

# Carènes et vagues

## Résumé du discours de P.-A. Reymond, expert naval, lors du forum du GIM

Une des lois fondamentales de BERNOULLI dit que la somme des énergies cinétiques et potentielles, dans un système complet, reste constante. Cela signifie que pour un système de vagues dans un fluide, la vitesse engendre une certaine hauteur de vagues et vice versa. Ceci explique partiellement la formation du système de la vague d'étrave et de la vague de poupe pour des objets flottants qui se meuvent dans un liquide.

Pour des coques à déplacement on obtiendra deux trains de vagues de surface, des vagues divergentes et des vagues traversières. Les vagues divergentes font un angle d'environ 20° avec la ligne de direction du bateau et ne peuvent interférer les unes les autres. Par contre, les systèmes de vagues traversières se développent sur le trajet du bateau. Il peut donc y avoir interaction entre la vague d'étrave et la vague de poupe. Il en résultera que si les deux systèmes sont totalement hors de phase, on aura annulation des deux vagues. Par contre si les vagues sont en phase, on aura la formation d'un train de vagues important. A rappeler que la longueur des vagues de ce système sera relativement semblable, vu qu'elle est provoquée par la vitesse propre du bateau. Par contre l'amplitude dépendra de la forme de coque de même que de la forme de la carène aux endroits où il y a création de la vague.

On rappellera que pour un monocoque, la vitesse de coque critique se retrouve autour d'un rapport vitesse/flottaison ( $V / \sqrt{fl}$ ) de l'ordre de 2,4 dans le système métrique et de 1,34 dans le système impérial. Cela signifie que pour une coque (conventionnelle), en multipliant la racine carrée de la longueur de la flottaison par ce facteur on obtient la vitesse maximum de la coque avant déjaugeage, vitesse exprimée en noeuds. A ce stade, la vague d'étrave et la vague de poupe ne forment pratiquement plus qu'un seul et même ensemble.

### Notions sur la stabilité d'un navire

Cette dernière est directement dépendante du moment d'inertie de la coque, donc de sa forme. On peut démontrer que la différence de moment d'inertie entre un monocoque et un multicoque relative-

ment comparables sont dans une proportion de l'ordre de 1 à 7.

A déplacement égal, la hauteur métacentrique GM d'un ensemble multicoque peut être facilement neuf fois supérieure à celle d'un monocoque. Par ailleurs on sait qu'un multicoque cherche à être plus léger qu'un monocoque, ne serait-ce que par l'absence de lest.

La stabilité d'un navire dépend à la fois du moment d'inertie de sa carène, de son déplacement (poids), de son centre de poussée, le tout étant inter-dépendant.

La notion de couple de redressement est illustrée au croquis no. 1.

Pour un multicoque, le principe reste le même, mais les valeurs changent grandement (croquis no. 1).

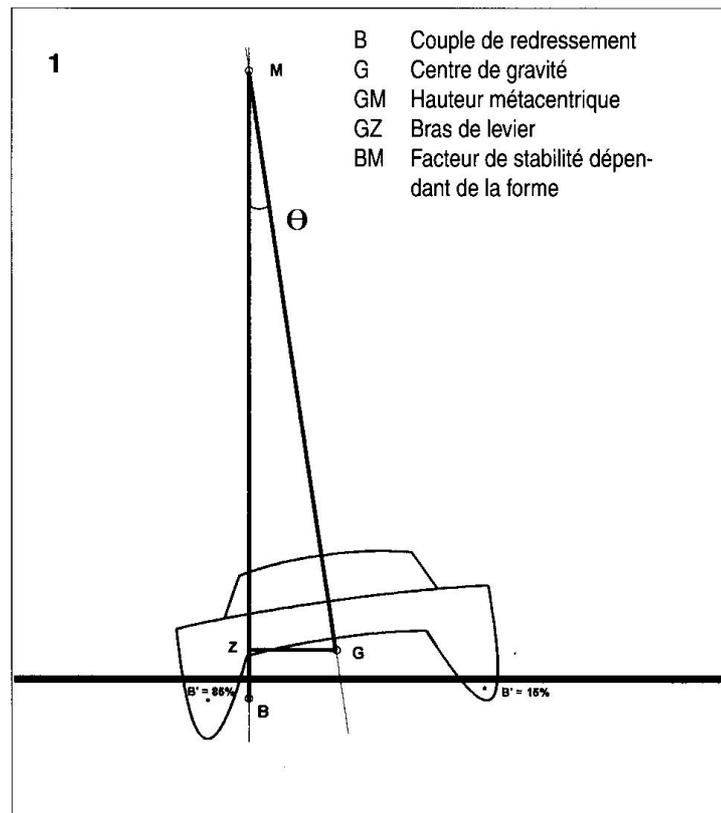
Quant au couple de redressement d'un navire, il dépend directement du GZ, lui-

