles ne portent plus), par contre une partie de l'énergie cinétique emmagasinée pendant la route linéaire, se transforme en énergie cinétique de rotation autour de l'axe du bateau et continue alors à le faire gîter (à partir du point W de la courbe) ... en espérant que l'angle de gîte n'atteindra pas l'angle Avs (chavirage).

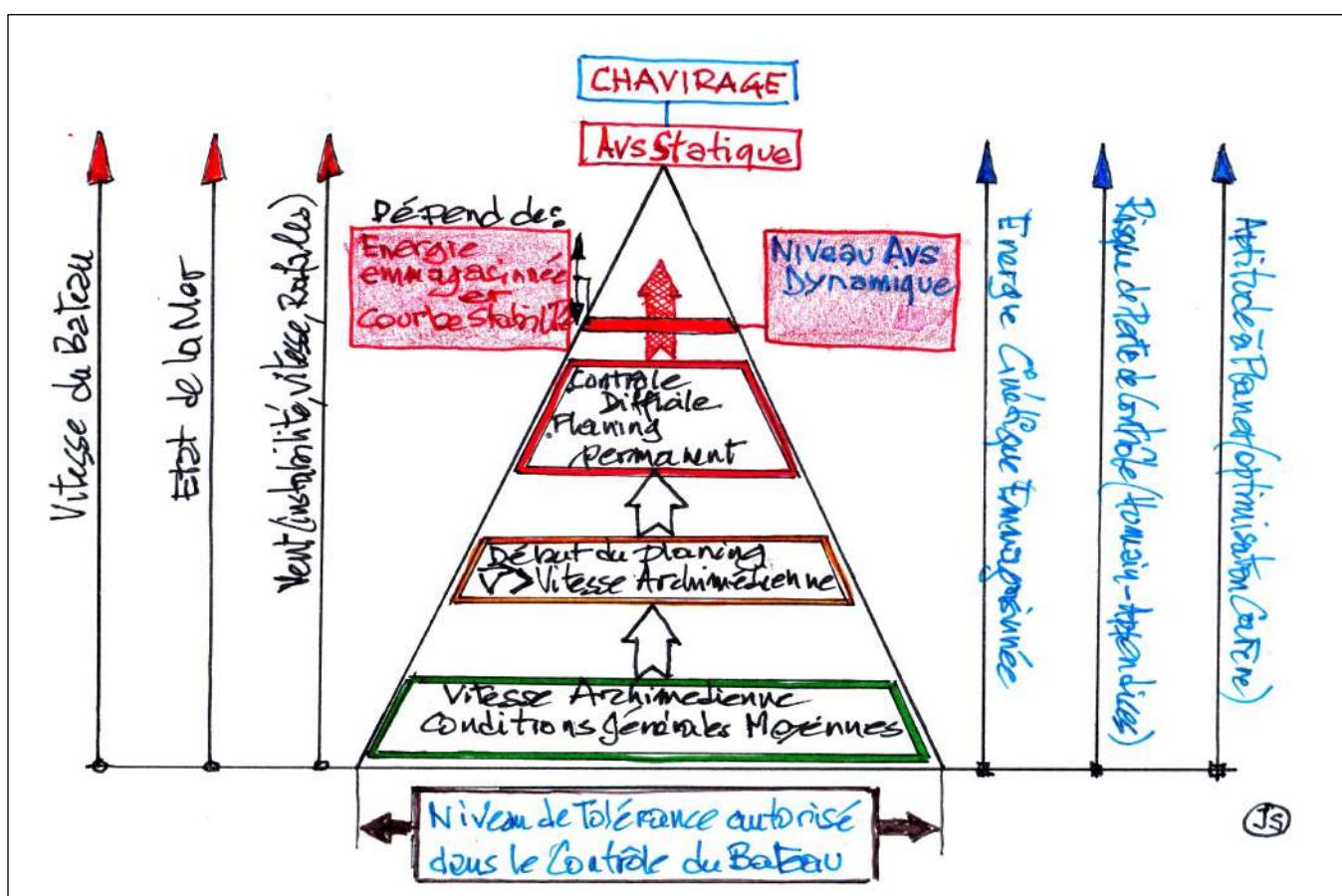
L'autre partie de l'énergie cinétique de translation termine le virage du bateau.

