



L'étude de la stabilité des navires en général et des yachts en particulier est un des aspects de la conception et de la sécurité qui a longtemps été mal connu et trop souvent négligé car il fait appel à des calculs et des essais longs et fastidieux. De nombreux yachts ont été conçus puis construits sans que la moindre évaluation de leur stabilité n'ait été faite. De nouveaux règlements notamment au niveau européen stipulent que la stabilité des navires de plaisance soit vérifiée par le calcul et/ou par des essais. Les calculs sont devenus moins fastidieux et plus rapides à réaliser depuis l'apparition des ordinateurs de bureau et des logiciels de calculs spécialisés. Néanmoins, la notion de stabilité reste souvent floue et mal comprise même par certains professionnels ou opérateurs expérimentés. Pour de nombreux plaisanciers, un bateau est stable s'il ne s'incline pas sous leur poids lors qu'ils embarquent. Cette stabilité dite initiale, bien qu'importante, n'est pas suffisante pour pouvoir déclarer qu'un bateau est stable ou non.

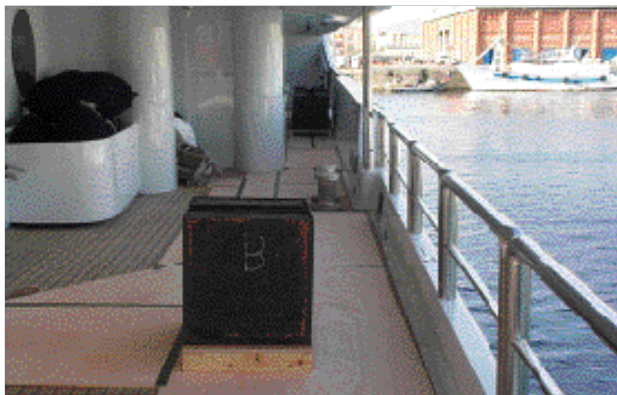
par Eric Ogden

.....► **LA STABILITÉ OU LES STABILITÉS**

D'une manière générale, la stabilité se définit comme la tendance d'un navire à revenir à sa position initiale après avoir été incliné par une force externe. Ce phénomène est largement contrôlé, par la relation entre le centre de carène, dont la position est liée à la géométrie de la coque, et le centre de gravité qui varie suivant la répartition verticale et longitudinale des masses fixes et mobiles du navire. Les principales forces externes qui peuvent provoquer une inclinaison sont: le vent, les vagues, la force centrifuge en virage, le tassement des passagers sur un bord, le déplacement accidentel d'un lest mal arrimé, les effets de carène liquide associés à des réservoirs mal compartimentés ou à l'envahissement d'une partie de la coque.

Il existe cependant plusieurs types de stabilité. La stabilité initiale, évoquée précédemment, est celle qui se manifeste lors d'une soudaine sollicitation comme celle provoquée par le poids d'une ou plusieurs personnes qui embarquent ou se déplacent

brusquement sur un même bord. Cette stabilité varie essentiellement en fonction de la géométrie de la surface de flottaison et de la position du métacentre. Plus simplement un navire large à la flottaison et à fortiori un catamaran aura une stabilité initiale plus grande qu'un monocoque avec une faible largeur à la flottaison. La stabilité initiale aux petits angles si elle permet de se faire une idée de la stabilité d'un yacht est insuffisante pour évaluer la réserve de stabilité. La capacité à réagir sous l'influence des rafales de vent et des vagues, c'est la stabilité dynamique. Sur ce point, la portance que génère les coques planantes a une incidence importante sur la stabilité dynamique de ce type de carène. La stabilité à l'état intact comme son nom l'indique est celle d'une unité dont la coque est intacte. Par opposition, la stabilité après avarie est celle d'un navire avec une ou plusieurs voies d'eau qui provoquent l'envahissement d'un ou plusieurs compartiments. Nous nous limiterons dans le cadre de cet article à la description de la stabilité statique à l'état intact.



Plus de 6 tonnes sont nécessaires pour une expérience de stabilité sur un grand yacht (55 m).



L'inclinaison est précisément mesurée avec un long pendule (fil à plomb).



Seuls des poids certifiés peuvent être utilisés pour des essais officiels.



Les tenders et autres embarcations placés sur un pont supérieur influencent la stabilité d'un yacht.