même dépendant de l'angle de gîte de la coque et qui peut être calculé par une formule mathématique.

$$GZ = (GM + 1/2 BM \tan^2 \Theta) \sin \Theta$$

Si l'on prend dans notre exemple un angle de gîte de 18° on voit que dans une telle situation il faudra neuf fois plus de force pour incliner un catamaran qu'un monocoque. Si un vent de l'ordre de 13 noeuds entraîne une telle gîte de 18° sur un monocoque, il faudrait donc théoriquement sur un catamaran de même surface vélique un vent de 42 noeuds pour entraîner une même gîte ! On peut également calculer que le même vent de 13 noeuds entraînera une gîte de l'ordre de 2° seulement sur le catamaran, autrement dit, une gîte à peine perceptible.

Ceci démontre la difficulté qu'il y a de juger, sur un catamaran, de l'importance



des efforts sur la voile. Alors que sur un monocoque on se retrouve assez rapidement inconfortable et qu'il semble logique de prendre un ris, sur un multicoque on a une impression de sécurité et d'un confort qui ne laisse pas présager que l'on a atteint les limites où la sécurité de la navigation demande une réduction de la toile.

## Types

On peut considérer qu'il y a trois types de multicoques:

### Les catamarans

Ce type de bateau se compose de deux coques avec un axe de symétrie par rapport à la ligne centrale du bateau, ces coques étant jointes soit par des poutres, soit par une nacelle centrale. Les coques en elle-mêmes peuvent être asymétriques.

### Les trimarans

Trois coques, généralement une coque principale au centre et deux flotteurs latéraux avec un axe de symétrie au milieu du navire. Les flotteurs latéraux peuvent eux-mêmes être asymétriques.

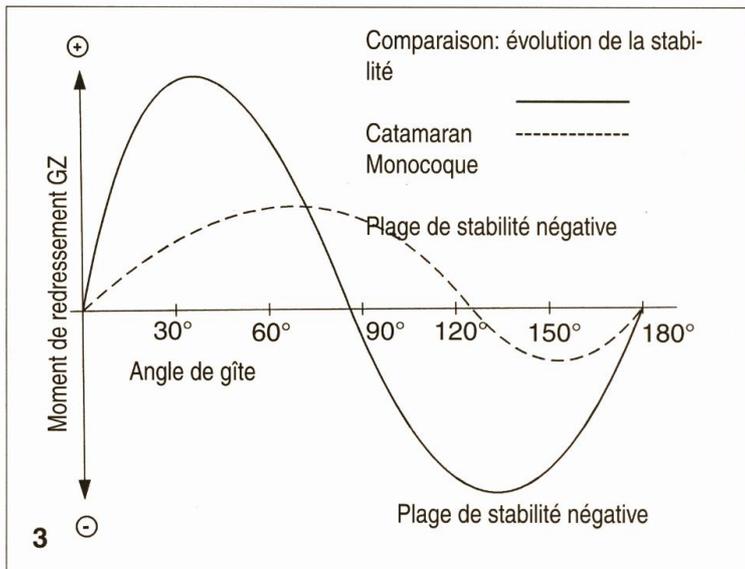
### Les proas

Il s'agit d'une combinaison de deux coques asymétriques avec une coque principale et un flotteur, ce dernier servant de flotteur lorsqu'il est sous le vent et, lorsqu'il est au vent, de support pour le poids de l'équipage, ce qui permet de garantir la stabilité (par exemple Crossbow). A noter que les proas virent de bord en changeant de direction, c'est-à-dire que l'étrave devient poupe et vice versa.

## Éléments conceptuels

### Les formes

La configuration des multicoques donne une haute stabilité de par la distribution des volumes de flottabilité lors de la gîte.