Lorsque toute l'énergie cinétique est consommée, tout s'arrête. Si la barrière de l'angle Avs n'est pas franchie, le bateau revient en Gîte 0°. **Dans l'autre cas, il chavire irrémédiablement.**

Finalement, on peut représenter le domaine d'utilisation d'un voilier sous la forme d'un triangle ou le sommet matérialise l'angle de chavirage (Avs).

La base du triangle diminue au fur et à mesure que les paramètres croissent (flèches verticales rouges et bleues). **La longueur de cette base matérialise le niveau de contrôle de la trajectoire acceptable** (en fait le niveau des erreurs). **Plus la vitesse augmente, plus le pilotage demande de la compétence d'attention et de réactivité.**

Lorsque la base du triangle diminue, le risque de sortie de route s'accroît.



Conclusion : Les prescriptions de stabilité calculées et imposées depuis la fin des années 90 aux voiliers (courses au large ou plaisance) sont largement supérieures à celles des années « IOR ». La vitesse et le pilotage représentent le facteur déterminant dans l'éventualité

qu'un chavirage se produise. De plus on constate que les bateaux sont de plus en plus rapides, bien que leurs dimensions diminuent. Ce dernier binôme **vitesse / volume du bateau** interroge car ce type d'architecture devient de plus en plus sensible à l'environnement extérieur (état de la mer), ce qui influe sur les risques de pertes de contrôle.

Il ne faut aussi pas s'identifier aux IMOCA (dès le VENDEE-GLOBE de 2000) qui équipés d'une quille pendulaire et d'un roof conséquent sont réellement auto-redressable.

Aucun des autres bateaux ne respecte l'auto-redressabilité et je trouve que la prescription 3.04.3 des OSR imposée en Catégorie 0, c'est-à-dire pour des parcours se déroulant dans des zones où les conditions de vie et de navigation sont souvent exceptionnellement dures (OSR : règle internationale appliquée dans les courses au large) est un euphémisme quand elle impose que le bateau doit être « *Capable de s'auto redresser depuis une position à l'envers, avec ou sans intervention acceptable de l'équipage, quel que soit l'état du gréement* ».

Jean SANS ©



Le 27/01/2022

CAPACITÉ des « CLASS 40 » à se REDRESSER après CHAVIRAGE (CATEGORIE 0)

STABILITE CLASS 40 en OSR Catégorie 0

(*Cas de la traversée des océans Indien et Pacifique*).

(*Test de retournement à 180° lors des contrôles*)

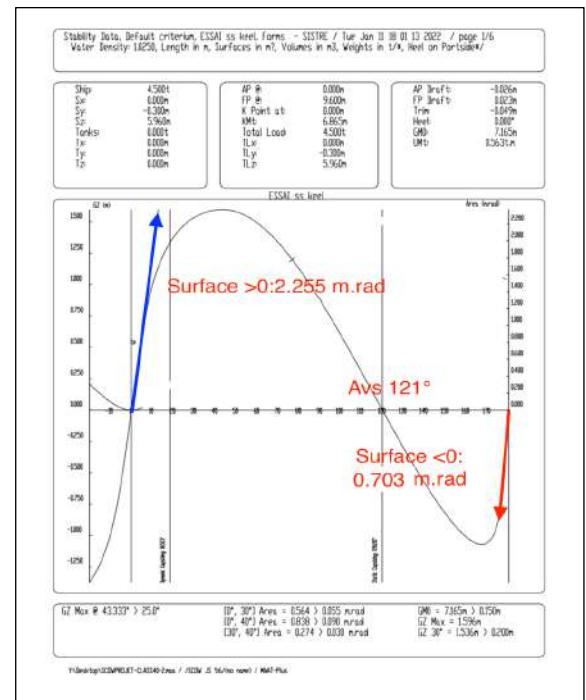
Extrait des OSR (Offshore Special Régulations)

Mo0 3.04.3 Capable of self-righting from an inverted position with or without reasonable intervention from the crew and independent of the condition of the rig

3.04. 3 Capable de s'auto redresser depuis une position à l'envers, avec ou sans intervention acceptable de l'équipage, quel que soit l'état du gréement

La stabilité se représente dans cette courbe qui varie de 0° à 180°.

