

# Stix, le bateau marin

STIX, l'indice de stabilité du bateau marin

L'appréciation des capacités marines d'un bateau est un sujet assez controversé, dont le traitement analytique est encore (forcément?) assez embryonnaire.

On parle souvent de stabilité: un bateau stable (quoi que ce mot signifie) est intuitivement considéré plus marin qu'un bateau qui n'est pas stable du tout. Si un voilier n'est pas capable de rester ou retourner droit, il ne sert pas à grand chose.

Pour essayer de quantifier un peu mieux cette idée de stabilité, et pour prendre aussi en considération d'autres facteurs qui contribuent au comportement marin d'un voilier, un index de stabilité appelé Stix a été développé.

Il est fort probable qu'une fois introduit, cet index sera à la base de l'attribution d'une catégorie de navigation à un voilier donné.

Ces Stix ont été retenus selon les catégories: A->32; B->23; C->14; D->5.

La formulation de l'index prend en considération plusieurs facteurs qui contribuent au comportement marin d'un bateau.

Voilà une idée de la logique derrière chacun d'eux.

Le plus important est la longueur du bateau.

Un état de la mer déterminé sera relativement plus petit pour un bateau plus long, les effets des vagues seront plus importants sur un bateau plus petit.

Ensuite, comme la stabilité augmente avec la puissance quatre de la longueur, un bateau plus long sera relativement beaucoup plus stable qu'un bateau plus court (voilà entre autre pourquoi les bateaux plus longs sont relativement moins larges que les plus petits).

Après, il y a toute une série de facteurs multiplicatifs, dont la valeur varie entre 0.4 et 1.5.

Ce sont toutes des formulations \*assez\* adimensionnelles, qui privilégient un comportement moyen et pénalisent les extrêmes.

Rapport déplacement/longueur: la règle considère que un bateau excessivement léger est plus difficilement contrôlé, donc moins marin, et qu'un bateau excessivement lourd offre beaucoup de résistance aux éléments, donc moins marin.

Rapport déplacement/largeur: on considère que une grande largeur avec un déplacement léger augmente le risque de chavirage (cft rapport Fastnet) et rend le bateau plus stable une fois retourne; un facteur trop petit (ex bateau très étroit et lourd) est également pénalisant car on considère que la stabilité de forme est insuffisante.

Retournement: un facteur mesure la capacité autonome du bateau de se redresser d'une position de chavirage à 180 degrés

Redressement: un facteur mesure la capacité du bateau de se redresser d'une position couchée le mat dans l'eau, les voiles pleines d'eau.

Stabilité dynamique: ce facteur dépend du travail nécessaire au vent et vagues pour faire giter le bateau jusqu'à l'angle de retournement (intégral de la partie positive de la courbe de stabilité); la présence d'ouvertures dans la coque qui permettraient de laisser rentrer de l'eau à l'intérieur est également considérée comme pénalisante.

Le risque de remplissage d'eau est considéré par un autre facteur qui mesure la possibilité de l'eau de rentrer à cause d'une action du vent causant une gite au maxi de 90 degrés

Ce qui est significatif est que tous les facteurs rentrent dans un calcul de moyenne, donc leur importance individuelle est réduite au profit d'une appréciation générale, moyenne des caractéristiques du bateau. Finalement c'est bien sur le comité d'étude, par le choix des formules de chaque facteur, qui a déjà donné son appréciation de l'importance relative de chaque facteur.

Au résultat de cette multiplication, on rajoute le chiffre 5 (égale pour toutes longueurs) si le bateau complètement inondé a encore une réserve de flottabilité et stabilité positive à 90 degrés de gite.

La prime à l'insubmersible.

voili voilà...

## Notions utiles

En limitant ses ambitions à comprendre et améliorer éventuellement un plan ou une carène existante, les logiciels de calculs accompagnés des « règles de l'art » simples sont bien adaptés. (Les professionnels appellent « règles de l'art » ce que vous et moi appelons « pifomètre », ce qu'on n'est pas obligé de démontrer, car c'est « comme ça »)

Vous avez un problème dans ce genre:

- Votre bateau ne vous satisfait pas totalement, soit par son comportement marin, soit par son tirant d'eau excessif, etc., et vous envisagez par exemple de réimplanter le mat ou de refaire le lest ou la dérive.
- Vous n'avez aucun plan de votre coque ancienne, et vous aimeriez bien connaître ses paramètres, de stabilité par exemple.
- Vous avez le plan de l'architecte, mais vous vous demandez ce qui va se passer avec un chargement et un équipement "grand voyage" plus lourd

Il faut pour ce genre de travail maîtriser seulement la statique, la partie la plus simple et la plus rigoureuse de la conception (sans rentrer dans l'étude de la carène, des résistances et du plan de voilure). Pour suivre ces explications, je vous invite à faire tourner la partie "hydro" de "prodemo" ou son concurrent, pour voir des courbes de stabilité, et le vocabulaire anglo-saxon associé.

Toutes ces notions de vulgarisation sont disponibles périodiquement dans des articles de "loisirs nautiques" ou de "V et V", et bien sûr dans de bons bouquins.

### La courbe de stabilité et les comportements de base

La courbe de stabilité transversale, dont on parle beaucoup à juste titre dans les nouveaux règlements d'homologation, est le résultat final de la combinaison de presque tous les paramètres statiques du bateau: Elle indique la "résistance" du bateau à une gîte variable (moment redresseur en fonction de l'angle), elle donne directement son aptitude à résister à la pression latérale du vent (raideur), à quel angle de gîte le chavirage est probable, et s'il se redressera si l'équilibre a été dépassé.

En abscisse, elle va de  $0^\circ$  (bateau au repos, mat vertical) à  $180^\circ$  (bateau retourné quille en l'air) en passant par  $90^\circ$  (bateau chaviré, mat horizontal.). Tout passage à zéro est un équilibre, stable si la pente est positive, instable si elle est négative. L'ordonnée verticale peut être donnée en « righting arm » ou bras de levier, ou en moment redresseur. Il existe aussi une courbe similaire « longitudinale » intéressante pour connaître l'assiette selon l'équipement et des courbes de « couplage » entre les paramètres, qui sont plus subtiles à exploiter (l'influence roulis-tangage, les comportements loffeurs, etc.)

Les exemples usuels sur les comportements extrêmes en stabilité toujours cités:

- Le "tonneau lesté" peu raide mais auto-redresseur après un chavirage d'angle quelconque : La courbe a son maximum à  $90^\circ$  et repasse à zéro à  $180^\circ$ .
- Le "catamaran de course" très raide mais chavirant brutalement dès le franchissement d'un petit angle ( $10^\circ$  à  $20^\circ$ ) et totalement inapte à se redresser seul : la courbe a son maximum vers  $10^\circ$  à  $20^\circ$  et passe à zéro vers  $90^\circ$

Nos bateaux sont toujours un peu à mi chemin des deux extrêmes, avec un maximum vers 40° à 60° et un passage à zéro vers 100° à 140°. L'équilibre inversé à 180° est hélas toujours très stable. Une courbe de stabilité doit être positive jusqu'au delà de 90° pour ne pas avoir trop peur. Mieux que 130°, c'est rare.