Ainsi peu ou pas de lest est nécessaire pour garantir la stabilité. En comparaison avec des monocoques il est donc possible d'obtenir des navires dont le déplacement est nettement inférieur. Cela signifie que les coques et flotteurs peuvent avoir un volume moindre et être beaucoup plus fins de forme. La résistance due à la formation de vagues et à la résistance à la friction est nettement inférieure et ainsi des vitesses beaucoup plus grandes sont atteignables. Egalement, vu la très haute stabilité latérale, plus de voile peut être portée et ainsi plus de force propulsive peut être obtenue.

Malgré les hautes vitesses atteintes, la forme des carènes des multicoques doit être considérée comme une forme à déplacement car il n'est pas prévu de générer des effets planants. L'extrême finesse

Les courbes montrent que les catamarans ont, en comparaison des monocoques, une grande stabilité au début. Si le cata s'appuie sur le flotteur au moment où B et G sont perpendiculaires, alors le bateau chavire sur le côté. – Sur un monocoque, le poids de la quille garantit encore un moment de redressement à un angle de gîte de 90° – Ces courbes sont naturellement des généralisations de ce qui peut se passer en réalité.

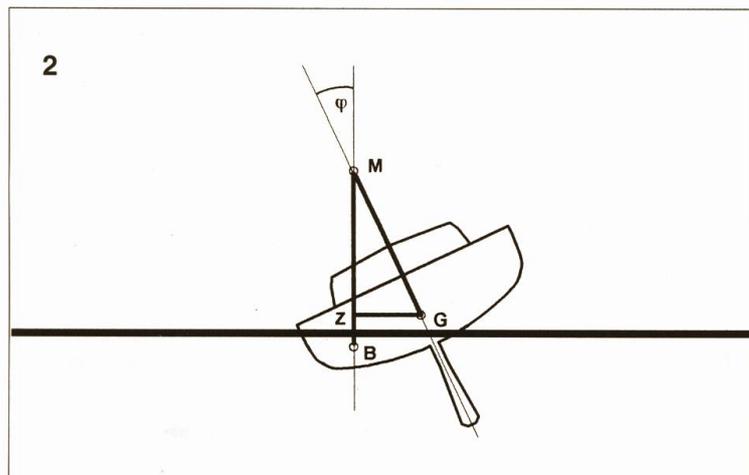
des formes produit un système de vagues beaucoup plus faible et il est donc peu probable d'atteindre un déjaugement, si ce n'est par un rapport volume/longueur nettement plus haut que sur des bateaux conventionnels.

### Les lignes des catamarans

Techniquement des sections immergées circulaires, un angle d'entrée très fin, un rapport longueur/largeur très élevé, un centre de flottabilité très en arrière (forme de coin), un déplacement léger, un franc-bord faible, un certain tulipage sur l'avant, peu ou pas d'élancement, un arrière à tableau ainsi qu'un coefficient prismatique élevé sont les caractéristiques principales des coques de catamaran.

### Les lignes trimarans

En ce qui concerne ceux-ci, la coque centrale doit être similaire à celle d'un catamaran. Les flotteurs latéraux doivent



avoir un angle d'entrée très fin, présenter une forme dite de «poisson», doivent normalement être plus courts que la coque centrale, présenter des sections circulaires ou en V, dépendants de la force latérale souhaitée. Les flotteurs peuvent être de type «volant» lorsque le bateau est droit ou ils peuvent participer au déplacement de l'ensemble des coques du trimaran. Les flotteurs peuvent être asymétriques.

#### La stabilité

En ce qui concerne les catamarans la stabilité est principalement due à la configuration du bateau. La stabilité de forme des coques n'est plus nécessaire comme dans le cas d'un monocoque.

Lorsque le catamaran est droit les deux coques se partagent le déplacement de manière égale. Lorsqu'il y a de la gîte et que la coque sous le vent reprend l'entier du déplacement, la coque au vent va commencer à se lever, à sortir de l'eau et à «voler». Si la coque sous le vent n'a pas le volume adéquat pour reprendre le total de la force de déplacement du bateau, ce dernier s'enfoncera jusqu'à ce que la coque au vent reprenne une partie de la stabilité. Sur des catamarans de régate il est usuel de donner à la coque un volume suffisant pour permettre au flotteur au vent de «voler».