- A 0° : Le bateau est « Upright » (Gite 0°)
La flèche Bleue représente le RM à 0°, c'est-à-dire la raideur du bateau. Plus la tangente (bleue) est verticale, plus le bateau est raide. Ce qui ne signifie pas qu'il est stable.
- A l'angle Avs (121° pour un CLASS 40 de 4500 kg), le bateau chavire.
Le CLASS 40 étant un bateau certifié CE, l'angle « Avs minimal » est égal à :
(130° - 0.002*4500).
La règle de jauge permet une stabilité réelle des bateaux supérieure à celle imposée par la certification CE (force en tête de mât à 19 m admise entre 230 et 316 daN).
Toutefois comme la Box-Rule de la CLASS 40 impose le tirant d'air, la base du plan de voilure (longueur du bateau) donc implicitement la surface de voilure (de l'ordre de 115 m²), et aussi le poids minimal, l'optimisation des performances conduit les architectes rester proche d'un déplacement de 4500 kg (Jauge) afin d'obtenir un ratio Poids/Surface de voilure optimum.
En optimisant le poids de la coque et de jouer sur le franc-bord, il sera possible d'augmenter la masse du bulbe donc d'obtenir un Avs plus élevé de 5, 10°.

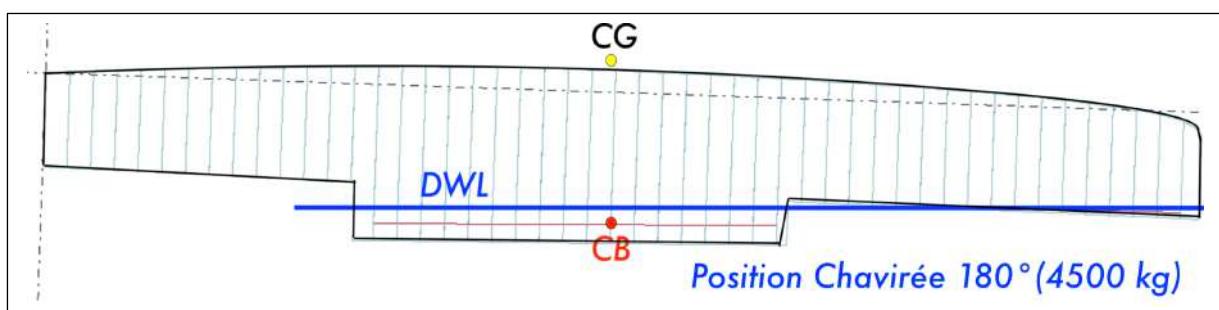
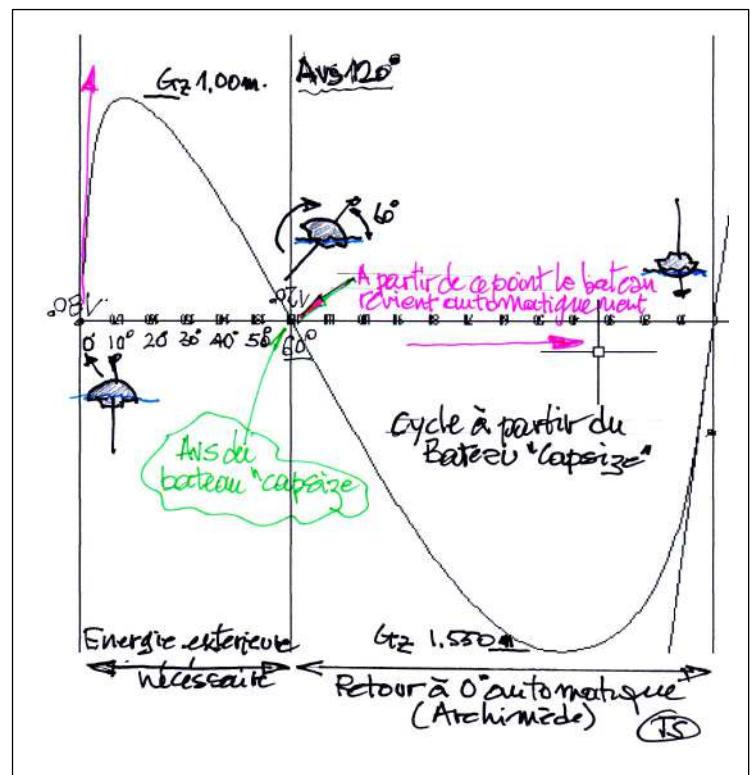


