

**NOTE TECHNIQUE a l'attention du SPECIAL REGULATION  
COMMITTEE.**

**Sujet: Submission 27-03 du RYA : « CANTING KEEL »**

**Jean SANS  
19 octobre 2003**

## **STABILITE des VOILIERS CONSTRUITS AVEC DES QUILLE PENDULAIRES (ou BALLASTS LIQUIDES).**

### **Préambule :**

A la fin des années 1980, les quilles basculantes sont apparues sur les voiliers IMOCA (Vendée-Globe). Ces équipements remplaçaient les ballasts liquides, car ils permettaient principalement d'augmenter le couple de redressement sans modifier le déplacement du voilier.

La technologie évoluant très vite, les systèmes mécaniques de quille pendulaire existent maintenant sur les catalogues de divers fabricants et cela pour des bateaux de 40' à 150'. Les Mini6.50 sont aussi souvent équipés de tels systèmes, mais les organes de commande sont plus rudimentaires.

La « règle de jauge » des premiers Vendée-Globe se limitait à la longueur hors tout et à une gîte maximale de 10° sur chaque bord lorsque les ballasts étaient remplis ou la quille basculée entièrement d'un côté. La Classe IMOCA n'existait pas à cette époque.

La règle CHS puis l'IRC a repris cette règle des 10°, ensuite à la demande de beaucoup d'architectes, cette prescription fut supprimée en 2002. En même temps l'influence des quilles pendulaires et des ballasts sur la vitesse des bateaux ont été réellement pris en compte dans la jauge IRC, dans le but de limiter certains excès architecturaux. Ces types de bateaux sont aussi assez répandus sur la côte Ouest des USA.

Ainsi aujourd'hui un grand nombre de bateaux, de 6.5m à 42<sup>3</sup> m, sont équipés de quille pendulaire.

Des excès architecturaux ont été commis à une époque sur les bateaux du Vendée-Globe<sup>1</sup>, des mesures drastiques ont alors été prises à la fois par les organisateurs (FICO) et par l'IMOCA. Ces mesures ont limité les innovations des dessins.

Aujourd'hui, si les voiliers IMOCA paraissent plus sûrs en terme de stabilité, il n'est pas évident que ce soit le cas pour tous les bateaux construits pour l'IRC par exemple ou d'autres système de jauge. Une règle de jauge généraliste n'est pas à priori le système le plus adapté pour réglementer la stabilité des bateaux (voir l'IOR ou l'IMS), seule une box-rule peut réellement le faire avec plus d'efficacité. Ce qui est notamment le cas avec les règles de la VOLVO Race ou celles de l'IMOCA .

Avant d'étudier l'influence des quilles pendulaires sur la stabilité générale du voilier, regardons comment se présente cette stabilité.

Rappelons aussi que jusqu'en 1996, le règlement ORC demandait que les bateaux soient « self-righting <sup>2</sup> ». Après quelques catastrophes dans les mers australes, la formulation de la stabilité requise fut écrite différemment par le Special Regulation Committee.

---

<sup>3</sup> on signalera que MARI CHA, n'est pas certifié CE (pavillon GB) mais certifié VERITAS (suivant quels critères ?)

<sup>1</sup> Voir Stabilité des Voiliers 60' (Jean Sans, traduit par Simon Forbes)

<sup>2</sup> self-righting = autoredressant

### Analyse générale de la stabilité statique

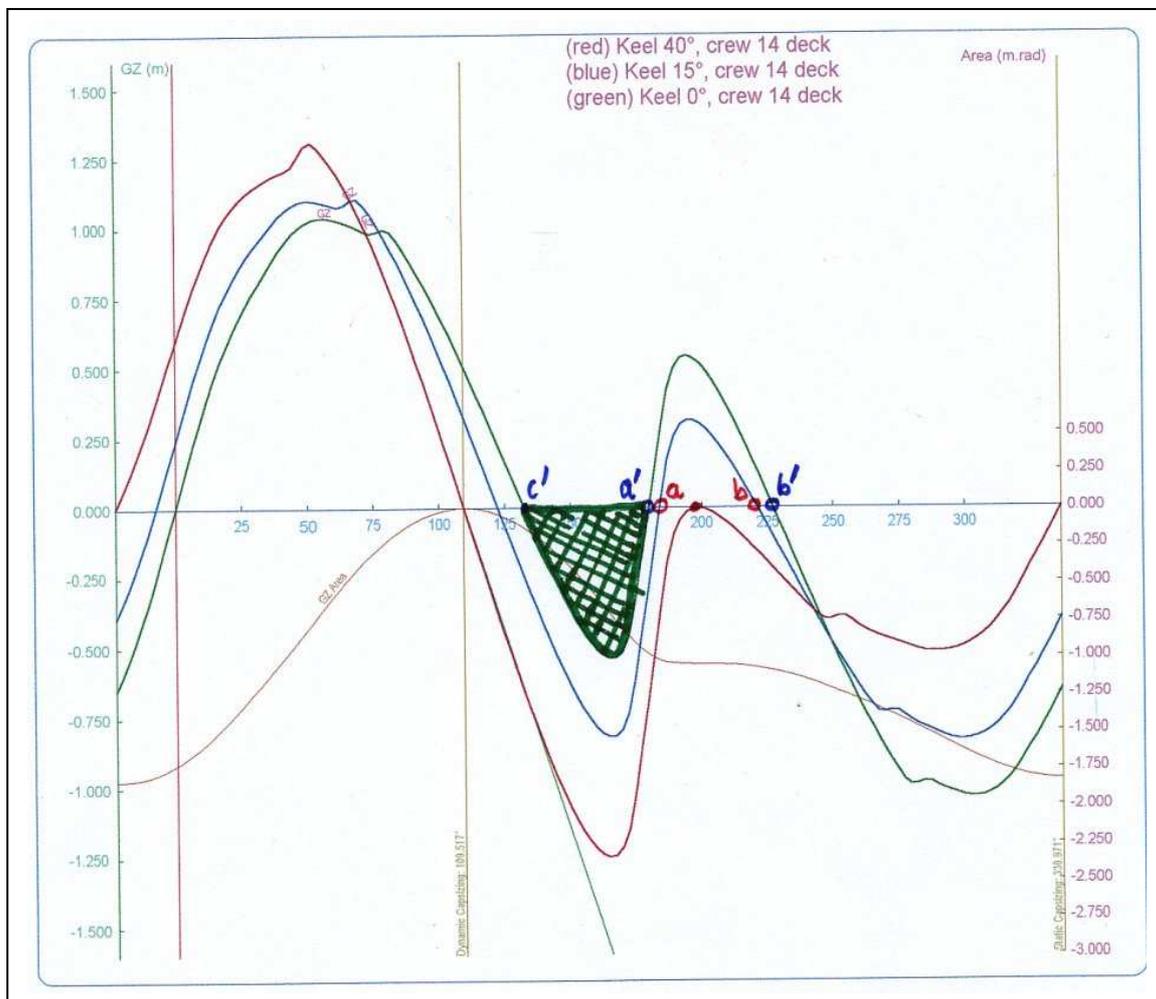
- Un bateau « moderne » avec une quille fixe n'est pas auto-redressant, cela signifie que lorsqu'il est à l'envers (capsize), il reste dans cette position. Pour le remettre à l'endroit il faudra le faire gîter et atteindre l'angle de chavirage ( $A_{vs}$ ).