La hauteur métacentrique GM est une unité qui nous permet de juger de la stabilité d'un navire. Sur un catamaran cette valeur est grande, vu la largeur de l'ensemble du voilier. Cependant, dès que la coque au vent se lève une augmentation de la gîte va dramatiquement réduire la valeur de ce GZ. On constate donc que cette forme de bateau donne une stabilité initiale très grande, mais une plage de stabilité positive bien réduite (voir croquis no 3).

Du fait que la stabilité de forme n'a pas d'importance les coques peuvent être dessinées pour tenir compte des autres critères telle que la réduction de la surface mouillée. Il doit dès le début de la conception du bateau être décidé si cette sur-

face mouillée doit être minimum lorsque le bateau est droit, gîté ou avec un flotteur hors de l'eau. Les sections semi-circulaires sont celles qui répondent le mieux à cette recherche du minimum de surface mouillée.

En ce qui concerne les trimarans, la stabilité est principalement due à la forme du bateau. Avec des flotteurs latéraux partageant le déplacement, la stabilité initiale est très grande.

Lorsque que seule la coque centrale reprend la flottabilité du voilier, ce dernier est initialement relativement peu stable et il se balance sur ses flotteurs. Dès que l'un de ceux-ci est immergé, la stabilité devient importante.

Sous voiles, le flotteur au vent est généralement en dehors de l'eau et le flotteur sous le vent partage le déplacement avec la coque centrale.

Pour des raisons de structure, il est difficilement pensable de prévoir que la coque centrale puisse «voler». Cela signifie que bien souvent le flotteur sous le vent sera totalement submergé. Pour un trimaran de croisière, la limite sera généralement en dessous, le flotteur ne reprenant que 50% du déplacement total.

Ceci montre les limites potentielles qui peuvent être imposées à des trimarans et donnent également un signal d'alarme qu'il est temps de réduire la voile lorsque le flotteur sous le vent commence à être submergé.

A moins que le trimaran ne soit très large, la valeur de GZ sur un trimaran sera moindre que celle d'un catamaran dans une dimension semblable.

Comme dans le cadre des catamarans, la stabilité de forme n'est pas très importante en ce qui concerne les flotteurs. Ainsi la forme de ces derniers peut être dessinée pour tenir compte d'une résistance moindre et donner une force latérale plus importante.

#### Les emménagements

Dans les petits multicoques, il y a souvent des problèmes de hauteur sous barrot dans la région de la nacelle. Les emména-

gements sont alors compartimentés à l'intérieur des coques. Des catamarans plus importants peuvent par contre bien utiliser la nacelle comme salon, carré, cuisine, coin du navigateur, alors que toilettes, douche seront situés dans les flotteurs.

En ce qui concerne les trimarans, à moins qu'ils soient de grandes dimensions, il n'y a pas de possibilité de prévoir des emménagements dans les flotteurs, si ce n'est pour du stockage. La coque principale devient ainsi un monocoque étroit avec des couchettes de type cercueil, etc.

#### La motorisation

Sur des petits catamaran, on utilisera des moteurs hors-bord mais sur des bateaux de plus grandes dimensions il est parfaitement envisageable d'avoir un, voire deux «Z» ou S-drive. Sur des unités plus importantes, on retrouvera des moteurs à arbre fixe, comme sur beaucoup de monocoques.

#### Les safrans

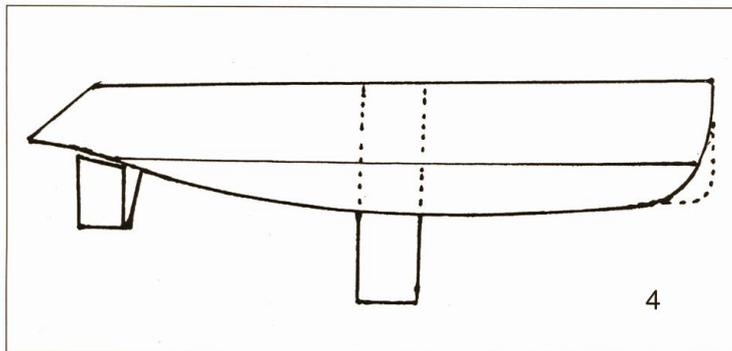
Avec un système de gouvernail double, il est généralement prévu de joindre les deux safrans par une barre permettant d'actionner ensemble les deux gouvernails par le même système. Les safrans sont généralement prévus avec un petit pincement interne de manière à permettre au gouvernail se trouvant à l'intérieur du virage d'avoir un plus grand angle d'incidence.