- Entre 0° et Avs , lorsque l'on choque les voiles, le bateau revient « **Upright** ». C'est automatique (Voir les lois Archimédiennes).
- Au-delà de l'angle Avs , les lois Archimédiennes sont toujours d'actualité MAIS fonctionnent « à l'envers » c'est-à-dire que le bateau continue sa giration jusqu'à 180° . Il prend alors la position **Capsize**.
- La **surface <0** comprise entre la courbe en cloche et l'axe Ox multipliée par le déplacement du bateau représente l'énergie qui s'oppose au chavirage. La norme ISO 12217-2 impose en Catégorie A (navigation offshore) que cette expression soit supérieure à $172000 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}$.
- La **surface >0** comprise entre la courbe en cloche qui se trouve sous l'axe Ox représente l'énergie qui faudra trouver pour revenir de la position capsized jusqu'à l'angle Avs , c'est-à-dire $180^\circ, 179^\circ, 178^\circ, \dots, 121^\circ$. Un fois arrivé à « $121^\circ + \epsilon$ », Archimède prend le relai et automatiquement renvoie le bateau Upright.

Le problème étant, que pour aller de 180° à 121° , Archimède ne participe pas, il s'oppose même. Plus la tangente (rouge) à la courbe de stabilité est proche de la verticale, plus le bateau est raide, donc s'oppose, pour s'extraire de la position capsized.

La courbe de stabilité ci-contre représente le bateau en position **Capsized** avec 0° de gîte. Le parcours de 0 à 60° (en fait 59° puisque l' Avs est de 121°) est le plus difficile à réaliser, car **il faut nécessairement trouver de l'énergie extérieure**.

Cette rotation de 0° à 60° (180° à 120°) n'est vraie que si le volume immergé (Déplacement du bateau) est toujours de 4.39 m^3 (densité = $1,025$), ce qui correspond au « flotteur » (coque/pont/roof) intact et étanche.



L'étanchéité du flotteur.

Entre 0° et Avs, la coque, le pont, les ouvertures sont réputés étanches.

Dans la deuxième phase entre Avs et Capsize, l'étanchéité est plus aléatoire notamment au niveau de la descente, ou des systèmes d'aération.

Pour la navigation dans les mers australes, les organisateurs imposent une cloison étanche supplémentaire en retrait de la cloison d'abordage. Au final le bateau possèdera 3 compartiments étanches (deux à l'avant et un à l'arrière) qui assureront la flottabilité du bateau quel que soit sa position (0° ou 180° entre autres).

Les volumes de flottabilité (mousse, ballons, etc) prévus dans les règles de classe n'ont pas cette fonction. Ces volumes sont utiles en cas de voie d'eau grave dans la phase navigation normale. En effet on place ces volumes de flottabilité de telle manière que lorsqu'il y a une voie d'eau, le bateau reste à flot avec le plus possible de franc-bord.

Lorsque le bateau est à l'envers, les flottabilités se retrouvent au « plafond », ce qui n'est pas l'idéal.

Les volumes étanches (avec des portes étanches) restent totalement indépendants de la position Upright ou Capsize puisqu'ils partagent le volume total de la Coque, c'est-à-dire les 56 m3.

Les prescriptions OSR en catégorie Zéro (Mo0) et celles des organisateurs

Les OSR doivent être respectées, ce qui implique que les bateaux soient équipés pour réaliser les opérations permettant de revenir de la position Capsize.