Suivant le type d'architecture du bateau, l'angle  $A_{vs}$  à atteindre depuis le capsized sera de l'ordre de  $115^\circ$  à  $170^\circ$ , soit une gîte de  $10^\circ$  à  $65^\circ$ .

Dans ce genre de situation (capsized), seule l'énergie contenue dans les vagues peut provoquer cette gîte.

L'énergie nécessaire pour remettre le bateau à l'endroit est proportionnelle à la surface sous la courbe de stabilité et dépend de la pente de la tangente à cette courbe au point  $180^\circ$ . Plus la tangente est verticale plus le bateau sera stable à l'envers, donc plus il faudra d'énergie pour le redresser.

Cette situation est représentée par la courbe « verte » sur le graphe ci-dessous. La différence ( $a' - c'$ ) représente l'angle de gîte pour atteindre l' $A_{vs}$   $c'$ . La surface hachurée représente l'image de l'énergie qu'il faudra pour obtenir cette gîte.



Ces trois courbes sont obtenus avec l'équipage sur le pont, globalement centré).

- Lorsque la quille pendulaire est inclinée d'un bord (ou des ballasts remplis), l'équilibre du bateau est modifié, il prend un angle de gîte qui correspond à sa position « upright ». Cette gîte a pour origine le décentrage du centre de gravité général du bateau.

Si ce bateau chavire (360°) dans cette configuration, sa stabilité générale peut être la suivante :

- La courbe après l'angle **Avs** est tangente à l'axe de la gîte (courbe rouge) ou est en dessous de cet axe. Cela signifie que le bateau est systématiquement autoredressant.

OU

- La courbe coupe d'axe de la gîte **a** et **b** par exemple, cela signifie que le bateau reste à l'envers et qu'il faudra atteindre l'angle **b** pour qu'il revienne à l'endroit. On remarquera que dans le cas de dissymétrie du centre de gravité du bateau, il est plus facile d'aller vers l'angle **b** que de « revenir » vers l'angle **Avs** (**d'**).

Dans le cas ci-dessus, le bateau chavire la quille basculée au vent. Cette configuration de la quille ayant pour but d'augmenter la stabilité initiale du bateau et ses performances. Mais un bateau peut chavirer dans la configuration « quille sous le vent<sup>1</sup> », pour cela il faut lire la courbe dans l'autre sens.

On remarquera aussi:

- Quille au vent : le moment de redressement augmente par rapport à celui correspondant à la position 0° de la quille, mais l'angle de gîte correspondant à ce moment de redressement diminue.
- Quille sous le vent : c'est l'inverse.

Enfin on notera aussi qu'un bateau équipé d'une quille pendulaire n'est pas obligatoirement autoredressant.

### **Réglementations existantes**

Il y a deux types de réglementations existantes.

- Les réglementations instituées par certaines règles de jauge, la CCA Rule de 1931 imposait déjà une mesure de stabilité et calculait le rating en fonction de la stabilité du bateau.
- Les réglementations imposées par les administrations des Etats. Ce type de réglementation diffère suivant les pays, toutefois, la Communauté Européenne a mis en place depuis 1998 une réglementation unifiée (NORME CE 12217). Il apparaît que cette réglementation dépasse le continent européen et semble s'imposer au monde entier, simplement par le fait que les constructeurs non européens doivent certifier leurs bateaux suivant cette norme, si ils désirent accéder au marché européen.

Cette norme CE est réservée aux bateaux de loisir et exclue les bateaux de compétition. Dans la pratique, les bateaux entièrement destinés à la compétition sont extrêmement rares (multicoques ORMA 60', Class America). Les bateaux de course offshore sont avant tout des bateaux de croisière, même si leur confort et quelquefois rudimentaire.

Aujourd'hui, cohabite des bateaux certifiés CE et des bateaux (construit antérieurement à 1998 pour l'Europe) certifiés ou homologués par les administrations des Etats ou même sans aucun contrôle. Remarquons qu'un régime dérogatoire existe dans la norme CE et qu'il permet aux administrations des Etats « d'homologuer » un bateau en dehors des critères de la norme CE, en lui imposant un certain nombre de contraintes particulières.

---

<sup>1</sup> le bateau sous spinnaker par à l'abattée (voir la célèbre photo de BRAVA à l'AC)

## La Norme CE 12217

### Généralités

Le principe général de cette norme est d'associer les résultats d'une mesure de stabilité avec des paramètres calculés qui seront utilisés pour déterminer un indice de stabilité représentant la capacité du bateau à affronter les conditions de navigation avec la plus grande sécurité possible. Cet indice de stabilité calculé sera un nombre sans unité appelé STIX.

La norme CE définira aussi 4 catégories de navigation A, B, C, D correspondantes à des conditions de vent et de mer.

Catégorie A (Transatlantique) :  $STIX > 32$

Catégorie B (offshore) :  $STIX > 23$

Catégorie C (côtière) :  $STIX > 14$

Catégorie D (locale) :  $STIX > 5$

En plus de la condition sur la valeur du STIX, la norme CE 12217 impose un angle de chavirement minimum en catégorie A et B (angle Avs). Cette Avs minimum est calculé uniquement en fonction de la masse de chargement du bateau.

**Catégorie A :** Avs mini =  $(130 - 0.002 * m)$  et toujours supérieur à  $100^\circ$

**Catégorie B :** Avs mini =  $(130 - 0.005 * m)$  et toujours supérieur à  $95^\circ$

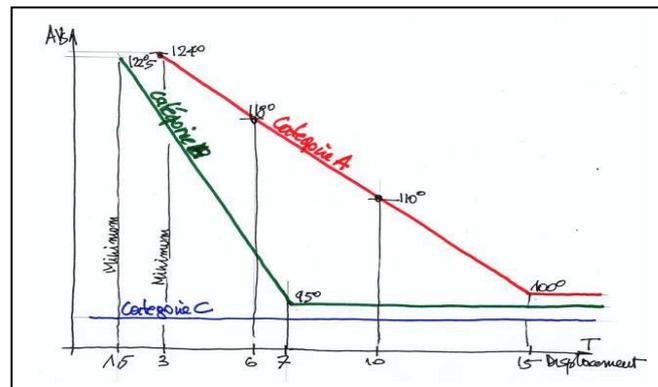
Catégorie C : Avs mini =  $90^\circ$

« m » représente la masse de chargement (déplacement).