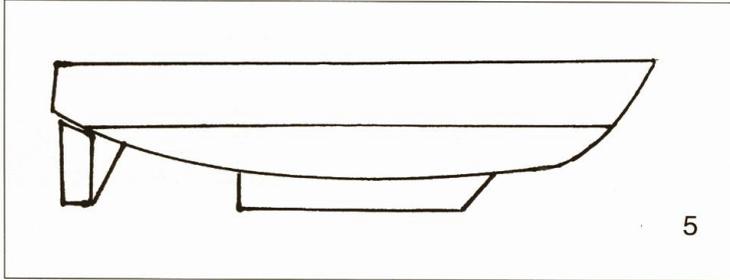
#### La résistance due aux vagues

Comme nous l'avons vu précédemment, les coques de multicoques sont des corps plus élancés que celle d'un bateau conventionnel. Le rapport longueur/largeur est beaucoup plus élevé. De ce fait, même si les carènes de multicoques doivent être considérées comme des coques à déplacement, elles produisent très peu d'effet de vagues. De plus, vu que la stabilité est donnée par l'ensemble, la surface mouillée aura pu être réduite au minimum et le déplacement ne doit pas tenir compte de lest, etc. Tous ces facteurs conduisent à une résistance moindre. On admet que jusqu'à un rapport de vitesse longueur inférieur à 1, la résistance due à la friction est de l'ordre de 40% et celle due aux vagues de 60%.

L'interaction des résistances de vagues entre les coques est un peu plus compliquée, elle sera en général néfaste, excepté pour les trimarans ou la position des flotteurs permet de prévoir des systèmes hors de phase. D'une manière générale, il est mieux d'avoir des coques bien séparées dans la largeur pour éviter la formation de vagues importantes sous la nacelle.

Dans l'ensemble, ces éléments tendent à montrer que le principe d'un catamaran ou d'un trimaran permet de diminuer nettement la résistance par friction ainsi que celle engendrée par le propre système de vague du bateau.





### Synthèse globale

Le choix des formes dépendra donc grandement du but choisi pour le bateau et cela signifie que chaque plan correspond à un type bien précis d'utilisation.

Dans la conception d'un multicoque pour de la course comme une Transatlantique, on utilisera tous les facteurs produisant des avantages de vitesse, soit des longs flotteurs et une longue coque, une grande largeur, un poids faible, ceci au détriment d'autres facteurs comme le coût, le manque de place, la durée de vie, etc.

D'un autre côté, un multicoque de croisière utilisera plutôt les qualités comme nacelle stable avec place pour les emménagements, tirant d'eau faible, etc, ceci au détriment des autres performances. Il y a beaucoup de compromis entre ces deux extrêmes, le destin des multicoques appartient aux spécialistes qui ont une longue expérience dans la navigation avec de tels bateaux. Lorsque les performances augmentent, il y a moins de place pour l'erreur et une beaucoup plus grande importance doit être donnée à la sécurité. Ceci demande une bonne connaissance des problèmes de stabilité et de structure. Les matériaux modernes, s'ils sont utilisés correctement, permettent de construire de magnifiques multicoques.

La faiblesse structurelle se trouve généralement au niveau de la liaison de la coque et des flotteurs ainsi que dans les panneaux très «plans». Le besoin de diminuer les poids entraîne souvent des limites de solidité inacceptables. Les matériaux actuels, le composite, les sandwichs permettent cependant d'offrir des solutions structurelles excellentes. On peut également ajouter des carénages permettant d'éviter par exemple des chocs importants dans la vague.

La gîte et le tangage doivent également être pris en considération dans la construction de tels bateaux. Pour un catamaran bien gîté, à moins que le flotteur sous le vent ait un volume suffisant, il pourra le submerger comme nous l'avons déjà vu. On doit donc prévoir que l'ensemble du déplacement puisse être pris en considération sur une seule coque. Comme on l'a également vu, sur un trimaran le flotteur sous le vent ne doit pas être en me-

sure de supporter l'ensemble du déplacement car à ce moment la coque principale pourrait sortir de l'eau et l'on obtiendrait des efforts démesurés sur les bras de liaison.

