



STABILITE des MULTICOQUES

Préambule

Le chavirage des multicoques demande une analyse plus complexe que celle des monocoques, fussent-ils équipés de quilles basculantes. Pour ces derniers, l'étude du chavirage statique suffit pour déterminer des critères de stabilité minima afin que les bateaux résistent bien au chavirage et s'ils chavirent, retrouvent leur position « upright¹ ».

Dans le cas des multicoques, il faut d'abord rappeler qu'ils ne possèdent que 2 positions d'équilibre :

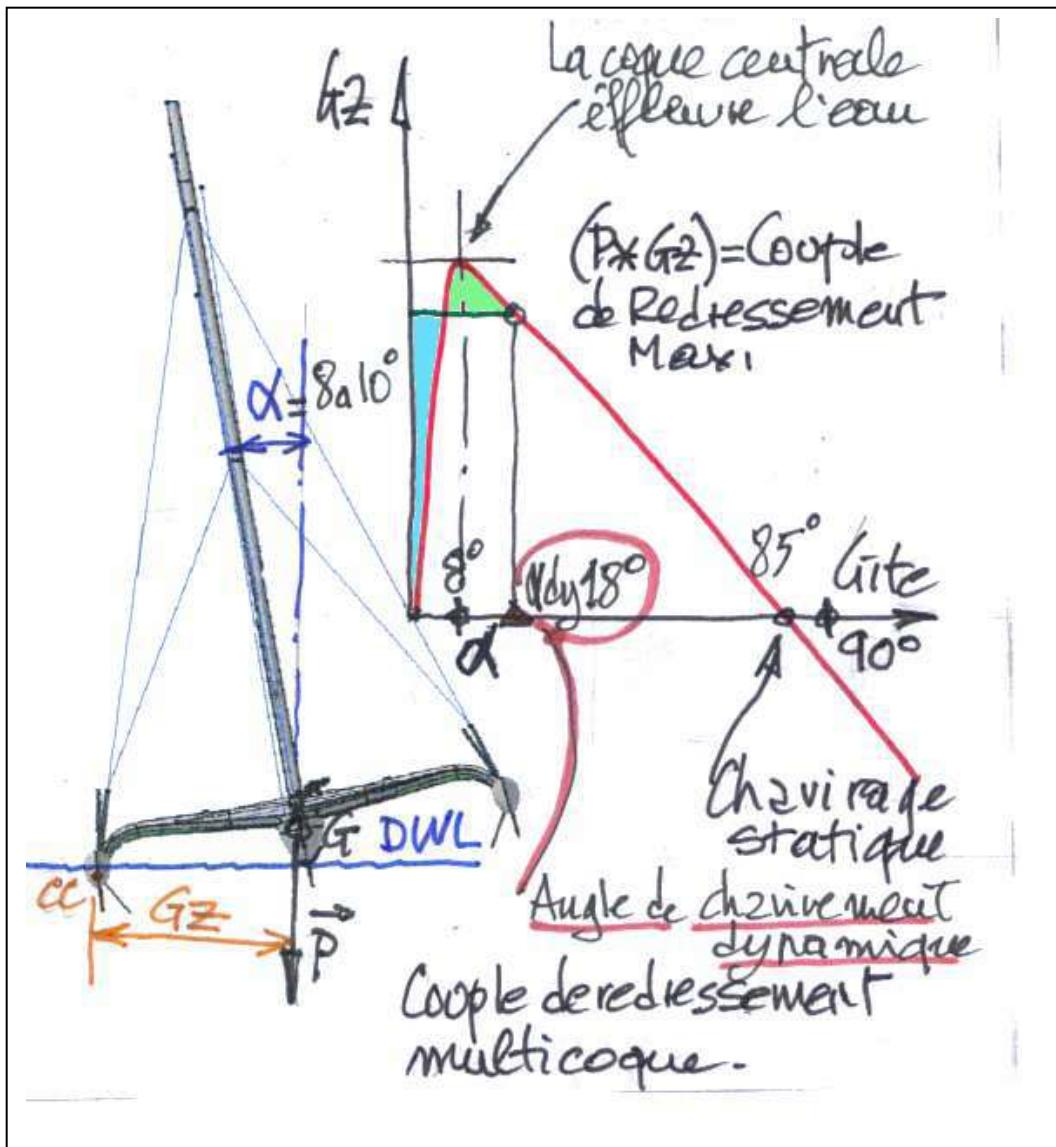
1. Position normale (upright)
2. Position chavirée à 180°

La particularité d'un multicoque océanique étant qu'il peut passer de la position 1 à la position 2 (Capsize) mais JAMAIS de la position 2 à la position 1.

Un multicoque océanique est aussi caractérisé par un couple de redressement maximal, nous le nommerons plus loin dans l'exposé : Couple résistant au chavirage, vers 8 à 15° de gîte du bateau, suivant que l'on soit en présence d'un Catamaran ou d'un Trimaran. L'angle de gîte correspondant au couple de redressement maximale étant obtenu :

- Pour un Catamaran, lorsque la coque au vent sort complètement de l'eau, tout le volume immergé est dans la coque sous le vent.
- Pour un Trimaran, lorsque la coque centrale déjauge entièrement (à fleur d'eau), tout le volume immergé est dans le flotteur sous le vent.