Certains bateaux anormaux ont des courbes à trois équilibres stables (voir les anecdotes ...) par exemple les trimarans de course se penchent toujours sur un flotteur au mouillage (c'est voulu, bien sûr !), et les catamarans à flotteur en tête de mat sont stables à plat, à l'envers, et chavirés !

Pour améliorer la raideur initiale (rapprocher le maximum de la verticale), il faut surtout élargir le bateau et aplatir la carène (jusqu'au multicoque), et pour éloigner le point de non redressement, il faut surtout descendre son centre de gravité (rôle du lest).

Pour une carène donnée, un exercice simple est de prévoir l'évolution de la stabilité en fonction du lest, et du chargement:

### **La masse et le centre de gravité**

Tous ces logiciels demandent en entrée le poids (ou déplacement) et la position du centre de gravité (CG).

On les obtient séparément par un bilan de masse rigoureux, et la ligne de flottaison, l'enfoncement, le tirant d'eau réel, etc. s'en déduisent.

La densité de l'eau est nécessaire pour avoir les résultats (5% d'écart entre rivière et mer, sans entrer dans les cas extrêmes de la mer morte!)

Le but du bilan de masse est de comparer les diverses configurations au déplacement théorique, pour connaître:

- L'enfoncement donc le tirant d'eau réel selon l'équipement.
- L'armement et les réserves raisonnables à emporter selon le programme de croisière.

C'est un problème difficile car il change tout le temps, à chaque croisière ou à chaque réaménagement. Les masses sont à localiser dans les 3 axes si on veut en plus calculer le centre de gravité, indispensable pour la courbe de stabilité et l'assiette longitudinale.

Il est utile de séparer :

1 : la masse minimale en état « désarmé démâté » et le CG associé, en général proche du niveau des planchers:

- Coque lest et aménagements fixes
- Mécanique et équipement fixe : moteur, capote, portiques,

On peut diminuer le tirant d'eau de 5 à 10cm par rapport au nominal, dans cette configuration « nue », par exemple pour passer un canal.

2 : Les postes à ajouter pour toute croisière en mer, quel que soit le programme et le nombre D'équipiers, qui donnent l'état « prêt à naviguer », avec le CG résultant qui remonte pas mal, (typiquement vers la ligne de flottaison) surtout sous l'effet du gréement: c'est la configuration « légère »

- Gréement, voiles et accastillage associé fixe
- Armement intérieur : cuisine, nav, sécurité
- Armement extérieur : annexe, radeau, mouillages, etc.

3: La dernière partie très variable selon le programme de navigation, c'est la cargaison proprement dite, et le CG final remonte encore : c'est la configuration « de route » qui vous intéresse, souvent bien différente des chiffres « en charge » prévus par l'architecte :

- Approvisionnement et réserves : pas de limites sauf celles de l'enfoncement et de la stabilité
- Passagers et bagages : typique 100kg par équipiers

Pour peser un bateau avec précision (à mieux que 5%), il faut faire passer le camion qui l'amène à la mise à l'eau sur une bascule (dans la plupart des centres routiers, des champs de foire, etc.). La pesée par les sangles de grue est beaucoup plus approximative et ne sert normalement qu'à assurer la sécurité au grutage (à 10 ou 20% près).

### **Le centre de gravité et comment l'améliorer**

La formule du CG est celle du barycentre (voir cours de 2eme de vos enfants si vous avez oublié). Pour la course, un CG près de la flottaison, c'est le rêve. En grande croisière, s'il remonte plutôt vers le milieu du franc bord, il faut sacrifier quelque chose (un équipier ou un enrouleur !).

Il faut se souvenir que 100kg de grément à 10m de haut, annule l'effet de 1T de plomb à 1m en dessous dans le lest, et qu'un radar de 20kg à 5m du pont, annule l'effet de 200kg de mouillages dans les fonds.

Le bateau s'équilibrera pour que le centre de carène CC soit à la verticale du CG : certains Équipements nécessitent un calcul avant de créer un angle irréversible !

Méfiez vous des portiques arrière du genre « trop fort n'a jamais manqué », des réservoirs de 200l sur un bord, des 100m de chaîne dans le puits avant, et des gros enrouleurs multiples avec toutes voiles à poste.

Outre les défauts d'assiette, une mauvaise répartition des masses dégrade l'inertie et le comportement, mais les calculs de moment d'inertie sont à faire séparément.

La règle simple et évidente : les masses au plus juste, au plus bas et près du centre.

### **Anecdotes :**

Le propriétaire d'un joli (mais petit) catamaran habitable décide de mettre des moteurs fixes en place des hors-bords : Il demande à un chantier de faire des coquerons allongés, un réservoir, une barre à roue, et fait monter deux diesels de 12cv sail-drive. Sur le parking, le résultat final est superbe, le chantier était très compétent en stratif et mécanique, il y a même une belle plateforme de bain en teck. (Facture : au moins 200kf)

Le lendemain dans le port, les deux coquerons sont dans l'eau, teck compris, et les prises d'air des diesels à 20cm de la flottaison ! Je ne connais pas la suite (rajouter 200kg de chaîne de 10 dans les puits avant ?)

Un skipper célèbre a fait monter des enrouleurs de mât et de focs multiples pour un « La Baule-Dakar » sans rien recalculer. Il a aussi ajouté de l'insubmersibilité dans le mat par sécurité : Après un chavirage, le bateau est resté à l'horizontale définitivement...

Un cuirassé (italien ?) flambant neuf vers 1890 avait des renflements latéraux de carène pour dévier les obus (courant à cette époque) et les plus belles (et lourdes) pièces d'artillerie possibles. Aux essais, les officiers et équipages se plaignaient d'un comportement en mer rouleur à l'extrême dès force 3. Sa courbe de stabilité (sans doute inconnue des arsenaux à l'époque) était quasi plate autour de zéro, avec même un équilibre secondaire vers 20° !

Pendant une manœuvre, le recul lors d'une salve simultanée de toutes les pièces sur un bord, l'entraîna dans un coup de gîte au delà de 20° : il resta gité définitivement !!



# ELEMENTS DE STABILITE DU YACHT



Deuxième année  
Navigateur de Yacht

## Introduction :

Ce cours n'est pas destiné à enseigner tous les éléments qui permettent la prévision de la stabilité lors de la conception du yacht, ni son calcul détaillé qui nécessite d'avoir les plans et des calculs simples mais longs.

Le but est de faire comprendre les principes de base, et surtout les effets de la stabilité et des modifications qui y sont apportées sur le comportement du yacht.