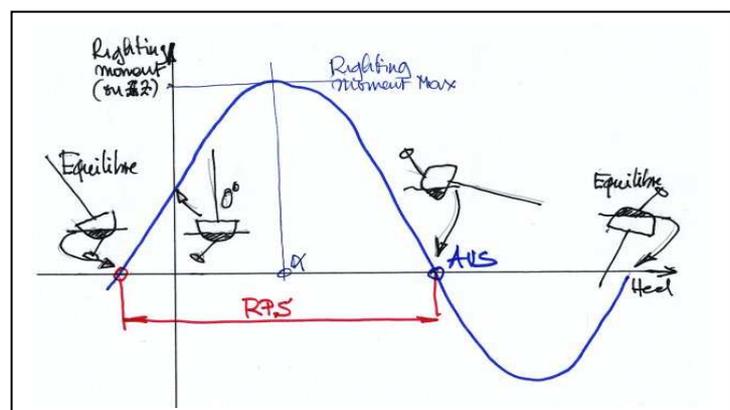
On constate que plus le déplacement est important plus l'angle de chavirage imposé se rapproche de  $100^\circ$  (catégorie A).

### Quelques définitions usuelles :

**Avs :** angle de disparition de la stabilité, c'est l'angle de gîte pour lequel le moment de redressement est nul.



**RPS :** Range positive stability. Utilisé par les anglo-saxons, il représente la zone angulaire pendant laquelle le moment de redressement est positif.



Dans le cas d'un bateau équipé d'une quille fixe, la courbe de stabilité part de l'intersection des axes donc RPS est égal à Avs.

### Limite de la Norme CE 12217

La norme est destinée avant tout au bateau de croisière, pour simplifier on peut dire qu'elle prend en compte deux types de chargement pour établir les calculs de stabilité (conditions minimales de chargement et conditions maximales). Elle imposera dans le cas de chargement « conditions minimale » un nombre de « passagers » (équipage) relativement faible (2 pour les bateaux de 8 à 16 m). Ces passagers seront placés au centre du bateau. Même lorsque les calculs introduiront un équipage sera plus important, il sera toujours considéré être situé dans l'axe du bateau.

La norme prévoit l'utilisation de ballast ou de « lestage asymétrique<sup>1</sup> », dans ce cas la stabilité la plus défavorable devra être retenue. La méthode est identique pour les bateaux à dérive ou quille relevable. Cette disposition rend très difficile la certification en catégorie A des voiliers équipés de quille pendulaire ou de dérive et de quille mobile. Les ballast liquides sont moins pénalisés, car la baisse de l'angle  $\Delta v_s$  sous l'effet des ballasts est légèrement compensée par l'augmentation de déplacement qui génère une augmentation de l' $\Delta v_s$  minimum.

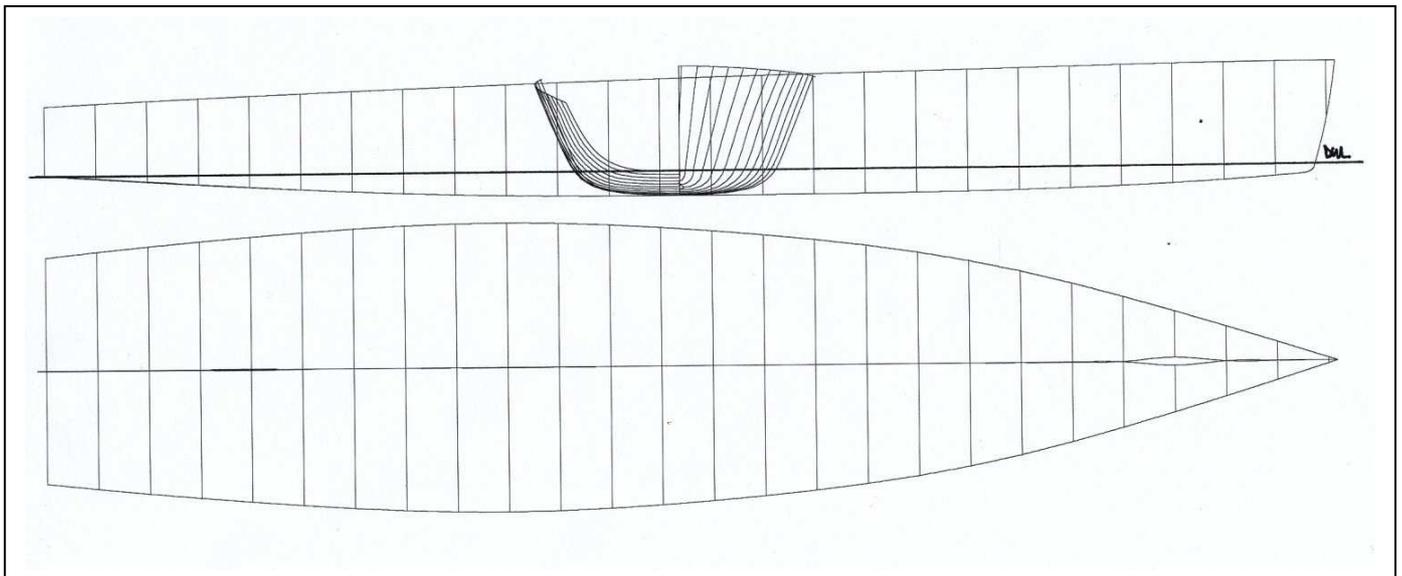
La norme ne prend pas en compte le rappel des équipages (équipage, stockage des voiles) en tant que ballastage latéral du voilier.

### **COMPARAISONS et ANALYSES**

Nous allons étudier deux types de bateau de 60' environ, un étroit, un très large.