¹ Cela correspond à un chavirage complet (360°), ce qui se traduit généralement par un démâtage, toutefois l'intégrité du flotteur est préservée.



Le chavirage d'un Multicoque peut provenir de 2 situations générales :

Hypothèse 1 : Chavirage sensiblement latéral sous un vent extrêmement violent (> 60 nds), aucune voile n'est hissé, la vitesse est voisine de zéro. Le multicoque chavire sous l'effet du vent sur le mat et la coque.

Hypothèse 2 : Chavirage alors qu'il navigue à grande vitesse. Dans ce cas le chavirage est principalement lié aux effets dynamiques.

Etude du chavirage latéral (vent très violent, bateau à sec de toile) :

Hypothèses N°1 ci-dessus.

Dans cette configuration nous négligerons les forces dynamiques (liées à l'accélération du bateau), seules les forces statiques seront prises en compte. Le souhait du skipper étant que le bateau ne soit pas retourné comme une crêpe par le vent.

Analyse des forces et couples créés :

- **Couple résistant au chavirage**, c'est celui qui maintient le multicoque à l'endroit sur l'eau.

L'expression physique de ce couple est :

Poids du bateau * Distance horizontale entre le centre de gravité et le centre de carène de la coque ou du flotteur sous le vent.

- Couple pouvant créer le chavirage, on le nommera couple Aérodynamique (couple Aéro). Il est créé par :
 - **Le couple aéro généré par le mat perpendiculaire au vent,**
 - **Le couple aéro généré par prise au vent de la muraille latérale du multicoque.**

Les expressions physiques de ces deux couples aéro sont :

Couple Aéro mat

Force aéro créée par le mat * distance verticale entre le point d'application de cette force (sensiblement mi-hauteur du mat) et le centre de dérive sous le vent.

Couple Aéro muraille (coque)

Force aéro créée par la muraille * distance verticale entre le point d'application de cette force (sensiblement mi-hauteur de la muraille) et le centre de dérive sous le vent.

Condition des calculs des deux couples aéro ci-dessus (vent de base).

Navigation en Catégorie 0 OSR Vitesse du vent 85 nœuds (43.7 m/s)

Navigation en Catégorie 1 OSR Vitesse du vent 70 nœuds (36.0 m/s)

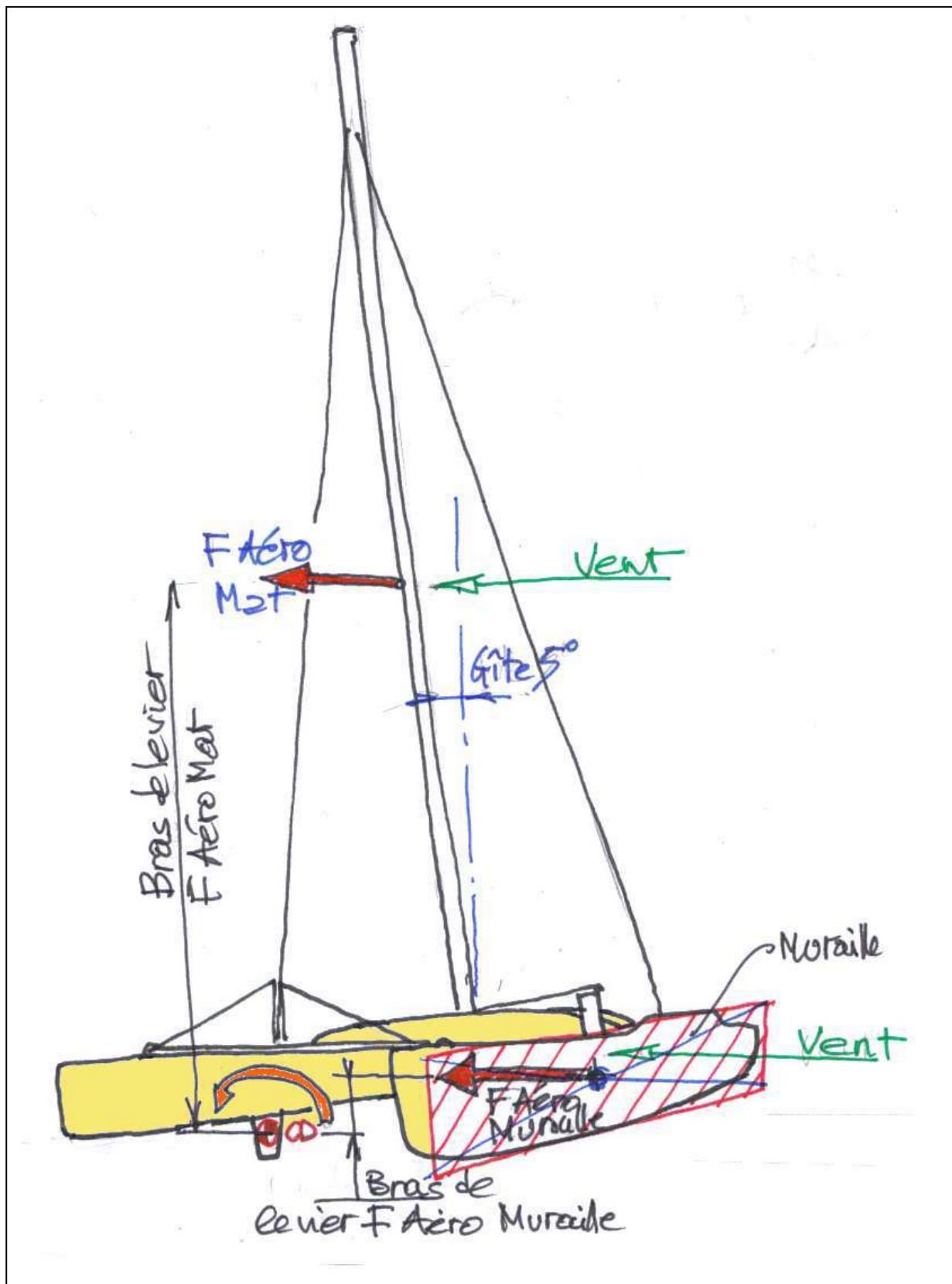
HYPOTHESE N°1 : le multicoque est « appuyé » sur le flotteur ou la coque sous le vent, la surface de l'eau est considérée comme sensiblement horizontale.