## 1. STABILITE STATIQUE

### 1.1. Equilibre :

Le yacht flotte en équilibre entre deux forces:

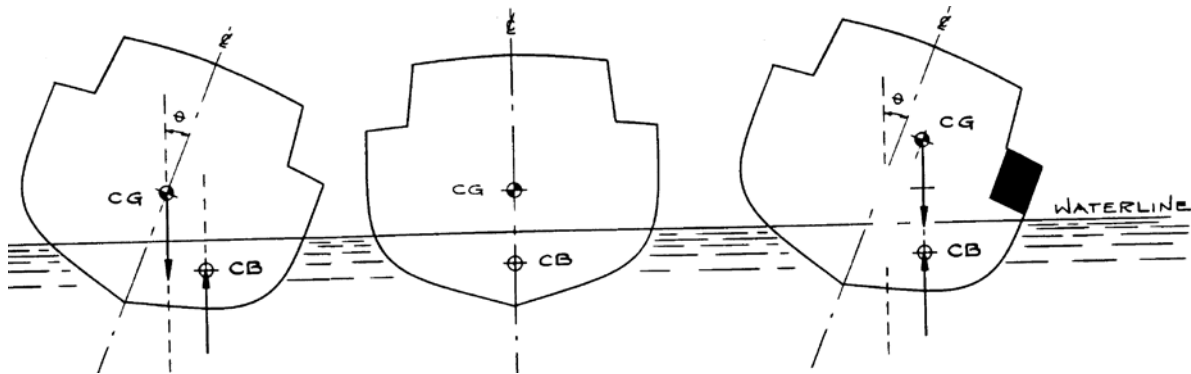
- Son poids  $W$ , appliqué au centre de gravité CoG
- Sa flottabilité  $\Delta = (V \cdot \rho)$ , appliquée au centre de carène CoB

Équilibre, donc:

$$\Delta = W$$

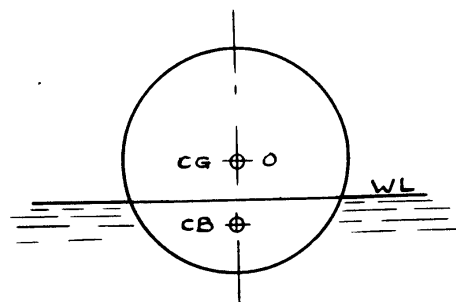
Pour que le bateau flotte en équilibre, CoG et CoB se trouvent sur une même verticale.

Si on trouble cet équilibre, il se crée un couple qui tend à le rétablir. Si on modifie les données, il se crée un nouvel équilibre.



### 1.2. Eléments de la stabilité statique :

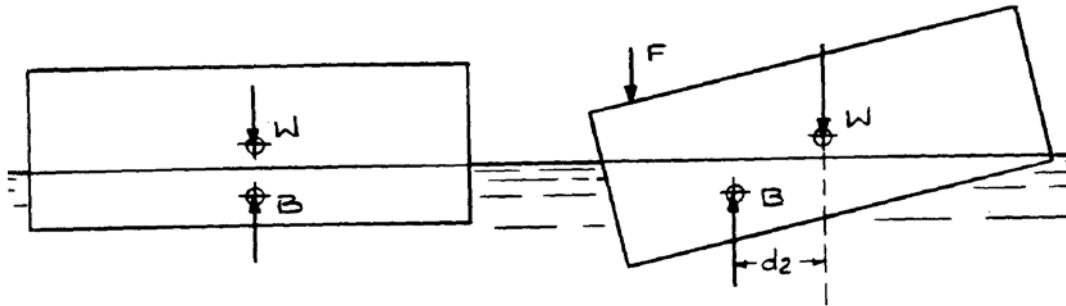
Considérons un cylindre homogène. Il n'a aucune stabilité transversale en ce sens que si on lui imprime un mouvement de rotation, il va continuer à tourner dans le même sens jusqu'à ce que le frottement de l'eau arrête la rotation.



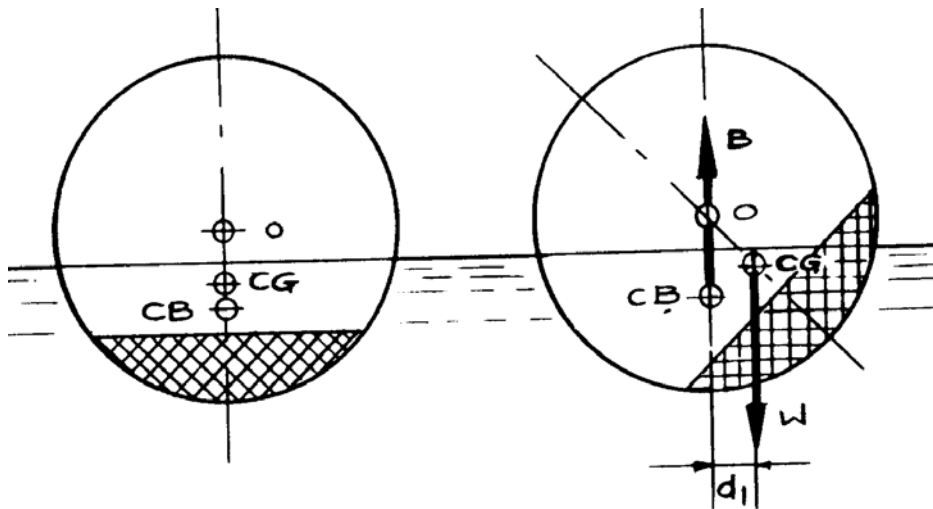


On crée une stabilité en jouant sur deux éléments

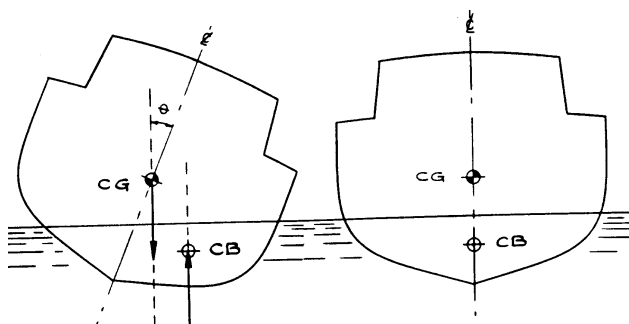
**Forme :** Le volume reste homogène mais on en change la forme.



**Poids :** On maintient la forme mais on déplace CG vers le bas.

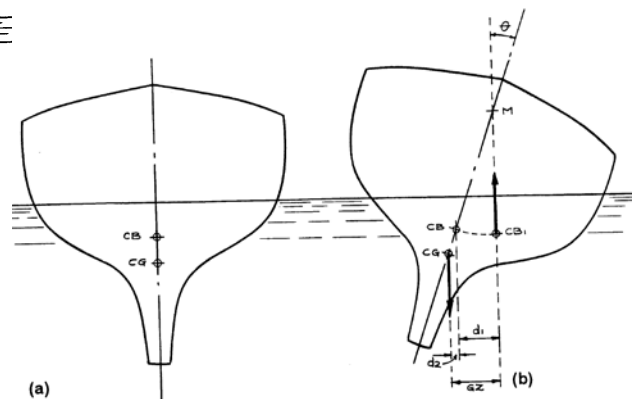


Dans la réalité, on a une composition des deux types de stabilité.



Aux faibles angles de gîte, CB se déplace sur un arc de cercle dont le centre est le Métacentre M.