#### **Influence de la quille pendulaire et de l'équipage sur un bateau « étroit ».**

##### Modèle utilisé



LOA 18.50

LWL : 17.73

B max 4.10

BWL : 3.03 m

TE : 4.10

Bulbe 2.8 T

Voile de quille 1.0 T

Surface de voile au près : 185 m<sup>2</sup>

Déplacement armé, avec un équipage de 2 personnes : 10108 Kg

---

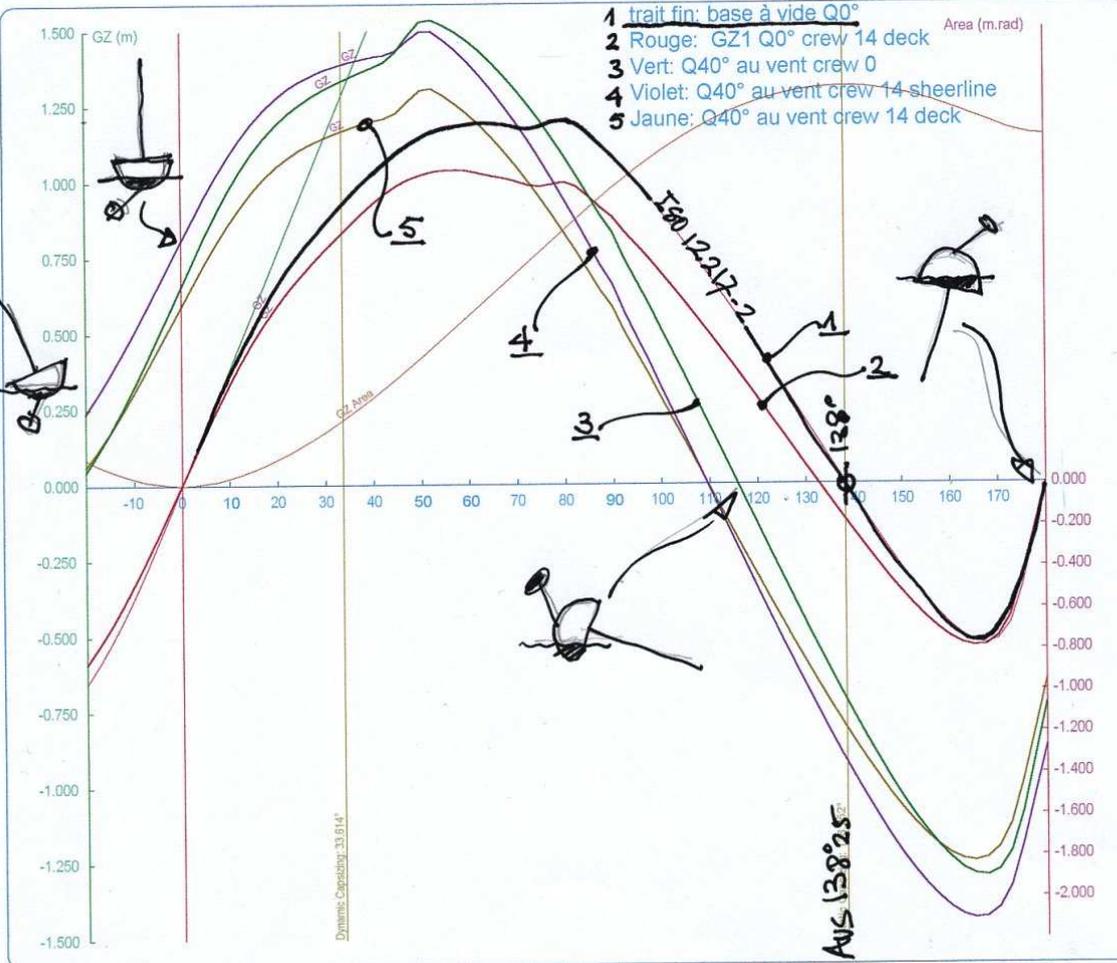
<sup>1</sup> termes employés par la norme CE

# Evolution de la stabilité générale et du STIX

Stability Data, Default criterium, Q 0° hypothese 3, Forms - SISTRE / Sun Oct 12 18 30 23 2003 / page 1/3  
 Water Density: 1.0250, 2 volumes added (0.379m3 @ x=0.000, y=-3.229, z=8.415)

Chargement mini (voiles, etc, 2 équipiers centrés).

Ship:	10.108t	AP @:	0.000m	AP Draft:	-0.004m
Sx:	0.000m	FP @:	18.123m	FP Draft:	-0.001m
Sy:	-0.395m	K Point at:	0.000m	Trim:	-0.004m
Sz:	8.415m	KMt:	1.795m	Heel:	0.000°
Tanks:	0.000t	Total Load:	10.108t	GM0:	2.190m
Tx:	0.000m	TLx:	0.000m	UMt:	0.386t.m
Ty:	0.000m	TLy:	-0.395m		
Tz:	0.000m	TLz:	8.415m		



GZ Max @ 79.696° > 25.0°	[0°, 30°] Area = 0.256 > 0.055 m.rad	GM0 = 2.190m > 0.150m
	[0°, 40°] Area = 0.421 > 0.090 m.rad	GZ Max = 1.201m / ISO 12217-2
	[30°, 40°] Area = 0.165 > 0.030 m.rad	GZ 30° = 0.857m > 0.200m

C:\Program Files\dossiers JS 10-2002\IORC 2001\ORC 2003\ETUDEW\cantingkeel 2.maa / etude canting keel(no name) / MAAT-Plus  
 ISO 12217-2: 2 crew member on center line (Quille 0°)

### ***Courbe 1 :***

Chargement minimum (Norme 12217) avec 2 équipiers dans le cockpit .

Quille dans l'axe

Avs :138°25

RM 1° : 0.386 t.m

### ***Courbe 2 :***

Prise en compte de 14 équipiers sur le pont et de l'équipement :

Déplacement total : 11228 kg

Quille dans l'axe

Avs : 132°

RM1° : 0.380 t.m

Constat : le centre de gravité s'élève, la stabilité générale diminue.

### ***Courbe 3 :***

Chargement minimum (Norme 12217) avec 2 équipiers dans le cockpit .

Quille angulée à 40°

Avs :115°

Cette configuration donne le moment de redressement maximum (Gz=1.533 m) soit 28% de plus que dans les mêmes conditions de chargement (courbe 1) lorsque la quille est dans l'axe.

### ***Courbe 4 :***

Chargement identique à celui de la courbe 2, mais l'équipage est au rappel sur le livet.

Quille angulée à 40°

Avs : 109°

Par rapport au cas précédent, le centre de gravité s'élève (l'équipage est sur le pont), le moment de redressement maximum diminue légèrement (Gz=1.496m), -2.5%.

Par contre l'Avs baisse beaucoup : de 115° à 109°

### ***Courbe 5 :***

Toujours la quille angulée à 40°, mais l'équipage est sur le pont.

La stabilité est alors très dégradée au niveau du moment de redressement.

Nous constatons donc que l'angulation (40°) de la quille induit :

- **Une augmentation significative du moment de redressement**, lorsque l'équipage est au rappel.

Rappelons que lorsque l'équipage est au rappel mais que l'angulation de la quille est de 0°, on obtient les résultats suivants :

$$\text{Avs} = 127^{\circ}2 \quad \text{RM1}^{\circ} = 0.374 \text{ t.m} \quad \text{GZ maxi} = 1.169 \text{ m}$$

Dans les mêmes conditions, (rappel de l'équipage et angulation de la quille de 40°)

(courbe 4), l'angulation de la quille de 40° génère une augmentation du GZ de 28%.