L'AVIS de COURSE de la « RACE AROUND » précise en plus :

« Les bateaux qui participent à la course autour du monde doivent démontrer qu'ils peuvent être redressés à partir d'une position inversée et rester ou être rendus étanches lorsqu'ils sont inversés.

Le test de redressement à 180 degrés peut être effectué avec le gréement non mis à l'eau, à la discrédition du concurrent. »

Le skipper devra donc démontrer qu'il peut ramener le bateau en position « upright » depuis la position Capsize (180°).

Lorsque le bateau se retrouve en position capsized, la seule méthode utilisable pour envisager son redressement, consiste à modifier le plan de chargement du bateau afin de déplacer le centre de gravité du bateau vers un des côtés du bateau (tribord ou bâbord).

Comme les CLASS 40 ne sont pas équipés de Canting Keel, la solution restante est de remplir un ballast latéral, qui combiné, à la masse du bateau désaxera suffisamment le CG du bateau pour revenir à l'angle 121° soit un parcours de (180-121) °= 59°.

La trop faible demi-largeur du CLASS 40 ne permet pas de réaliser un déplacement latéral suffisant du CG pour ramener le bateau Upright.

Il faut trouver un autre artifice associé à un ballast latéral pour obtenir ce potentiel de redressement.

Il faut être réaliste l'angle de gîte à obtenir pour redresser le bateau doit être très important et largement supérieur aux quelques degrés que pourrait fournir le ballast latéral de 750 L autorisé par la Jauge.

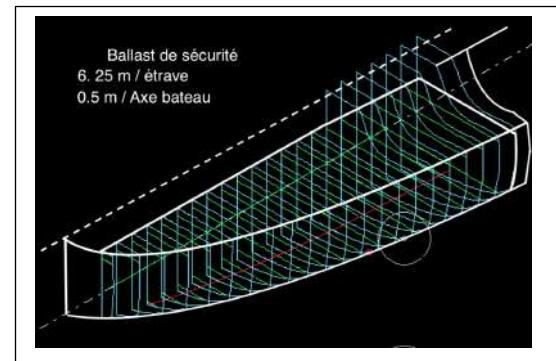
En effet lorsque le bateau est capsisé, le roof est partiellement immergé comme la surface de pont avant, ce qui crée une stabilité de forme très supérieure à celle de la surface de flottaison normale.

Ainsi la gîte obtenue avec ce ballast de 750 L lorsque le bateau est en position capsisé est alors inférieure à celle du bateau à l'endroit.