On le trouve à l'intersection de la verticale passant par  $CB_1$  et du plan de symétrie du navire.



Le rayon métacentrique, BM, détermine le déplacement de CB à la gîte.

Toutefois, c'est la hauteur métacentrique GM qui détermine la grandeur du bras redressant

Le bras redressant GZ est la distance séparant les verticales passant respectivement par CG et M

Le moment redressant est le couple qui agit pour ramener le bateau dans sa position d'équilibre. On peut quantifier ce couple comme le produit du poids du navire par GZ

Aux faibles angles de gîte ( $\Theta < 10^\circ$ ) on admet que

$$GZ = GM \sin \Theta$$

GM est déterminé par calcul par l'architecte en fonction des positions de CG, CB et du rayon métacentrique. Ce dernier est fonction des onglets de crène immergés et émergés à la gîte

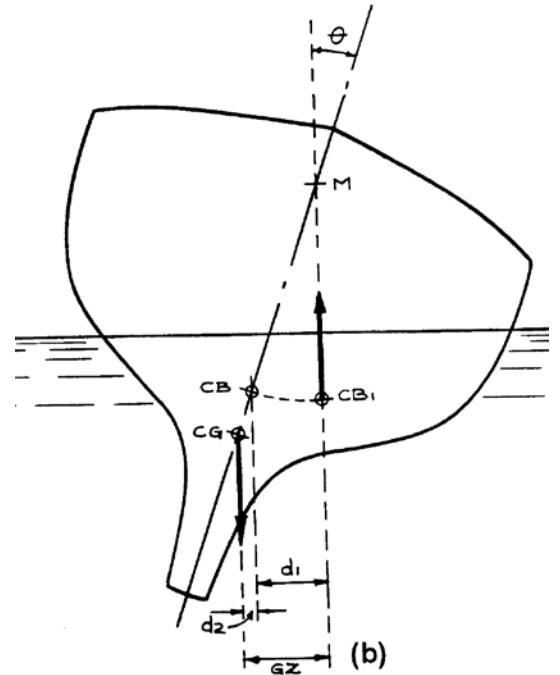
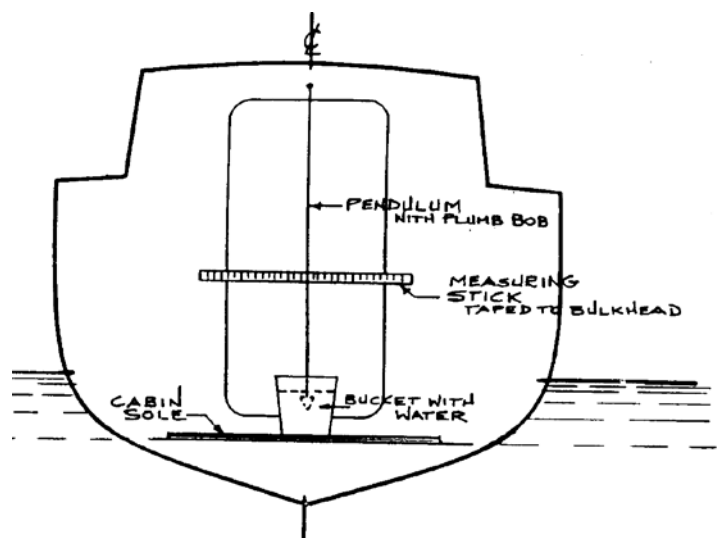
$$BM = (I_{wp}/Vol)$$

( $I_{wd}$  est le moment d'inertie second de la flottaison autour de l'axe du navire.)

### 1.3. Epreuve de stabilité :

Une méthode simple pour retrouver le GM de votre bateau est l'épreuve de stabilité: on installe un pendule amorti dans le bateau et on va observer le mouvement du pendule lors du déplacement d'un poids connu.

Le test se fera en eaux calmes et on prendra soin de laisser du mou dans les amarres afin de n'exercer aucune contrainte sur le bateau.



Le centre de gravité du bateau se déplace en fonction du poids déplacé

$$GG_1 = w.d/W$$

D'autre part, les triangles formés par G-G1 et M, d'autre part par le pendule et la règle graduée sont identiques. Les rapports sont donc conservés.

$$GM/GG_1 = L/D$$

En combinant ces formules, on trouve :

$$GM = w.d.L/W.D$$

Où w et d sont le poids et la distance sur laquelle il a été déplacé, et W est le déplacement du navire (pesé à la grue ou déduit du plan de lignes)

$$GM = \frac{\text{poids} \times \text{distance} \times \text{longueur du pendule}}{\text{déplacement} \times \text{déflexion du pendule}}$$

Les architectes modernes utilisent des niveaux électroniques et appliquent des formules trigonométriques en fonction de l'angle trouvé

#### 1.4. Carènes liquides :

Les liquides contenus dans des citernes, de même que les poids suspendus, se déplacent en fonction de la gîte. Leur présence constitue donc une perte de stabilité.

Nous n'entreront pas dans les détails du calcul, qui est comme celui de la stabilité initiale un calcul de moment d'inertie de la surface du liquide autour de l'axe longitudinal. Ces pertes sont généralement négligeables sur un bateau de plaisance.

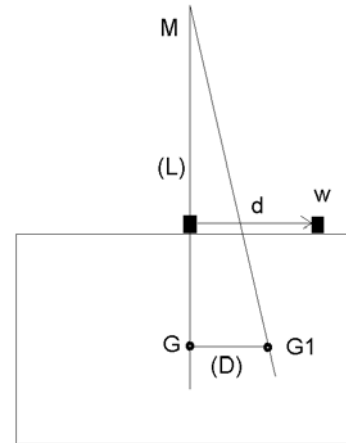
Le seul cas où cette perte devient grave est le cas de remplissage du bateau. La surface du liquide devient alors proche de celle du plan de la flottaison, ce qui revient à dire que la perte devient proche de la stabilité elle-même.

Un voilier qui embarque voit le risque de chavirement augmenter avec chaque paquet de mer, de même qu'un voilier qui a chaviré une fois et a commencé à se remplir verra ses chances de chavirement augmenter avec l'entrée d'eau.