- **Une diminution significative de l'angle Avs**

On passe de 138° (quille 0°, 2 équipiers) à 109° (Quille 40°, 14 équipiers au rappel) soit 29° de moins.

Si on compare les cas de chargement correspondant au bateau en course

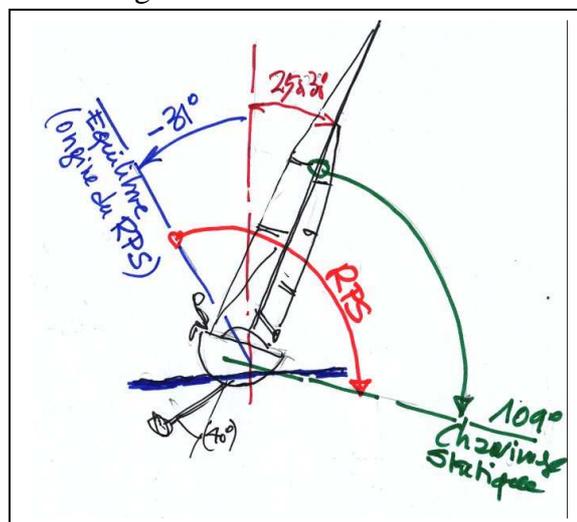
Quille 0°, 14 équipiers au rappel : Avs = 127°2

Quille 40°, 14 équipiers au rappel : Avs = 109° soit 18°2 de moins.

ETUDE Canting Keel JS - ship narrow -					
	conditions ISO Keel 0°; crewmember: 2	Keel 0°; crewmembers: 14 on centerline (deck)	Keel 40° windward, crewmember s: 14 on sheerline	Keel 40° windward, crewmembers: 14 on centerline	Keel 40° windward, crewmembers: 2 on centerline (ISO)
Mass (displacement) (Kg)	10 108	11 228	11 228	11 228	10 108
Avs (°)	138	132	109	109	115
AVS (°) mini STIX	110	108	108	108	110
Gz 90°(m)	1,083	0,878	0,667	0,753	0,823
positive area under Gz curve (m.rad)	1,917	1,588	2,220	1,828	2,223
RPS	139	132	141	133	137
STIX >32	A - 70,60	A - 65,08	A - 56,57	A - 57,55	A - 59,79

On observe que le RPS est pratiquement invariant, ce qui montre que ce paramètre décrit assez mal l'aptitude du bateau à résister au capsizing.

L'Avs et le STIX sont à mon avis mieux adaptés. L'Avs représente l'angle statique réel du chavirage. Sachant que les bateaux cherchent à naviguer avec une gîte de 25 à 30° maximum dès qu'il y a du vent, le skipper va adapter sa voilure et le moment de redressement de son bateau (basculement de la quille) afin d'obtenir cet angle de gîte moyen. Ainsi plus l'angle de chavirage (Avs) sera faible plus l'écart entre l'angle de gîte en navigation (25/30°) et l'angle Avs sera faible. La marge de sécurité diminuera.



On remarque aussi que le STIX baisse 70.6 à 56.6. On se trouve aussi très près (moins de 1°) de la limite de l'angle Avs minimum (108° pour ce cas de chargement). Cela signifie que la catégorie A peut être refusée pour ce type de bateau.

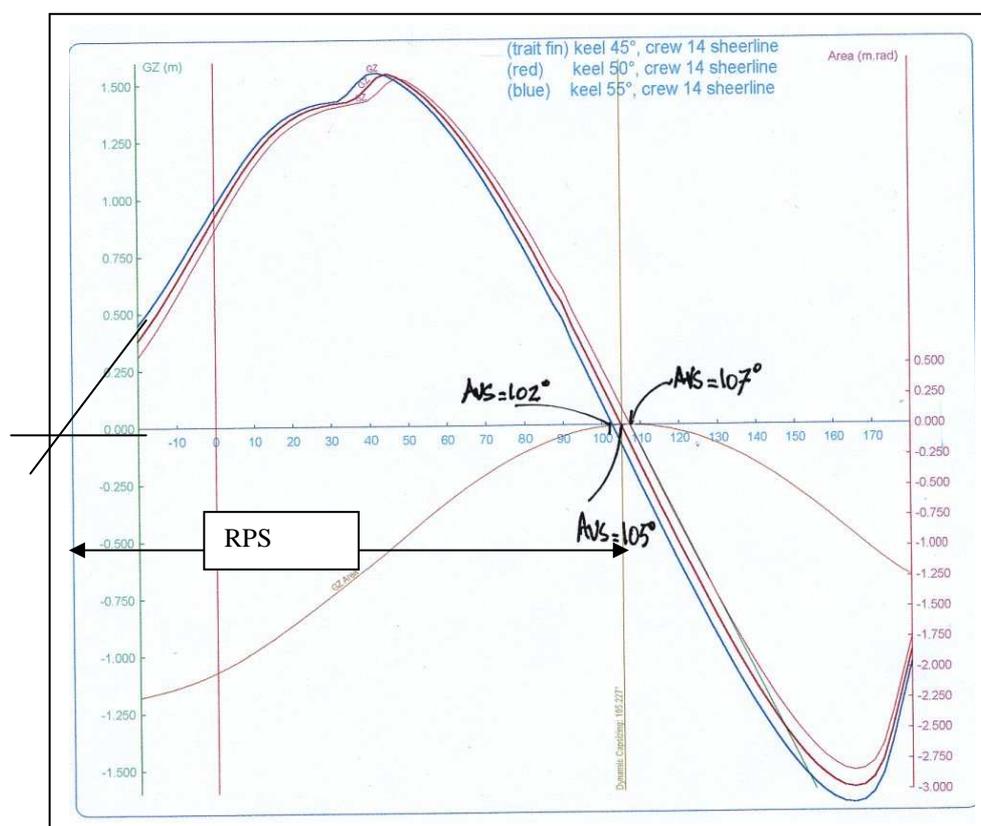
Ce modèle étudié est assez proche des dessins actuels (hors IMOCA) que l'on rencontre dans les courses IRC ou à la Transpac par exemple.

### Influence de l'angulation de la quille

On peut imaginer que l'architecte décide d'augmenter l'angulation de la quille (nous supposons que c'est techniquement réalisable).

Nous avons pris le même modèle l'équipage étant au rappel sur le pont.

Nous avons simulé des angulations de 45°, 50°, 55°.