La gîte est faible, de l'ordre de 5° pour un catamaran, 8 à 10° pour un trimaran).

CATAMARAN (exemple ORANGE II)

Caractéristiques générales :

LOA	: 36.80m	Franc-bord moyen	: 2.68m
Bau	: 18m (entre axe 16.5m)	centre de dérive	: 1.25 sous la DWL
Tirant d'air	: 48m	(dérive en position haute)	
H mat	: 45m		
Corde mat	: 1.05m		
Déplacement de base	: 28000 kg		



Couple résistant au chavirage (masse du bateau * entraxe/2)
 Soit : $28000 * 9.81 * 16.5/2 = 2266110 \text{ m.N} = 226611 \text{ m.daN}$

Force aéro créée par le mat

Force aéro mat (cat 0) exprimée en Newton =

$$0.5 * \text{masse volumique de l'air} * C_x * S * V^2$$

Masse volumique de l'air : 1.225 kg/m³

C_x : plaque perpendiculaire à un fluide, 1.24

S : surface latérale du mat perpendiculaire au fluide en m²

V : vitesse du fluide en m/s.

Soit **F aéro mat (cat 0)** = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (45 * 1.05) * 43.7^2 = 6853$ daN.

Force aéro créée par la muraille

F aéro muraille (cat 0) = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (36.8 * 2.68) * 43.7^2 = 14304$ daN

Couples aéro induits par ces deux forces :

1. Couple aéro mat (Cat 0)

Distance verticale = (H_{mat}/2) + h pied de mat/DWL + h₀ (profondeur Centre de dérive /DWL) = $45/2 + 4 + 1.25 = 27.75$ m

Couple aéro mat (cat 0) = 6853 * 27.75 = 190170 m.daN

2. Couple aéro muraille (Cat 0)

Distance verticale = (H_{muraille}/2) + h₀ (profondeur Centre de dérive /DWL) = $2.68/2 + 1.25 = 2.59$ m

Couple aéro muraille (Cat 0) = 14304 * 2.59 = 37047 m.daN

Somme des deux couples aéro créant le chavirage = 227218 m.daN

Ratio couple résistant au chavirage / couple créant le chavirage (couple aéro)

R = 226611 / 227218 = 0.997

On constate que dans cette hypothèse, le ratio est sensiblement égal à 1, ce qui signifie que la situation du catamaran est limite. Toutefois si l'expression de la force aéro sur le mat est sûrement proche de la réalité, celle de la force aéro sur la muraille est probablement surévaluée à cause des effets créés par la surface de l'eau. Ces effets sont de deux ordres : couche limite et création de turbulences dans les filets d'air. Ces deux effets conjugués diminuent la vitesse du vent. Si on applique un coefficient de 0.75 à la vitesse du vent de base, on obtient sur la muraille:

Vent Nominal sur la muraille = vent de base * 0.75 = $43.7 * 0.75 = 32.77$ m/s

Dans ces conditions la force Aéro muraille (cat 0) devient : 8043 daN

Le couple aéro muraille (Cat 0) = $8043 * 2.59 = 20833$ m.daN

Ce qui donne un **Ratio de 1.07** et laisse apparaître une marge de sécurité de 7%.