#### 1.5. Ajouts de poids.

Pour calculer la perte de GM due à un ajout de poids, il faut diviser le nouveau moment créé par le déplacement du bateau, et soustraire le résultat du GM.

$$GM' = GM - w.h / \Delta$$



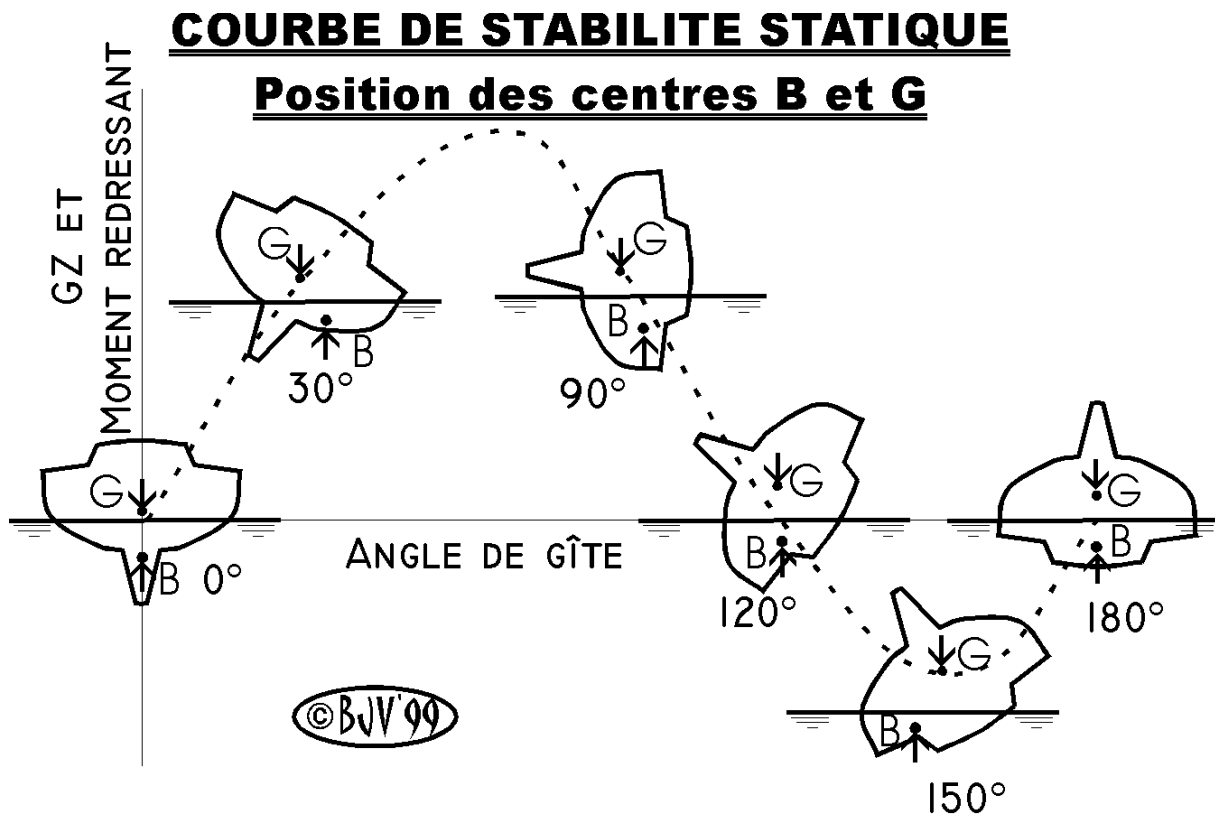
## 2. COURBE DE STABILITE STATIQUE :

Au delà de  $10^\circ$  de gîte, la coque n'a plus une forme homogène des deux bords à la gîte. Le bateau va non seulement s'incliner, mais aussi monter ou descendre et prendre de l'assiette.

L'architecte doit effectuer des mesures sur plan et des calculs pour déterminer la position de CB et de M pour chaque angle, en effet, M va se déplacer le long du plan médian du navire.

### 2.1. On va établir une courbe de GZ

Pour un déplacement donné, l'architecte a calculé pour une série de gîtes de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  la position de B et le bras redressant. Sur la figure, on voit que plus le bateau s'incline, plus B s'écarte de la verticale de G. Notez que la tangente à la courbe au point d'origine est une représentation de la stabilité initiale du bateau : plus la pente est raide, plus le bateau est stable en position droite, ce qui n'est pas forcément une qualité.



L'écart est maximum aux environs de  $70^\circ$ , c'est l'angle de stabilité maximale. Il faut noter que si la force qui incline le bateau est plus grande que le moment redressant à ce point, le bateau chavirera immédiatement. Bien souvent toutefois, cette force est le vent dans les voiles et diminue au fur et à mesure que le bateau se couche.

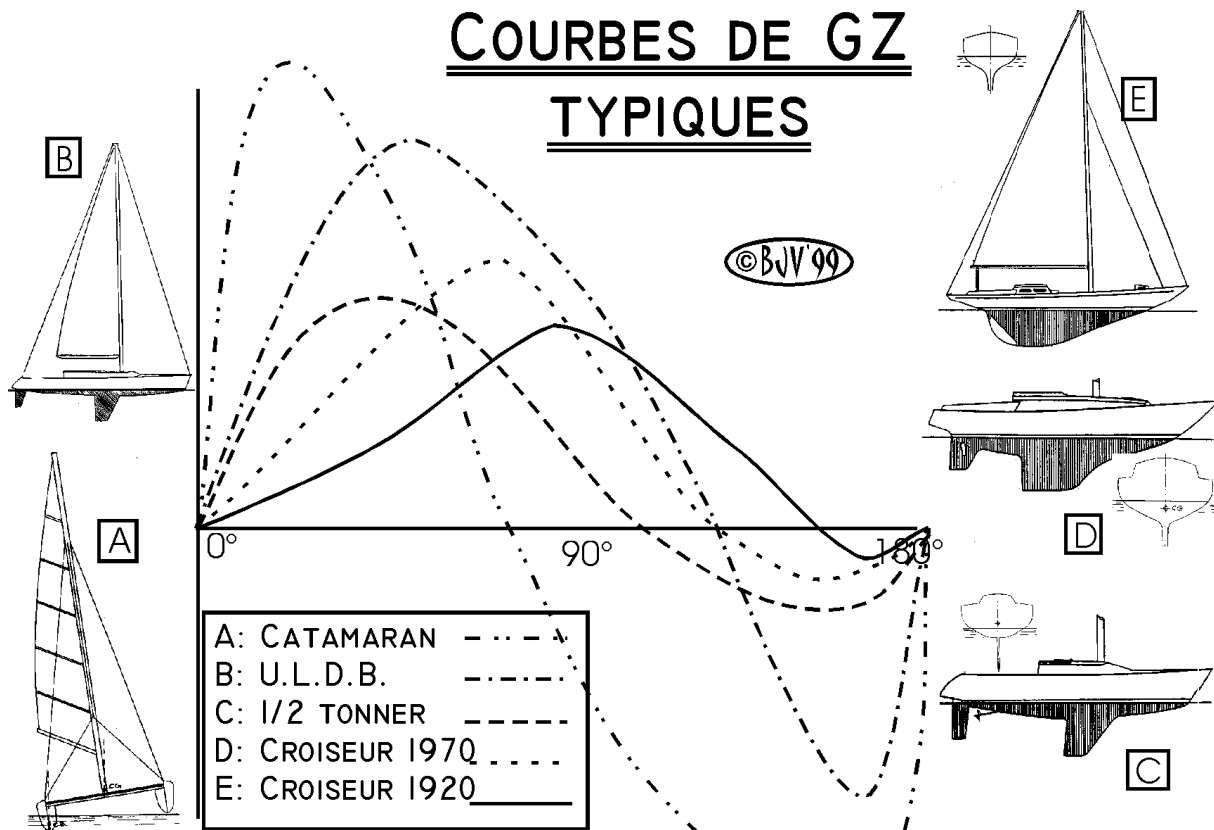
Plus on incline le bateau au-delà de  $70^\circ$ , plus la distance GZ diminue jusqu'à un point où B est de nouveau exactement aligné avec G à  $120^\circ$  dans ce cas (angle de stabilité indifférente = point de chavirement). Le bateau est en équilibre instable. Le moindre mouvement peut soit amorcer un redressement, soit causer un chavirage complet. En effet, à  $121^\circ$ , B est passé de l'autre côté de G et le moment entre les deux contribue maintenant au chavirement (voir  $150^\circ$ ). A  $180^\circ$ , le bateau est stable à l'envers.