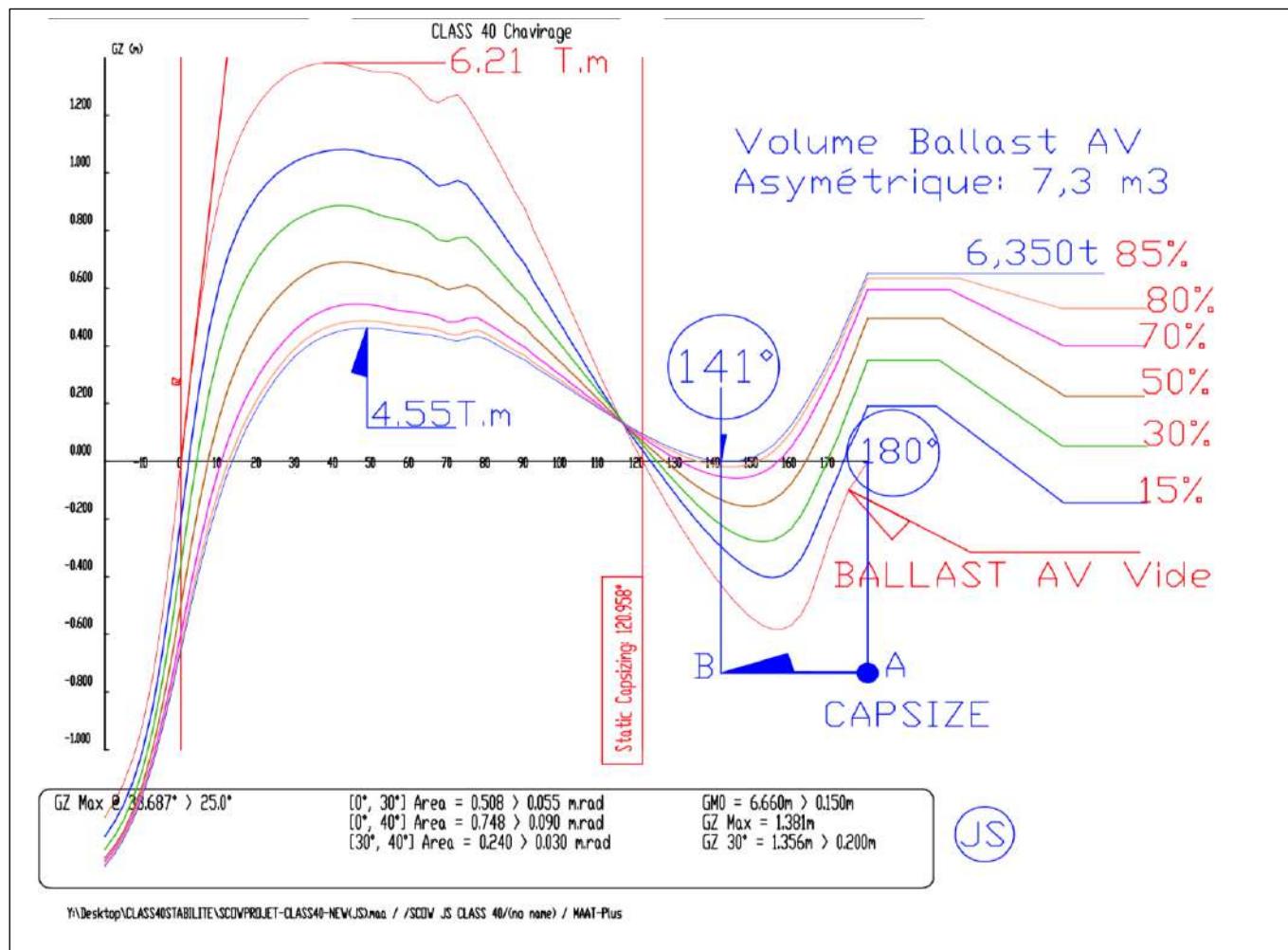
La simulation proposée propose un volume capable du ballast avant de 7.6 m³ environ. Ce ballast, comme le montre le dessin ci-contre et décalé par rapport à l'axe du bateau.

L'opération de remplissage en eau d'un ballast avant latéral se traduit par l'immersion progressive du volume de carène avant dont les effets sont :

- Le bateau s'enfonce sur le nez.
- Le bateau gîte du côté où est implanté le ballast.
- Sa stabilité de forme diminue



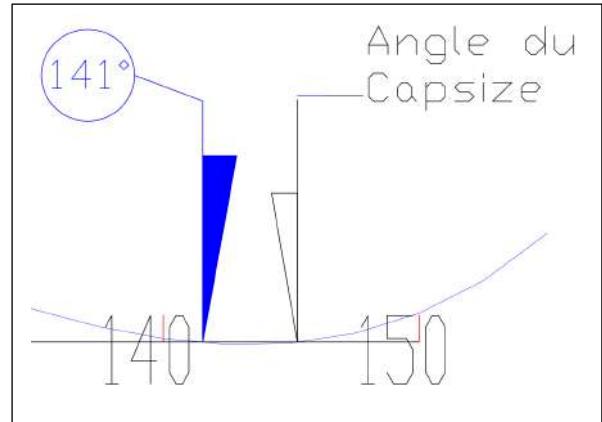
Conclusion : Le remplissage du ballast avant, provoque l'évolution de la stabilité du bateau retourné



Le tableau ci-dessus montre les évolutions des courbes de stabilité en fonction du taux de remplissage du ballast avant.

L'angle Avs (121°) correspondant au chargement du bateau sans aucun ballast rempli (Ballast 750L et Ballast AV) va évoluer vers 141° lorsque le ballast avant est à 85% soit 6,350 tonnes d'eau.