### L'évolution des catamarans

Au cours des années, on s'aperçoit que la construction des catamarans est devenue de plus en plus légère. Le succès de ce type de bateau revient à cette caractéristique. Par ailleurs, on remarque que les formes à la flottaison deviennent plus portantes. On s'est aperçu que les arrière effilés du début empêchaient de virer et ne donnaient pas de portance suffisante à l'endroit où se trouve l'équipage.

Avec la construction sur moule, les formes asymétriques, malgré leurs avantages, tendent à disparaître dans les catamarans de série. Par contre, le catamaran devient plus large, la technicité permettant une amélioration de la liaison entre les coques.

D'une manière générale, on constate qu'au maître-bau les formes deviennent pratiquement circulaires, limitant ainsi la surface mouillée, le frein principal par petit temps.

Les étraves deviennent très pincées et les lignes d'eau tendues dans la partie avant. Vers l'arrière, les sections ont tendance à s'aplatir afin d'augmenter la portance et de favoriser ainsi également le planning.

Au niveau de la plate-forme, elle devient de plus en plus surélevée par rapport à la flottaison de manière à éviter les chocs du clapot.

Comme sur les monocoques, on n'échappe pas aux jupes arrière, ce qui permet d'allonger la flottaison pendant la navigation en vitesse et offre un confort supplémentaire comme chacun le sait.

Au niveau du plan de dérive on retrouve principalement deux conceptions.

D'un côté, on a des coques présentant une étrave assez haute, très effilée pour couper le clapot. Les sections sont semi-circulaires et continuent ainsi jusqu'au tableau. L'arrière est parfois un peu aplati. Les coques sont pourvues de dérives; ces

dernières posent parfois des problèmes au niveau des emménagements, vu le volume interne occupé. La grand-voile est lattée; le foc, généralement petit, peut également être latté (croquis 4).

Dans l'autre conception, on constate tout d'abord qu'il n'y a pas de dérive pivotante ou sabre mais que ces dernières sont remplacées par un aileron fixe. Ceci a pour avantage la simplicité et la solidité. On perd ici l'avantage de la dérive qui diminue le tirant d'eau à l'échouage, un aileron fixe nécessitant une plus grande profondeur, souvent le double de celle d'un catamaran-dériveur. La carène en elle-même est également modifiée et on ne retrouve plus une section ronde mais une section elliptique. Ceci est rendu nécessaire car l'aileron est dessiné, comme sur un monocoque, pour jouer son rôle anti-dérive (croquis 5).

Les lignes d'eau sont donc plus creuses et se relèvent nettement vers l'arrière afin de faciliter les virements de bord.

Ces formes sont moins porteuses, les élancements plus importants.

Ce type de bateau offre moins de place à l'intérieur mais les performances des formes de coque sont meilleures et on ne saurait nier un certain look, une certaine élégance.

Cette conception permet l'utilisation d'un safran suspendu, fixé sous la voûte arrière alors que dans l'autre type de catamaran, on est normalement obligé d'admettre un gouvernail au tableau.

Une comparaison des performances entre ces deux solutions permet de dire qu'en général dans du temps faible à moyen, la seconde conception montre souvent un sillage moins important. Ceci est principalement dû au fait que les tableaux sont dégagés de la surface.

En ce qui concerne la remontée au vent, l'avantage irait également au catamaran pourvu d'un aileron fixe par rapport à la dérive, pour autant que la forme de carène soit bien étudiée. Cette conception permet également des virements de bord plus faciles.

Par contre, cette même réalisation se montre plus sensible à la répartition des charges, ce qui peut contribuer à une diminution du confort en navigation. Sur cette conception, on concentrera donc les charges au milieu pour diminuer la tendance à l'enfournement et au tangage. Quoi qu'il en soit, la charge sur les bateaux de ce type va au détriment de sa conception et l'on doit faire extrêmement attention à ne pas dépasser le poids initialement prévu, ce qui est au détriment des performances d'un tel catamaran.

On constate donc que, comme pour un monocoque, le catamaran est un compromis qui nous impose de faire des choix: veut-on aller vite au détriment d'un cer-

tain confort ou sommes-nous prêts à faire quelques sacrifices au niveau de la vitesse pour obtenir les avantages d'une autre philosophie de forme de coque?