TRIMARAN (exemple 60' ORMA)

Caractéristiques générales :

LOA : 18.28m

Bau maxi autorisé : 18.7m
(entre axe 17.8m)

Centre de dérive (flotteur sous le vent, foil relevé intégralement) : 0.25 sous la DWL

Tirant d'air : 30.48m

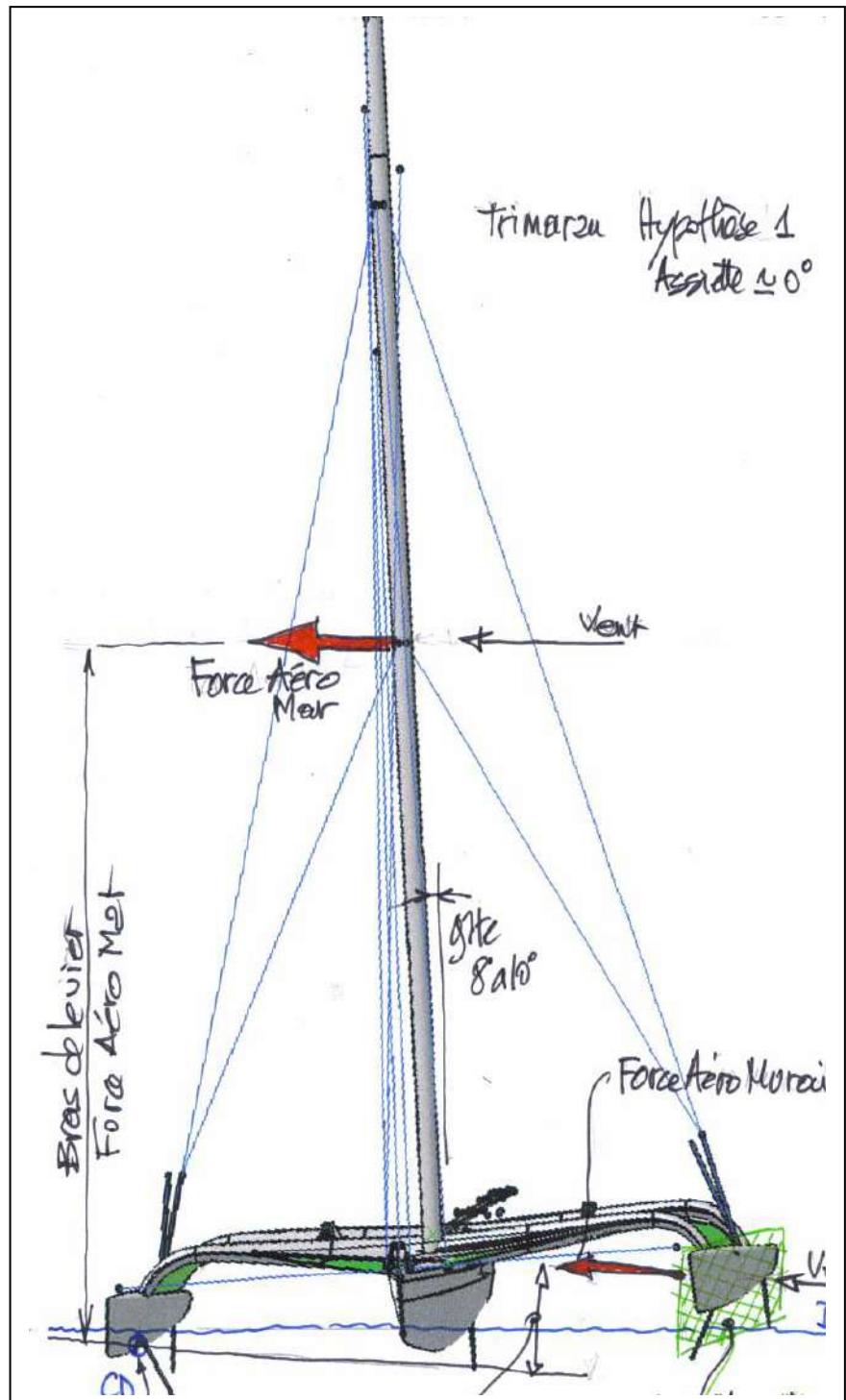
H mat : 28.50m

Corde mat maxi : 0.85m

Déplacement de base :

5800 kg

Hauteur moyenne du livet
du flotteur bateau appuyé
(25% du déplacement) sur
flotteur sous le vent : 2.40 m



La vitesse du vent prise en compte est de 70 nœuds, cette vitesse correspond à une éventualité de très mauvaises conditions météorologiques en hiver en Atlantique nord.

Couple résistant au chavirage = Poids du multicoque * entraxe /2

Soit : $5800 * 9.81 * 17.8/2 = 506392 \text{ m.N} = 50639 \text{ m.daN}$

Force aéro créée par le mat

Soit **F aéro mat (cat 1)** = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (28.5 * 0.85) * 36^2 = 2384 \text{ daN}$.