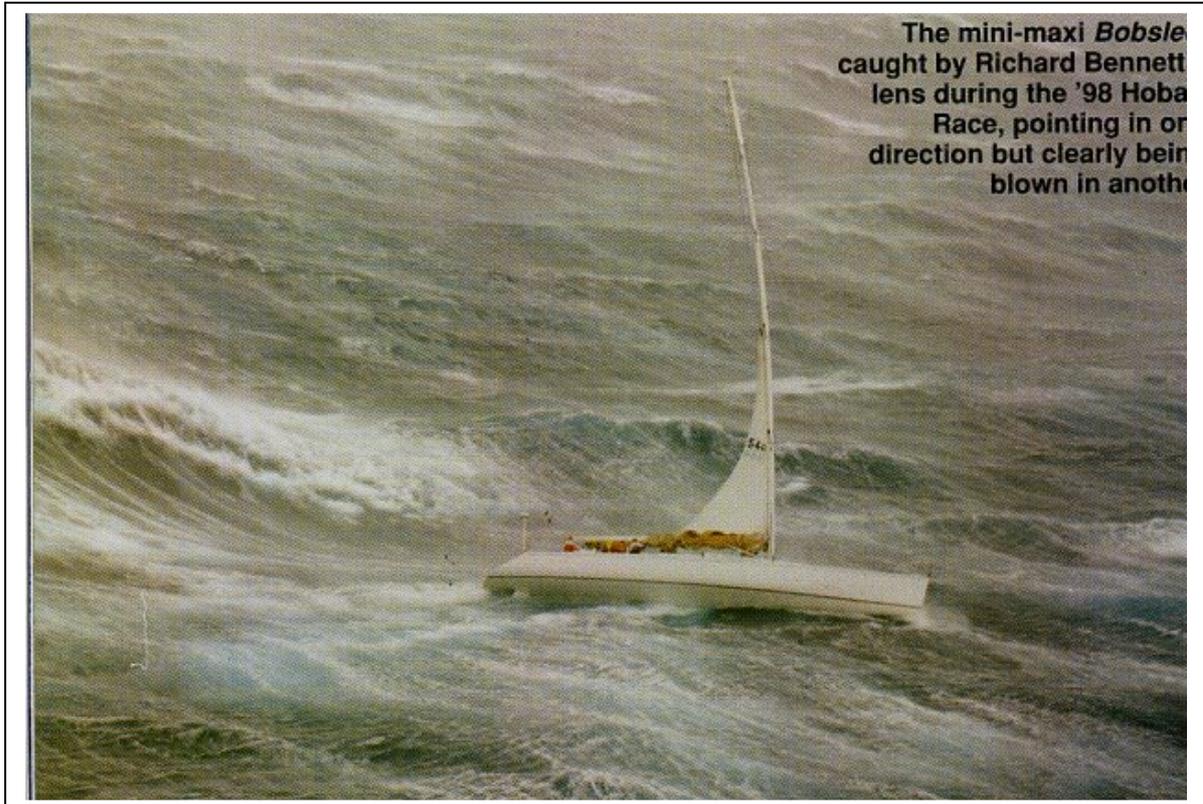
Le gain de raideur à 15° de gîte est sensiblement de 9% entre la quille angulée à 40° et 55°. Mais dans ces 3 cas la catégorie A serait théoriquement refusée, car l'angle Avs est inférieur au minimum requis (108°).

Il faut remarquer que dans ces trois cas le RPS est toujours sensiblement égal à 140°.

La quille pendulaire augmente la puissance disponible du bateau et diminue l'angle de chavirage, c'est l'évolution de ce dernier paramètre qui peut être dangereux. Tout en étant très éloigné de la stabilité générale d'un multicoque, le skipper peut se laisser abuser par ce sentiment de puissance et de stabilité très importante aux angles de gîte usuels.

Par très mauvais temps, la tentation d'utiliser la quille pendulaire est peut-être discutable.

Certes le bateau va mieux résister aux forces voulant le faire chavirer, mais l'angle de chavirage sera plus facilement atteint, surtout que dans cette situation, la pente et l'énergie des vagues va intervenir défavorablement. Le seul point favorable dans cette situation est que le plan anti-dérive est très diminué (on suppose que les dérives sont remontées) ce qui favorise le dérapage du bateau sur l'eau.

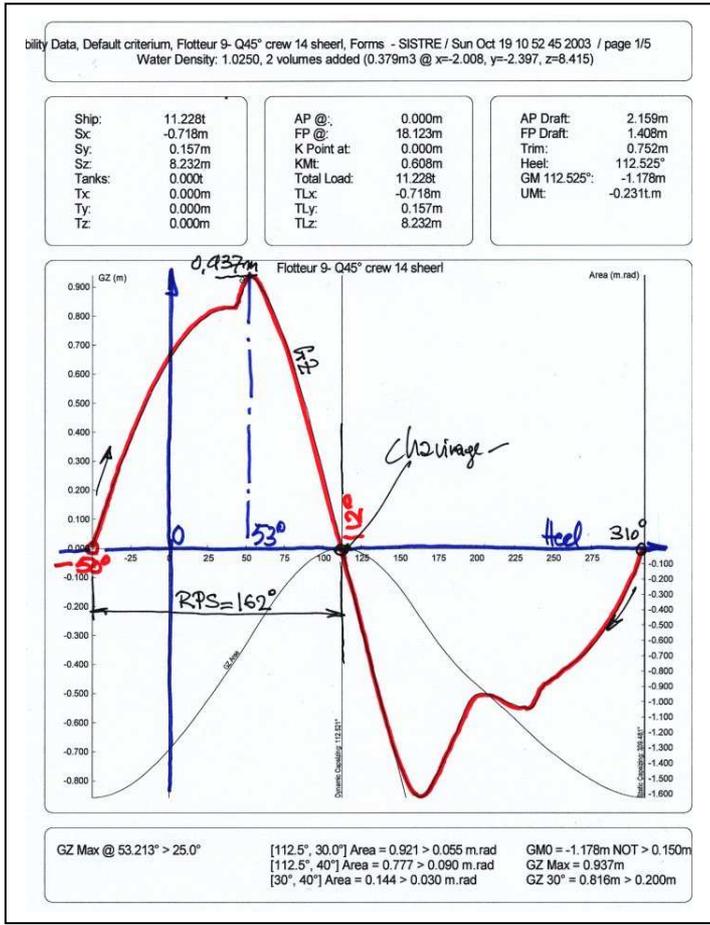


Quelle serait la réaction de ce bateau avec une quille angulée à 40° ?