### 2.2. Interprétation de la courbe :

Sans entrer dans les détails théoriques, quels sont les points à considérer ?

- Le point de chavirement doit être le plus loin possible.
- Le bras redressant à l'angle de stabilité maximale doit être le plus grand possible.
- La surface sous la courbe doit être la plus grande possible en stabilité positive et la plus petite possible en stabilité négative. Il est peut être utile de développer ce point : La surface sous la courbe est l'intégrale du moment redressant, c'est le travail nécessaire pour incliner le navire jusqu'au point de chavirement. Autant ce travail doit être grand pour le bateau droit, autant il est utile qu'il soit le plus petit possible pour le bateau chaviré. Il faudra en effet trouver une vague assez forte pour fournir ce travail et ainsi redresser le bateau.

### 2.3. Courbes typiques :



- a. Catamaran : Dès que la coque au vent quitte l'eau, le centre de carène est dans la coque sous le vent et bouge relativement peu, le moment est alors déjà au maximum. Plus le bateau se lève, plus le moment diminue, et il devient négatif avant que le pont soit vertical à cause du poids du mât. L'angle de chavirement est donc inférieur à  $90^\circ$
- b. ULDB : Ces bateaux très larges et de carène peu profonde ont une grande stabilité initiale de forme. Leur point de stabilité maximale est toutefois souvent assez bas et ils ne doivent un point de chavirement acceptable qu'au poids de leur bulbe et à la longueur de leur quille. Malheureusement, une fois chavirés, leur grande largeur les rend assez stables également. On voit que la courbe descend beaucoup plus bas que celle des trois autres quillards.
- c. Half tonner. Beaucoup de voiliers de course des années 1960 à 1980 ont été dessinés en fonction d'une jauge qui favorisait des formes extrêmes. Les architectes ont créé des bateaux qui manquent de certaines qualités. Dans l'exemple présent, on voit une bonne stabilité initiale et un bon bras de stabilité maximum, mais celui-ci est à un faible angle de gîte (environ  $40^\circ$ ). On voit un point de chavirement inférieur à  $120^\circ$  et une assez grande aire de stabilité inversée.
- d. Croiseur 1970. On voit que ce bateau a tous les avantages sur le half tonner, à l'exception de sa stabilité initiale. Il gîtera donc plus vite sous l'influence d'un vent relativement faible, mais il faudra un vent beaucoup plus fort pour le coucher, une vague beaucoup plus forte pour le chavirer et une autre beaucoup plus faible pour le redresser. Bien sûr, tout cela se fait au prix d'une vitesse de coque plus faible, accompagnée d'un déplacement et d'une inertie plus grande à taille égale. La meilleure jauge pour la sécurité en mer est celle qui favorise ce type de construction, mais cela freine la recherche technologique et l'innovation.
- e. Croiseur 1920. On voit ici le même raisonnement poussé à l'extrême. Très faible stabilité initiale donnant des bateaux extrêmement gîtards que le vent n'a aucune peine à amener presque mât dans l'eau. À ce point toutefois, ce bateau est à son couple maximum et il faudra encore fournir un travail considérable pour le retourner. Une fois retourné, le moindre clapot suffit à le redresser tant il est instable. Cela est dû à des caractéristiques généralement indésirables pour un croiseur moderne : faible largeur, faible franc-bord, quille très profonde et rapport de ballast proche de 50%.

De plus en plus de constructeurs fournissent les courbes de stabilité de leurs bateaux, et les revues nautiques les publient souvent. Un bon exercice consiste à comparer ces courbes et voir comment le rapport de ballast ou la présence d'un salon de pont affecte la stabilité du yacht dans toutes les positions.

Et surtout, il ne faut pas oublier que toutes ces théories ne sont valables que si votre bateau ne se remplit pas une fois retourné, d'où l'intérêt de rester inversé le moins longtemps possible.

2.4. Exemples :

La problématique du catamaran a déjà été soulevée. Il est intéressant de noter certains détails, comme le moment où la quille sort de l'eau combiné à l'immersion du roof qui donne un regain de pente à la courbe juste avant le sommet sur ce croiseur moderne.

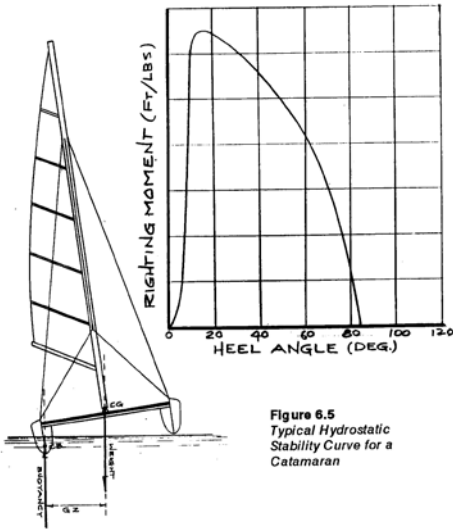


Figure 6.5  
Typical Hydrostatic  
Stability Curve for a  
Catamaran

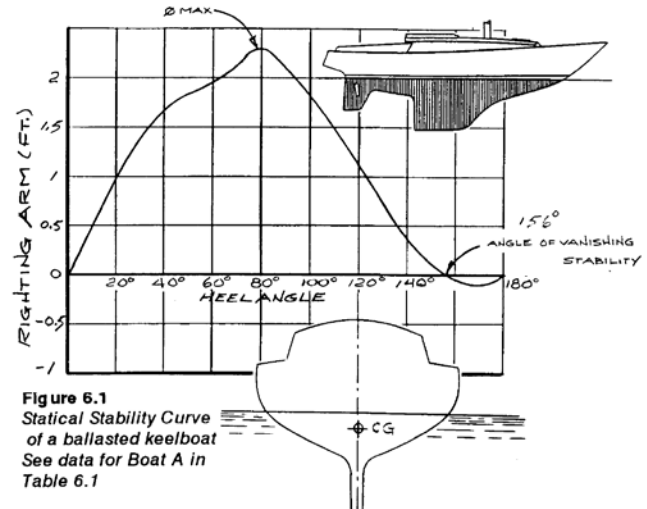


Figure 6.1  
Statical Stability Curve  
of a ballasted keelboat  
See data for Boat A in  
Table 6.1

Une autre courbe, celle d'un canot automobile montre où la courbe s'arrête brutalement à l'immersion du liston. Le bateau se remplit à partir de ce moment.