Force aéro créée par la muraille

F aéro muraille (cat 1) = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (18.28 * 2.4) * 36^2 = 4318 \text{ daN}$

Couples aéro induits par ces deux forces :

1. Couple aéro mat (Cat 1)

Distance verticale = $(H_{\text{mat}}/2) + h_{\text{pied de mat/DWL}} + h_{\text{o}}$ (profondeur Centre de dérive /DWL) = $28.5/2 + 1.98 + 0.25 = 16.48 \text{ m}$

Couple aéro mat (cat 0) = $2384 * 16.48 = 39288 \text{ m.daN}$

2. Couple aéro muraille (Cat 1)

Distance verticale = $(H_{\text{muraille}}/2) + h_{\text{o}}$ (profondeur Centre de dérive /DWL) = $2.40/2 + 0.25 = 1.45 \text{ m}$

Couple aéro muraille (Cat 0) = $4318 * 1.45 = 6261 \text{ m.daN}$

Somme des deux couples aéro créant le chavirage = 45549 m.daN

Ratio couple résistant au chavirage / couple créant le chavirage (couple aéro)

R = $50639 / 45549 = 1.112$

Le trimaran dispose dans cette configuration une marge de 11% de sécurité.

Remarque : Une augmentation de ma masse du trimaran de 800 kg (ballast liquide obligatoire en 2006 pour les course en solitaire) porte le Couple

Résistant au Chavirage à :

$(5800 + 800) * 9.81 * 17.8/2 = 576239 \text{ m.N} = 57623 \text{ m.daN}$

Le ratio passe ainsi de 1.112 à 1.26, ce qui porte la marge de sécurité à 26%.

Variante de l'Hypothèse N°1 : le multicoque est « appuyé » sur le flotteur ou la coque sous le vent, mais il se trouve sur une vague (houle) qui lui donne une inclinaison de 20° environ.

CATAMARAN

Couple résistant au chavirage = Poids du multicoque * Gz

Gz = Entraxe * cos (20°)

Soit : $28000 * 9.81 * 16.5/2 * \cos 20^\circ = 2129440 \text{ m.N} = 212944 \text{ m.daN}$

Force aéro créée par le mat

Soit **F aéro mat (cat 0)** = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (45 * 1.05 * \cos 20^\circ) * 43.7^2 = 6439$ daN.

Force aéro créée par la muraille

F aéro muraille (cat 0) = $0.5 * 1.225 * 1.24 * (36.8 * 2.68 * \cos 20^\circ) * 43.7^2 = 13441$ daN

Couples aéro induits par ces deux forces :

3. Couple aéro mat (Cat 0)

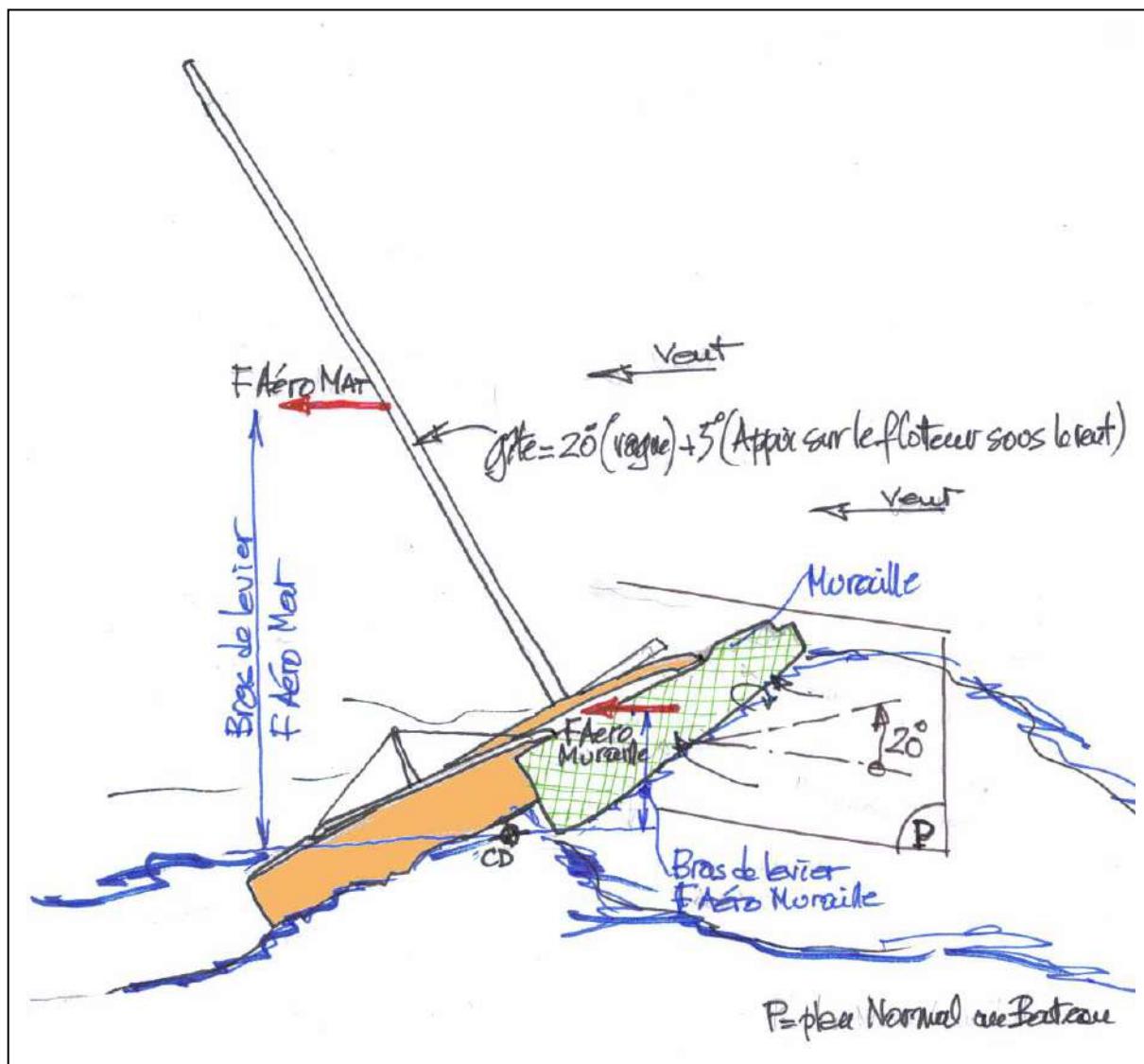
Distance verticale = $((H_{\text{mat}}/2) + h_{\text{pied de mat/DWL}} + h_{\text{o}})$ (profondeur Centre de dérive /DWL)) * $1/\cos 20^\circ = (45/2 + 4 + 1.25) * 1/\cos 20^\circ = 29.53$ m