De manière identique pour chaque courbe on constate que l'angle de capsizing diminue de 180° (0%) à 146° (85%).



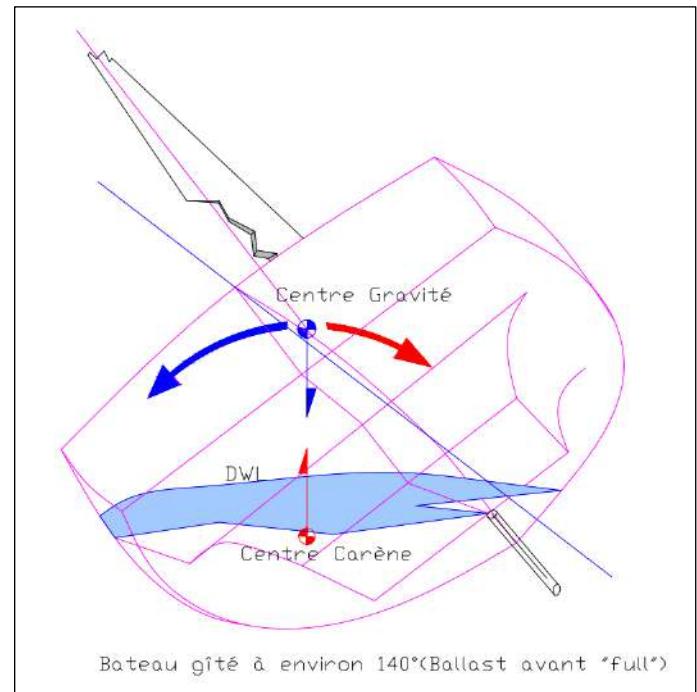
Au final, lorsque le bateau est à l'envers, sa « gîte » est de 180°, puisque son chargement est symétrique. Au fur et à mesure que le ballast avant se remplit, la gîte diminue et se rapproche de l'angle Avs correspondant au taux de remplissage.

Sur un plan d'eau calme, avec 65% de remplissage les deux valeurs Avs et Capsize seront très proche (5 à 6%).

Cela signifie que la verticale du CG du bateau (4500kg + 6350 kg dirigée vers le bas) est très proche de la verticale du CB (4500kg + 6350 kg MAIS dirigée vers le haut). Toutefois la verticale de CG est toujours du mauvais côté par rapport du CB.

A ce moment-là en générant un peu de roulis (mouvement du skipper à l'intérieur du bateau), on arrivera à faire passer la verticale du CG du « bon côté » et ainsi enclencher le retour immédiat et automatique à la position Upright (0°) (lois Archimédiennes).

Dans une mer formée, il est raisonnable de penser que les mouvements de la mer, associés à l'effet de carène liquide (malgré les cloisons intérieures nécessaires pour limiter l'effet destructeur des mouvements de l'eau), provoqueront ce phénomène (passage du CG du bon côté) vers 70% de remplissage soit 5000 litres environ.



Il faut rappeler que :

- La position « UPRIGHT » 0° est une position d'équilibre STABLE. C'est-à-dire que lorsque l'on écarte le bateau de cette position, et qu'on le relâche, il revient automatiquement à 0°.
- Qu'il est de même de la position CAPSIZE.
- Que la position Avs (angle de chavirage) est une position INSTABLE, c'est-à-dire que le bateau va indifféremment vers UPRIGHT ou CAPSIZE suite au moindre roulis qui modifiera les positions spatiales relative du CG et du CB vers un côté au l'autre.

Mais lorsque le bateau revient à la position Upright il n'est pas 0° (mat vertical, s'il a toujours son mat) mais de -15° de gîte et une inclinaison sur le nez Trim de 5° (Trim), puisque le ballast asymétrique AV est plein d'eau et cela en pivotant autour des positions successives du centre de carène CB.

Mais la pratique apparait beaucoup plus complexe.