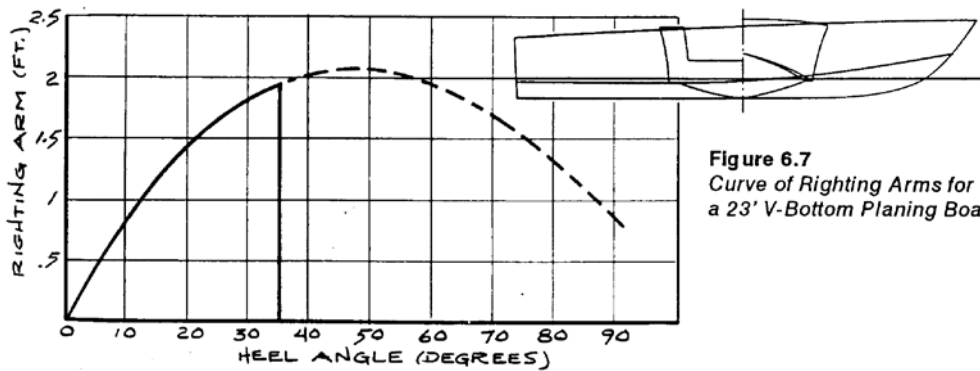


Figure 6.7  
Curve of Righting Arms for  
a 23' V-Bottom Planing Boat

Sur cette vedette à moteur, on a estimé qu'il ne valait pas la peine de tracer la courbe plus loin, en effet, les volumes ne sont plus que théoriques et il y a fort à parier qu'au delà de 100°, les hublots enfoncés et panneaux non étanches rendent le calcul caduque.

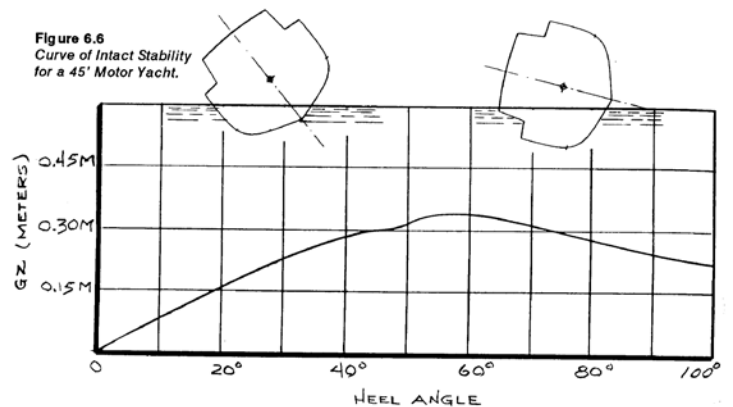
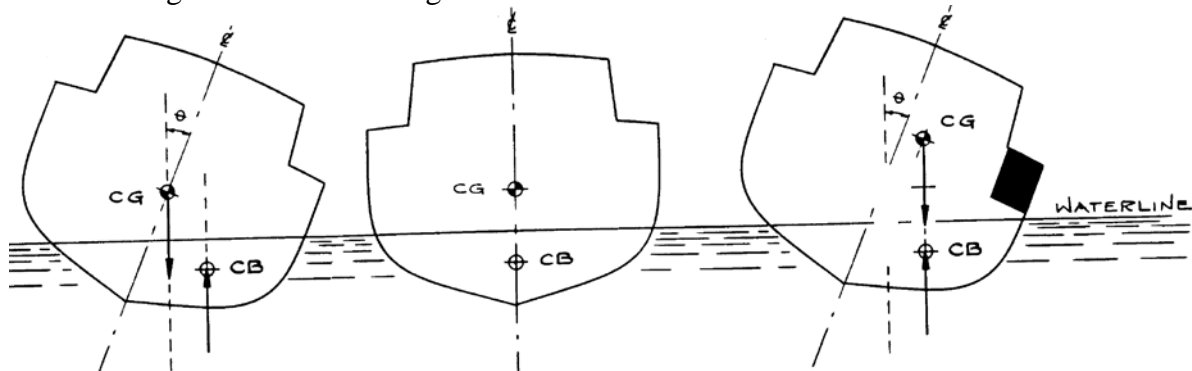


Figure 6.6  
Curve of Intact Stability  
for a 45' Motor Yacht.

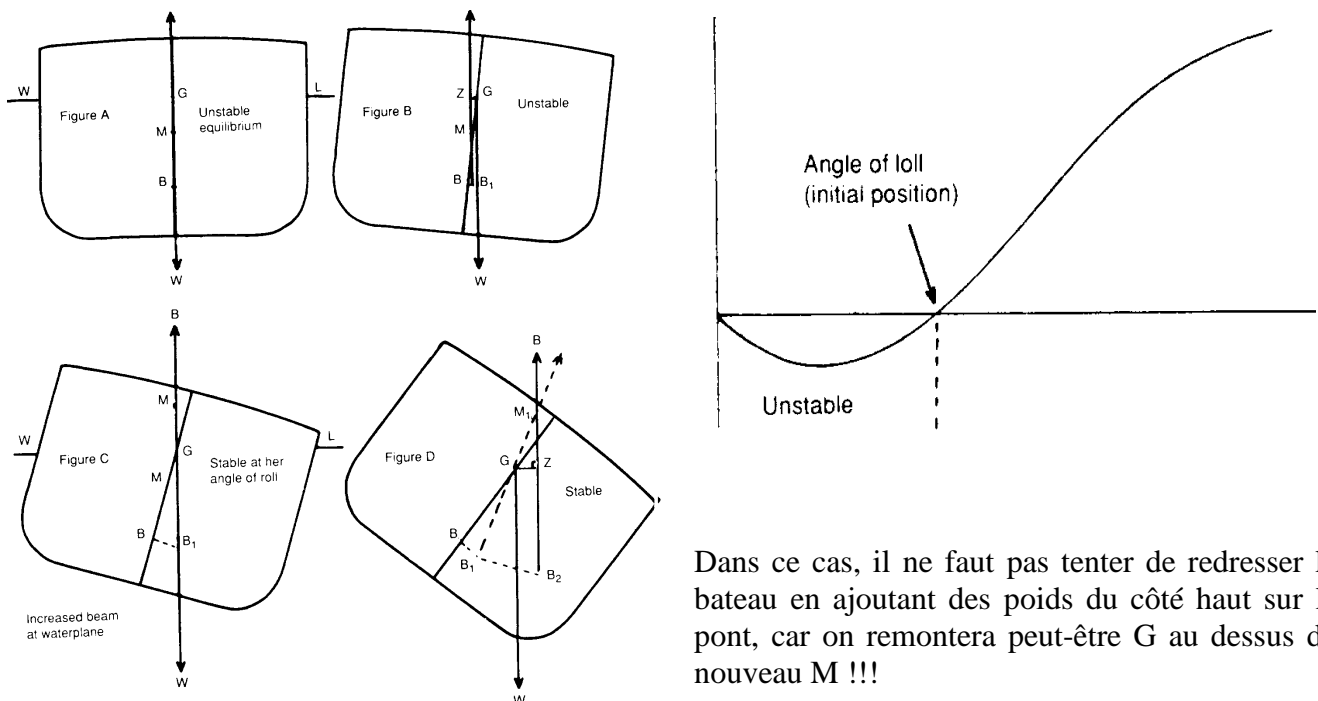
2.5. La gîte, ses causes et interprétation :

Il faut distinguer trois causes de gîte :



- Eléments extérieurs, instantanés ou durables : vent, vagues, mouvements de passagers, paquets de mer...
- Poids déplacés à bord de façon volontaire ou permanente : chargement, ballast, équipage au rappel...
- Instabilité initiale : GM est négatif.