Couple aéro mat (cat 0) = $6439 * 29.53 = 190143$ m.daN

4. Couple aéro muraille (Cat 0)

Distance verticale = $((H_{\text{muraille}}/2) + h_{\text{o}})$ (profondeur Centre de dérive /DWL)) * $\cos 20^\circ = (2.68/2 + 1.25) * \cos 20^\circ = 2.43$ m

Couple aéro muraille (Cat 0) = $13441 * 2.43 = 32661$ m.daN



Somme des deux couples aéro créant le chavirage =222805 m.daN

**Ratio couple résistant au chavirage / couple créant le chavirage (couple aéro)
R = 212944 / 222805 = 0.956**

TRIMARAN

Couple résistant au chavirage = Poids du multicoque * entraxe /2 * cos 20°

$$\text{Soit : } 5800 * 9.81 * 17.8/2 * \cos 20^\circ = 475852 \text{ m.N} = 47585 \text{ m.daN}$$

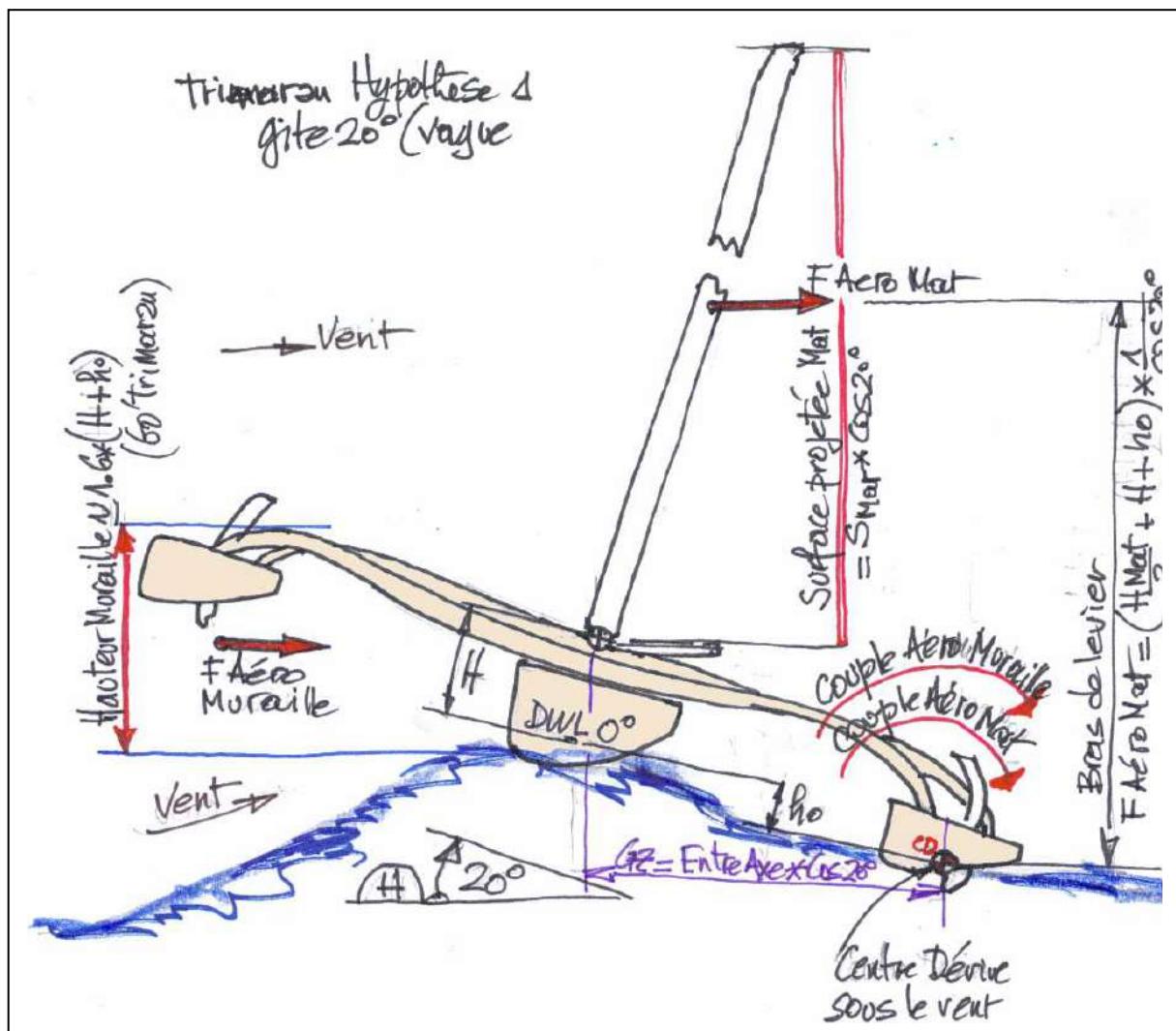
Force aéro créée par le mat

Soit $F_{aéro mat (cat 1)} = 0.5 * 1.225 * 1.24 * (28.5 * 0.85 * \cos 20^\circ) * 36^2 = 2384 \text{ daN.}$

Force aéro créée par la muraille

Hauteur muraille = $H+h_0 = 2+0.25 = 2.25$ (valeur moyenne sur un 60')

F aéro muraille (cat 1) = $0.5 \cdot 1.225 \cdot 1.24 \cdot (18.28 \cdot (H+h_0) \cdot 1.6) \cdot 36^2 = 64775 \text{ N} = 6477 \text{ daN}$





Couples aéro induits par ces deux forces :

1. Couple aéro mat (Cat 0)

Distance verticale = ((H_{mat}/2) + h pied de mat/DWL + h₀ (profondeur Centre de dérive /DWL)) * 1/Cos 20° = (28.5/2 + 1.98 + 0.25)* 1/cos 20° = 17.53 m

Couple aéro mat (cat 1) = 2384 * 17.53 = 41809 m.daN

2. Couple aéro muraille (Cat 0)

Distance verticale (approximation) = ((Entraxe/2) * Sin 20° - h₀) + H muraille/2 = 3.9m