.....➤ **LES ÉLÉMENTS DE LA STABILITÉ**

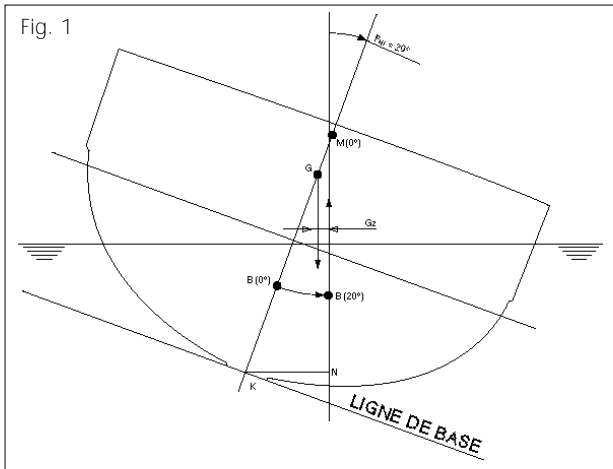
De façon simple, lorsqu'un navire est au mouillage en eau calme et suivant la célèbre loi d'Archimède, le volume d'eau déplacé par la partie immergée de sa coque est égal à son poids et les trois points qui permettent de déterminer sa stabilité sont alignés sur son axe vertical. Le centre de carène CB, où s'applique la poussée hydrostatique, le centre de gravité CG de l'ensemble du navire et enfin le métacentre M. Le métacentre est le point théorique autour duquel la coque se balance tel un pendule pour les petits angles d'inclinaison.

La distance entre le centre de gravité et le métacentre est définie comme le rayon métacentrique initial ou GM. Le système de forces doit rester sous ce point pour que l'ensemble puisse revenir à sa position initiale. Ce paramètre est l'élément fondamental de la stabilité initiale.

Lorsque la coque s'incline, sous l'effet d'une force externe, la forme immergée de la coque change et le centre de carène se déplace vers l'extérieur par rapport à l'axe du navire. Le centre de gravité, sous réserve qu'aucun élément n'ait été déplacé, reste sur l'axe. L'action conjuguée de la poussée d'Archimède qui s'applique vers le haut, au centre de carène, et de la masse du navire qui s'exerce vers le bas, au centre de gravité, crée un couple. Ce couple tend à ramener le navire à sa position de stabilité initiale (voir figure 1). Le bras de levier de redressement ainsi créé, le GZ, varie pour chaque angle d'inclinaison ou de gîte. Le calcul des différents bras de levier permet de tracer la courbe de stabilité ou courbe des GZ (voir figure 2). L'angle auquel la courbe coupe l'axe est l'angle de chavirement statique.

.....➤ **L'ANALOGIE DE LA CHAISE A BASCULE.**

Afin de mieux visualiser ou comprendre la notion de rayon métacentrique et d'équilibre d'un navire on peut le comparer à une simple chaise à bascule (voir figure 3). G est le centre de gravité de l'ensemble: la chaise et la personne qui y est assise. B est le point d'appui ou de contact avec le sol et M est le centre du rayon de courbure des deux patins. M est le métacentre de la chaise ou le point sous lequel G doit rester pour pouvoir basculer tout en revenant à sa position d'origine. Si la personne assise se met debout sur la chaise et s'agrippe au dossier, le centre de gravité G de l'ensemble va se trouver au-dessus du métacentre M et la chaise va



Positions des différents points d'une carène inclinée.

“chavirer”. Il est à noter que la courbe arrière des patins des rocking-chairs est généralement plus plate ou plus exactement avec un rayon de courbure plus important pour faire monter le métacentre et limiter les risques d'accident. Cette analogie permet également d'illustrer l'incidence du rayon métacentrique ou GM sur la période de roulis d'un navire. Une chaise à bascule vide a un centre de gravité plus bas soit un GM plus élevé et donc un roulis plus rapide. Si la personne assise sur la chaise se met progressivement debout le balancement deviendra de plus en plus en lent. Pour les navires, le phénomène est identique un GM élevé produira un roulis sec et rapide.

LES FACTEURS INFLUENÇANT LA STABILITÉ

Comme indiqué précédemment, les principaux facteurs affectant la stabilité d'un navire sont essentiellement la géométrie de sa surface de flottaison et la position verticale de son centre de gravité. L'influence de la largeur à la flottaison est importante puisque la distance BM entre le centre de carène B et le métacentre M varie en fonction du cube de cette largeur. Il est donc primordial de déterminer cette largeur non seulement en fonction de la résistance à l'avancement mais également de la stabilité recherchée. Pour la position verticale du centre de gravité, le concepteur devra chercher à “alléger les hauts” en optimisant les superstructures tant en hauteur qu'en poids de structure. De nombreux yachts à moteur à la coque en acier sont équipés de superstructures en alliage d'aluminium dans ce but. Depuis leur lancement, des dizaines de yachts ont été alourdis dans les hauts par des modifications de

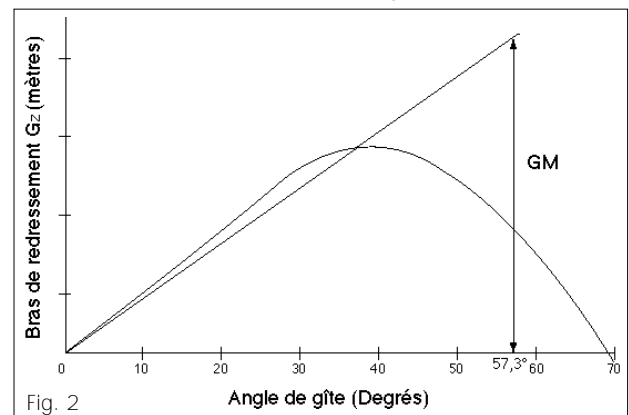
superstructures, l'installation de grues, de tenders ou de systèmes de communication avec plusieurs antennes. Ces travaux ont été réalisés au fil des propriétaires, des capitaines et des refits sans qu'aucune vérification de stabilité n'ait été faite. Les expériences de stabilité faites à la demande des organismes officiels à bord de yachts qui changent de pavillon et/ou de statut révèlent souvent de graves insuffisances en matière de stabilité.