L'étude ci-dessus est une étude de stabilité statique. La stabilité dynamique est bien sûr beaucoup plus faible, notamment l'angle  $\Delta v_s$  diminue énormément en dynamique. La stabilité statique donne quand même une excellente appréciation de l'aptitude d'un bateau à résister au capsize, et représente une bonne base de réflexion pour le Special Regulations Committee

#### Que recherche les architectes avec les quilles pendulaires ?

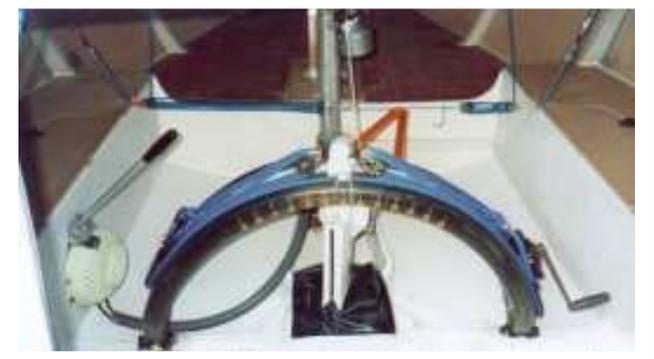
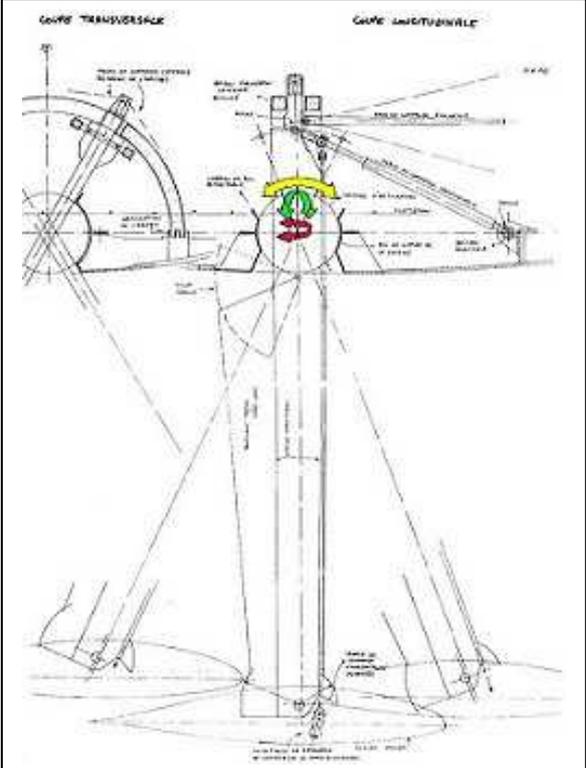
L'intérêt de la quille pendulaire est de moduler le moment de redressement en fonction des besoins (jusqu'à 30% de plus environ du moment de redressement quille dans l'axe). La quille pendulaire va donc permettre de dessiner des bateaux moins large afin de diminuer la surface mouillée et le maître couple immergé. La stabilité de forme n'est plus nécessaire. Certes le rappel des équipages sera moins efficace, mais il agira juste comme un complément. Dans l'absolu, les architectes devraient dessiner des carènes de plus en plus proche de celle des coques centrale des trimarans et obtenir la stabilité nécessaire avec la quille pendulaire et les performances hydrodynamique avec des dérives (ou des ailettes ? ?) possédant des profils asymétriques.



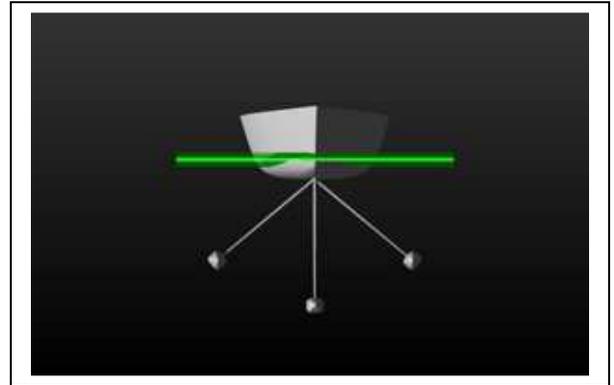
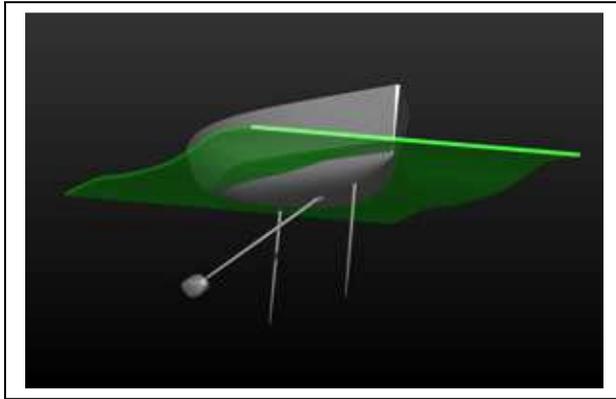
Il est possible d'imaginer un tel projet sans prendre en compte sa validité en terme de performance.

Il est évident que face à de tels projets, la Norme CE 12217 puisse être un désorientée.

Si on consulte Internet on s'aperçoit que l'imagination est une réalité dans le domaine des quille pendulaire. Ci-joint quelques extraits



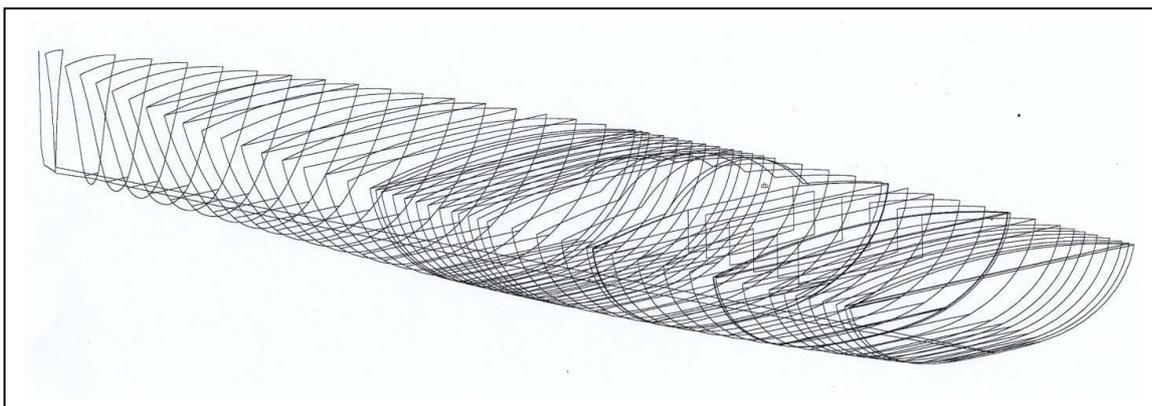
Système breveté sans utilisation d'hydraulique (3 rotations possible)



Installation d'une quille pendulaire sur un ancien bateau (modification).