Couple aéro muraille (Cat 1) = 6477 * 3.9 = 25383 m.daN

Somme des deux couples aéro créant le chavirage = 67192 m.daN

Ratio couple résistant au chavirage / couple créant le chavirage (couple aéro)
R = 47585 / 67192 = 0.708

La configuration du trimaran apparaît comme très différente de celle du catamaran (la plate forme du trimaran peut se trouver entièrement en porte à faux sur la vague), cela crée une situation qui augmente la surface de la muraille (la hauteur de la prise au vent).

Cela se traduit par un Ratio :

Couple résistant au chavirage / Couple créant le chavirage (couple Aéro) beaucoup plus faible (0.708) que celui en assiette bateau sensiblement horizontal (1.12). La situation du Trimaran devient relativement hasardeuse comparée à celle du Catamaran qui dans les deux configurations possède un ratio sensiblement égal à 1 (0.997 et 0.956).

Les calculs considèrent que le vent est régulier et constant et qu'il n'y a pas d'effet de frottement et de turbulences dans la zone proche de la surface de l'eau. Ces effets diminuent l'efficacité du vent sur la muraille notamment. Le couple aéro crée par le vent sur la muraille est donc moins important que celui calculé ci-dessus. Par contre l'effet créé par le trampoline lorsque le bateau est gîté à 20° (le vent s'engouffre violement sous le trampoline) n'est pas pris en compte car difficilement quantifiable.

On peut supposer que le fait de considérer que la vitesse du vent n'est pas altérée par l'effet de surface de l'eau, compense le couple créé par la prise au vent du trampoline.