Pour la croisière, la tendance actuelle va vers un mélange des deux solutions précitées.

## **Avantages et des inconvénients entre monocoque et multicoque**

- Alors que le monocoque a besoin d'un lest, ce qui peut doubler son déplacement, le multicoque permet un déplacement léger donc un poids de bateau en conséquence.
- Sur un monocoque, la surface mouillée est comparativement beaucoup plus importante que sur un multicoque Cette diminution ainsi que la finesse des coques permettent de réduire la résistance au frottement et d'offrir une traînée moindre.
- Sur un monocoque, la surface de voilure est limitée par la stabilité latérale alors que sur un multicoque plus de voile peut être portée et ainsi la force propulsive est plus grande.
- Un monocoque ne présente qu'un système de vague et il n'y a pas d'interaction entre les vagues produites par les coques alors que sur un multicoque ce système est généralement négatif.
- Sur un monocoque, on peut utiliser les «trous» de la courbe de résistance alors que ces mêmes trous sont pratiquement nuls sur un catamaran avec des coques allongées. Par contre, il est possible de construire des catamarans qui ne produisent plus de vague.
- Sur un monocoque, le lest augmente le tirant d'eau alors que sur un multicoque on a un faible tirant d'eau. Par contre, les superstructures étant plus hautes, on aura un fardage important. Sur un catamaran les vagues peuvent également donner des coups de butoir importants entre les coques. On ne négligera pas non plus les efforts importants en compression, en torsion comme en compression lorsqu'on navigue en haute mer.
- Sur un monocoque la forme est dictée par des questions de stabilité ce qui n'est pas le cas sur un multicoque. On peut, sur ce type de bateau prévoir des coques asymétriques.
- Pour une même longueur de flottaison un monocoque offre plus d'espace intérieur. Ceci compte principalement en ce qui concerne la hauteur sous barrot dans la nacelle.
- L'installation d'un gouvernail double présente parfois des problèmes techniques.
- Alors que sur un monocoque la construction monolithique est relativement fa-

cile à réaliser, pour des coques plus fines de multicoques on aura des problèmes de construction qui ne peuvent être négligés.

- A relever également qu'il n'est pas possible d'utiliser n'importe quels matériaux pour la réalisation d'un catamaran qui se doit d'être léger et on ne négligera pas non plus le problème des liaisons entre les coques.
- Alors que sur un multicoque on peut donner du tulipage pour rendre un bateau relativement sec, sur un monocoque on aura facilement beaucoup d'embruns.
- Sur un multicoque, de part sa conception le gréement permet d'offrir des angles plus adéquats au haubanage.
- Il est possible d'installer des hydrofoils sur certains multicoques.
- L'installation d'un seul moteur sur un monocoque ou de deux moteurs sur un catamaran a ses avantages et ses inconvénients. Les multicoques pourvus de moteurs hors-bord sont d'un emploi difficile dès que l'on est en dehors des eaux abritées.
- Alors qu'un monocoque a des avantages évidents quant à sa stabilité de forme et de poids, le multicoque présente une stabilité latérale beaucoup plus grande. Le GZ est très grand à des petits angles de gîte, il y a donc une très grande stabilité initiale.
- Sur un monocoque la stabilité positive se présente sur une plage importante d'angle de gîte alors que sur un catamaran cette stabilité diminue assez rapidement à la gîte.
- Financièrement parlant, la construction d'un multicoque est certainement d'un coût plus élevé que celle d'un monocoque. De plus un monocoque représentant pratiquement la moitié de la largeur d'un multicoque, il peut être difficile de trouver des places d'amarrage dans des ports bien occupés.
- Pour terminer, un multicoque laisse beaucoup moins de place à l'erreur dans sa conception.

Dans une étude faite il y a une quinzaine d'années déjà, j'arrivais à la conclusion que les avantages du multicoque compensaient largement les désavantages et je concluais également à ce qu'un futur brillant se réservait au multicoque, particulièrement où il est recherché d'allier sur un même bateau une bonne vitesse et une navigation confortable. Le développement actuel de ce type de navire montre que je n'étais pas dans l'erreur et aujourd'hui, je persiste et signe.