### **Influence de la quille pendulaire sur un bateau « large »**

#### Modèle



Dessin type IMOCA

LOA 18.288

BMAX= 5.77

BWL : 3.72 m

TE : 4.50

Bulbe 3.2 T

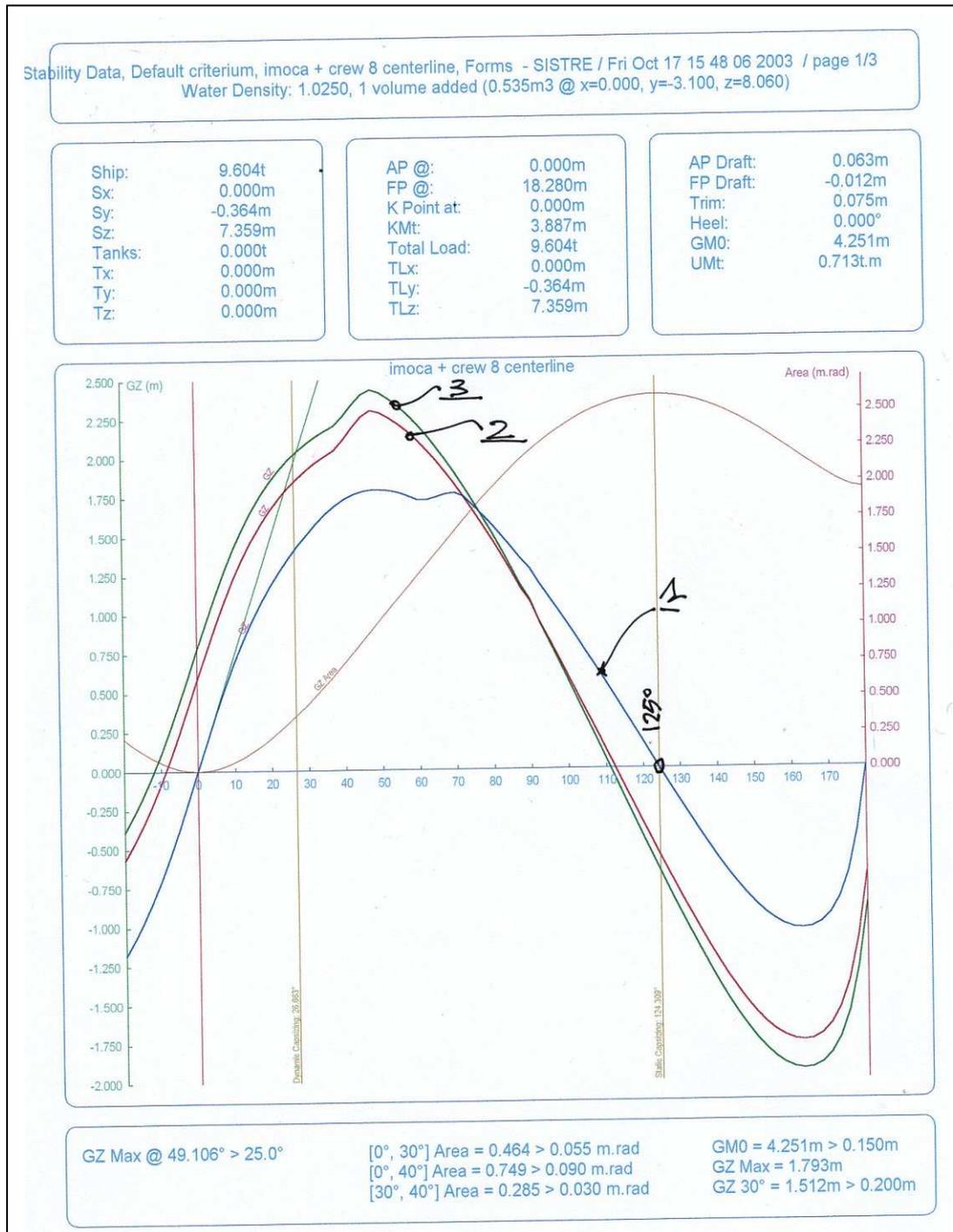
Voile de quille 1.0 T

Surface de voile au près : 250 m<sup>2</sup>

Déplacement armé, avec un équipage de 8 personnes : 9600 Kg

La box-rule IMOCA génère obligatoirement des bateaux très larges, car elle impose (voir préambule) que la gîte ne dépasse pas  $10^\circ$  (sans équipage, ni voiles à poste) lorsque la quille est basculée complètement d'un coté ou que les ballasts d'un bord sont remplis. Cette règle impose de dessiner des bateaux larges afin d'avoir une stabilité de forme qui limite la gîte lorsque la quille est basculée.

### Evolution de la stabilité suivant les configurations



L'angle Avs correspond au chargement 8 équipiers, bateaux prêt pour la régata. La jauge IMOCA impose un angle Avs de  $127^{\circ}5$  bateau vide, sans voiles, ni équipage.

*Courbe 2 :*

La quille est angulée de  $35^{\circ}$ , l'équipage est sur le pont centré.

L'augmentation du moment de redressement est importante (28%)

*Courbe 3 :*

La quille est toujours angulée de  $35^{\circ}$ , mais l'équipage est au rappel.

Pour ce type de bateau IMOCA, nous avons limité le nombre d'équipiers à 8 car les bateaux IMOCA sont initialement conçus pour les courses en solitaire donc peu aménagés.

L'augmentation du moment de redressement est de l'ordre de 40%.

Par contre dans ces deux dernier cas l'angle Avs se situe vers  $112^{\circ}$  et  $111^{\circ}$ .

L'angle limite minimum étant pour ce cas de chargement de (norme CE catégorie A) :  $110^{\circ}7$ .

Ces bateaux sont aussi très proches de la limite minimum imposée par la Norme CE (angle Avs en catégorie A) .

Paradoxalement les bateaux appartenant à la classe IMOCA, bien que définis comme des voiliers « OPEN », sont beaucoup plus sage en terme d'évolution. Cela tient uniquement à la règle des  $10^{\circ}$ .

L'architecte possède peu de liberté, on constate que les seules évolutions porte sur les appendices, les matériaux, mais que globalement les carènes sont toutes assez proches.

## **Conclusions**

Il est très compliqué de conclure sur cette évolution de l'architecture.

On peut émettre un certain nombre de constat :

- Que la règle limitant la gîte (bateau « upright ») sous l'effet de la quille pendulaire (ou des ballasts) permet à priori de limiter les excès architecturaux.
- Qu'en contrepartie, elle va créer une standardisation des dessins et supprimer toutes innovations.
- Qu'introduire cette règle suppose que TOUS les bateaux doivent être contrôlés.
- Que les ballasts donnent naissance à des bateaux beaucoup moins extrêmes, car leur volume est limité par celui de la coque. De plus les ballasts ne sont vraiment intéressant que si le bateau est large.
- Que les VPP (c'est à dire les performances) vont rapidement montrer que dessiner des carènes extrêmes (ratio LOA/Bmax très grand) n'est pas intéressant.
- Qu'il faut peut-être imposer un compartimentage (cloisons étanches) de la coque afin de s'assurer de sa flottabilité en cas de capsizing.
- Etc...

Jean SANS