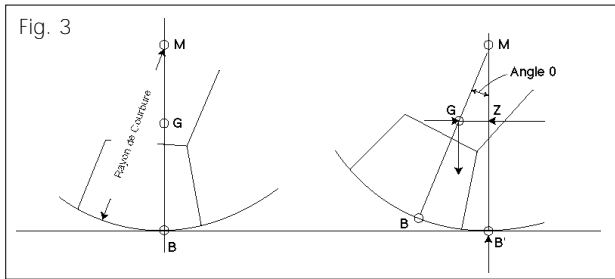
Sur les grands yachts, les conditions de chargement ont également une influence importante sur la stabilité. A titre d'exemple, le centre de gravité d'un yacht à déplacement de plus de 40 m, avec une capacité en combustible supérieure à 100 tonnes pour un déplacement léger d'environ 300 tonnes, monte de près d'un mètre entre le départ avec les caisses pleines et l'arrivée au port après une longue navigation et seulement 10% de combustible restant. C'est pourquoi, il arrive qu'un capitaine conseille à son successeur de ne jamais naviguer avec moins d'une certaine quantité de combustible, indiquant ainsi un problème de stabilité à partir d'un certain cas de chargement.

CALCULS ET EXPÉRIENCE DE STABILITÉ

L'apparition des ordinateurs de bureau a permis le développement de programmes de calculs de stabilité accessibles à tous les architectes navals et bureaux d'études. Ces logiciels permettent à partir des plans de forme d'un yacht de calculer non seulement les éléments hydrostatiques pour une carène droite mais également les bras de levier de redressement suivant les angles d'inclinaison et les cas de chargement. Néanmoins ces outils informatiques ne permettent pas au concepteur de se dispenser de

Courbe type des bras de levier de redressement d'un yacht.





Le balancement d'un rocking chair permet d'illustrer la stabilité d'un yacht.

l'élément fondamental de la détermination du déplacement et du centre de gravité prévisionnels : le devis de poids. En effet, l'architecte doit connaître aussi précisément que possible le détail des masses et des centres de gravité de chacun des éléments de la structure et des systèmes afin de pouvoir calculer les centres de gravité vertical et longitudinal du navire pour les différents cas de chargement. Ce travail reste fastidieux, il demande de la rigueur et de la méthode. Il est cependant trop souvent négligé par de nombreux concepteurs ou chantiers qui découvrent à la mise à l'eau que le beau yacht ne flotte pas dans ses lignes ou ne peut être homologué et/ou certifié par manque de stabilité.

Les calculs théoriques doivent impérativement être validés après la mise à l'eau par une expérience de stabilité afin de connaître précisément le déplacement et la position du centre de gravité. Pour ces essais, on déplace des poids d'un bord à l'autre du navire afin de créer des couples inclinants connus. Pour chaque mouvement, on mesure précisément les angles d'inclinaison à l'aide de fils à plomb ou d'inclinomètres. Ces angles sont généralement faibles, 1° à 3° pour calculer la pente de la courbe de stabilité et le rayon métacentrique initial qui permettront de déterminer précisément le centre de gravité et le déplacement en condition légère. Ces éléments servent au calcul des courbes de stabilité et des courbes pantocarènes. Ces dernières permettent ensuite au capitaine de tracer rapidement les courbes des bras de levier de redressement pour tout déplacement et de les comparer aux critères de stabilité.

.....➔ LES CRITÈRES DE STABILITÉ

Ces critères sont simplement des valeurs minimales admissibles pour divers éléments d'une courbe de stabilité : rayon métacentrique initial, angles et bras de levier, surfaces sous la courbe (voir figure 5). Ces critères, bien que basés sur la stabilité statique,

prennent également en compte des valeurs qui permettent d'évaluer la stabilité dynamique dans des conditions de navigation où le vent et la mer peuvent affecter de façon significative la sécurité d'un yacht. Les critères de stabilité pour les yachts sont relativement récents. En effet, plusieurs nouveaux règlements, comme la Directive Européenne 94/25 CE pour les navires de plaisance de moins de 24 m et The Codes of Practice For The Safety of Small and Large Commercial Sailing and Motor Vessels pour les yachts de charter battant pavillon britannique imposent désormais des critères de stabilité. Les critères de la Directive Européenne sont ceux définis par la norme ISO 12217 qui est en cours de finalisation. Quant aux règlements britanniques, ils imposent pour les yachts de plus de 15 m d'avoir à bord un dossier de stabilité dont les critères sont ceux de la résolution internationale IMO A 167 (voir figure suivante).