L'ensemble de cette démonstration repose sur l'hypothèse que le flotteur (coque + pont + roof) est un volume étanche et intact. La réalité risque de montrer que ce n'est pas exact. Comme je l'ai écrit plus haut, si la coque (œuvres vives, œuvres mortes, pont) est toujours réellement étanche, c'est moins certain pour le roof à cause de la porte descente, des aérateurs, des prises d'air moteur etc.

Cela signifie que dans la position Capsize, le roof se remplira d'eau, puisque de part son volume (6,5 m³ pour un Scow) il « devient » la carène du bateau chaviré (Déplacement 4500 kg soit 4,3 m³ au moment de chavirage).

Il est envisageable de simuler la présence d'eau dans le volume du roof et de regarder qu'elle serait son influence sur la courbe de stabilité du bateau retourné et surtout d'étudier les conséquences sur le retournement et sur l'état du bateau après le retournement.

Une autre difficulté qui me paraît beaucoup plus ennuyeuse, est celle de l'assiette (latérale et longitudinale) du bateau lorsqu'il se retrouve à l'endroit.

En effet, avec un ballast avant contenant 5 à 6000 Litres d'eau, la stabilité hydrodynamique a largement diminué et le risque de chavirer sous l'effet de la mer et du vent devient alors important dans ces conditions.

Cela signifie qu'il faut vider au plus vite les quelques 5 à 6000 litres d'eau qui se trouvent dans ce ballast avant.

Les OSR prévoit que le bateau soit équipé d'une pompe de secours d'une capacité de 200L/mn. Cela représente pour 5000 L à extraire : 25 minutes... Encore faut-il que les batteries du bord, après un 360°, puissent fournir suffisamment de courant pour le faire.

Vider le ballast est une chose, mais avant cela il faut le remplir et c'est loin d'être évident.

On peut envisager le remplissage par envahissement naturel, avec une vanne posée sur le pont (commande à distance) et une autre vanne à l'intérieur du bateau afin qu'il y ait une mise à l'air libre. C'est loin d'être évident, car l'enfoncement du pont avant est relativement faible.

L'idéal serait de remplir ce ballast avec la pompe débitant 200L/mn, mais c'est aussi 25 minutes d'énergie électrique avec des batteries qui sont à l'envers.

Facteur aggravant.

Les deux ballasts arrière de 750 L chacun (Tribord et Bâbord) très utiles en navigation, imposent qu'il faudra équiper obligatoirement le poste avant avec deux ballasts de sécurité nécessaires au retournement.

En effet, on peut raisonnablement penser que le chavirage éventuel se produira en conditions de navigation optimales avec le ballast au vent rempli (750 L).

En termes de stabilité, naviguer avec un ballast plein au vent, augmente le moment de redressement, c'est son objectif, mais en contrepartie cette configuration diminue l'Avs (il passe de 121 à 118°), ce qui rend le bateau un peu plus sensible au chavirage.

Un fois chaviré, le skipper est obligé de remplir le ballast de sécurité qui se trouve du coté du ballast de 750L plein. Cela signifie que le bateau doit être équipé de deux ballasts de sécurité de 7.5 m³ dans le poste avant (!!!)

Conclusion

- Il est illusoire d'imaginer que le CLASS 40 non équipé de ballasts avant conséquents, puisse revenir de la position Capsize (180°) à 0°, donc se redresser, simplement avec les effets des vagues.
- De même j'imagine mal qu'un CLASS 40, même lourdement ballasté à l'avant, puisse revenir à l'endroit par mer plate dans un port (essai demandé par l'Organisation). La réussite de ce test par les IMOCA résultait très peu du volume imposé des roofs mais principalement du déport du bulbe en basculant la quille dont l'effet est bien supérieur à celui d'un ballast.
- Reste un point sous-jacent, c'est la résistance de la structure aux effets de carène liquide d'un ballast de 7,5 m³. Certes on peut installer des cloisons internes qui limitent les effets mécaniques de l'eau en mouvement, mais tout cela représente du poids assez mal placé (poste avant).

JS.

Pour information :

Le volume total de la coque + roof est de 56 m³, dont 6.5 m³ pour le pont et le roof (ce volume est imposé par la jauge).