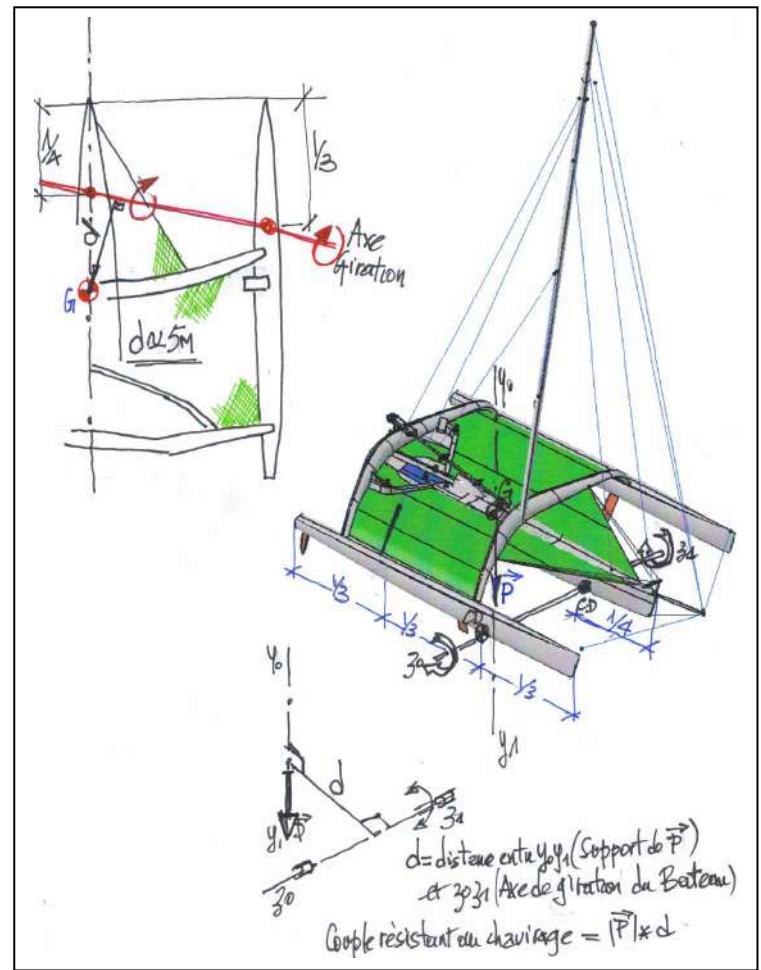
Étude du chavirage dynamique (le multicoque navigue au portant à grande vitesse) : Hypothèses N°2

TRIMARAN

Les calculs prennent en compte des paramètres liés à l'énergie emmagasinée par le multicoque (masse, accélération) et à la situation lorsque le multicoque « bloque » dans un train de vagues au niveau principalement du flotteur sous le vent (décrochage du foil).

Le bateau est fortement ralenti (la vitesse peut ainsi passer de 30 nœuds à 8 nœuds puis moins en quelques secondes), il passe d'une assiette longitudinale quasi horizontale appuyée sur le foil sous le vent à une assiette très négative (enfournement du flotteur sous le vent et en moindre mesure de la coque centrale).

L'axe de rotation est oblique, il peut être situé entre



- Un point des œuvres vives du flotteur à un tiers de LHT de l'étrave. Le foil étant entièrement déployé, le centre de dérive du flotteur dans cette assiette se trouve relativement profond.
- Un point des œuvres vives de la coque centrale à un quart de LHT de l'étrave.

Le paramètre le plus facile à calculer est le couple résistant au chavirage. Il se calcule comme dans l'hypothèse n°1, soit le produit de la masse du multicoque par le bras de levier (Gz).

Par contre le Gz n'est plus transversal comme dans l'hypothèse N°1, il correspond à la distance horizontale entre le Centre de Gravité du multicoque et l'axe de rotation défini ci-dessus. Pour un 60', cette distance est de l'ordre de 5m.

Le couple résistant au chavirement est donc sensiblement égal à :

$$5800 * 5 = 29000 \text{ m.daN}$$

On remarquera simplement que ce couple est 42% plus faible que celui correspondant au couple résistant au chavirage transversal calculé dans l'hypothèse n°1(50639 m.daN).

L'ajout d'un ballast de 800 kg, augmente ce couple de 14% (33000m.daN), on se retrouve ainsi à 53% du couple en chavirage transversal.

Ce couple calculé dépend essentiellement de la position de l'axe de giration du multicoque, position tributaire des vagues, des mouvements du bateau, de l'instant où décroche le foil. Tous ces paramètres sont non quantifiables. Un recul du centre de poussé de 1m (5.5% de LHT) au niveau du flotteur et de la coque centrale, aboutit à un couple de résistance au chavirage de 23200 m.daN, soit 46% du même couple en stabilité transversale.

On perçoit facilement et la réalité des chavirages le confirme, que c'est cette configuration (navigation au portant à grande vitesse) qui est très souvent à l'origine des chavirages.

Le potentiel physique de résistance au chavirage du multicoque étant représenté par le Couple de résistance au Chavirage. Dans ce Couple le seul élément connu et intangible est la masse du bateau, le bras de levier étant relativement aléatoire.

L'équation étant :

$$\boxed{\text{Couple résistant au chavirage}} > \boxed{\text{Couple créé par la Force Aéro sur les voiles}} - \boxed{\text{Couple restitué par l'énergie emmagasinée (Effet d'inertie angulaire, fonction des masses en mouvement et de leur accélération)}}$$

Reste au skipper (ou à l'architecte ?) (ou au système de Jauge ?) à tout faire pour que cette inéquation soit toujours vraie....