Dans ce dernier cas, le bateau devrait se retourner, et il a commencé à le faire, mais sa forme est telle que M monte suffisamment à la gîte pour créer un équilibre temporaire (angle of loll)



Dans ce cas, il ne faut pas tenter de redresser le bateau en ajoutant des poids du côté haut sur le pont, car on remontera peut-être G au dessus du nouveau M !!!



### 3. STABILITE LONGITUDINALE :

L'architecte va déterminer un  $GM$  longitudinal, mais cela nous intéresse peu car le navire est toujours stable. Par contre, grâce à ce  $GM_L$ , on peut obtenir un facteur pour calculer l'assiette du navire:

#### Le moment pour trimer 1 cm ou MTC

Empiriquement, la plupart des petits bateaux de construction normale ont un  $GM_L$  proche de leur LWL (longueur à la flottaison)

Pour ces bateaux, on pourra donc admettre que  $MTC = \Delta / 100$

Si un homme de 80 kg avance de 3m sur un bateau de 10 tonnes, l'assiette changera de 2.4 cm soit 1.4 devant et 1 derrière

En effet, le moment créé par ce déplacement est de  $80 \times 3 = 240$  Kgm

Le moment pour trimer ce bateau est d'environ 100 Kgm ( $10.000 / 100$ )

$240 / 100$  donne un changement d'assiette de 2.4 cm.

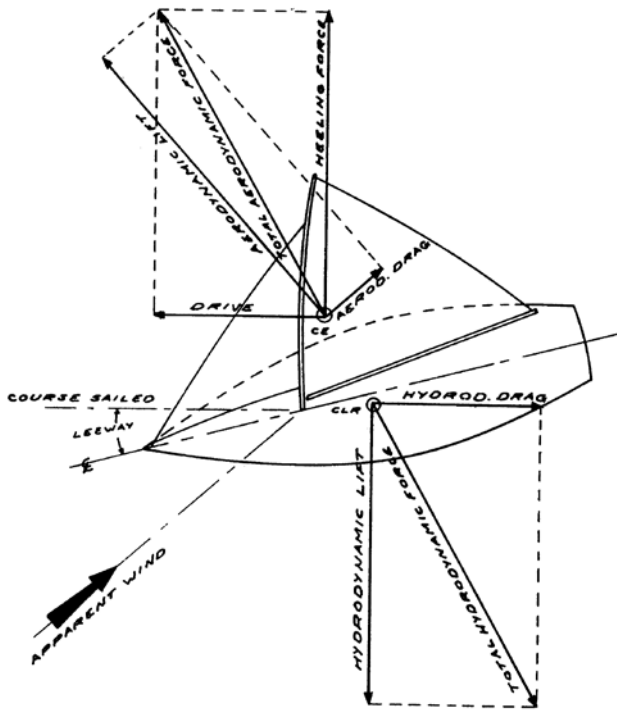
Le changement est plus prononcé à l'arrière car le point de pivotement (centre de la flottaison) est généralement situé entre  $3/5$  et  $2/3$  de la flottaison en partant de l'étrave

Pour l'ajout de poids, le principe est le même en calculant le moment avec la distance au centre de gravité.

On devra également calculer l'enfoncement avec le TPC (tonnes par cm) c'est à dire le poids nécessaire à enfoncer le bateau de 1 cm (obtenu en multipliant la surface du plan de flottaison par la densité de l'eau de mer)

$$TPC = (A_{WP} \cdot \rho_{\text{eau de mer}}) / 100$$

#### 4. RAIDEUR A LA TOILE :



Une force aérodynamique va s'appliquer sur le centre géométrique du profil du bateau, appelé centre de voilure ou centre d'effort, CE

Cette force est compensée par la résistance hydrodynamique de la carène, appliquée au centre de dérive ou centre de résistance latérale, CLR

#### BEAM WINDS

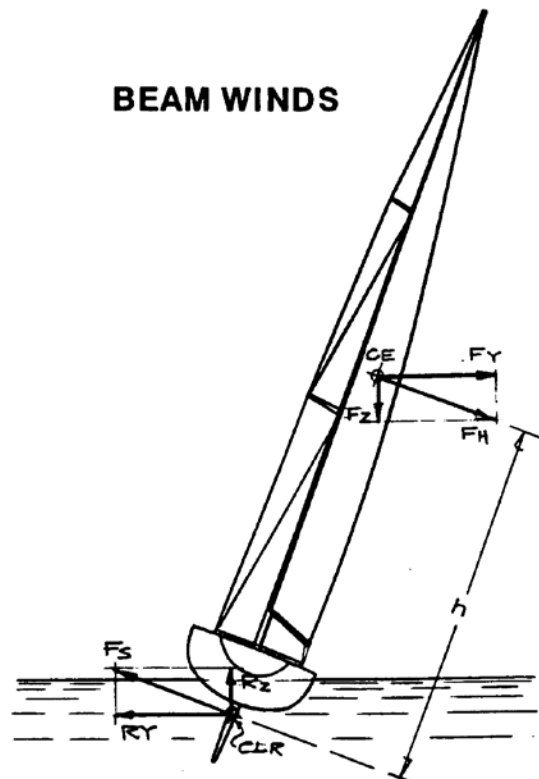
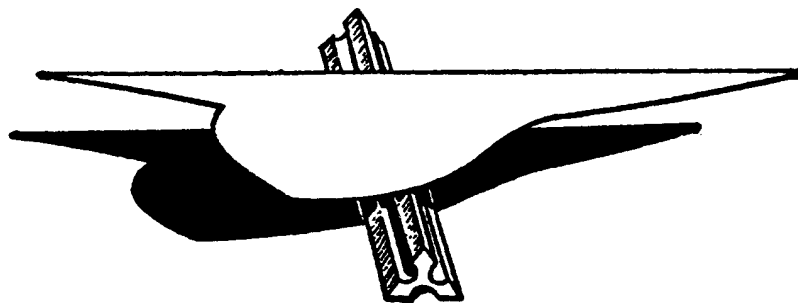


Figure 2.10

Ces deux forces vont créer un couple inclinant. Le navire va gîter jusqu'à atteindre l'angle auquel le moment redressant est égal au moment inclinant.

Si on connaît la force exercée par un vent donné dans les voiles, il est possible au moyen de la courbe de GZ de déterminer la voilure qui est raisonnable pour ce vent. Le calcul inverse est également possible.

On va déterminer les centres, mécaniquement pour le CLR et graphiquement pour le CE

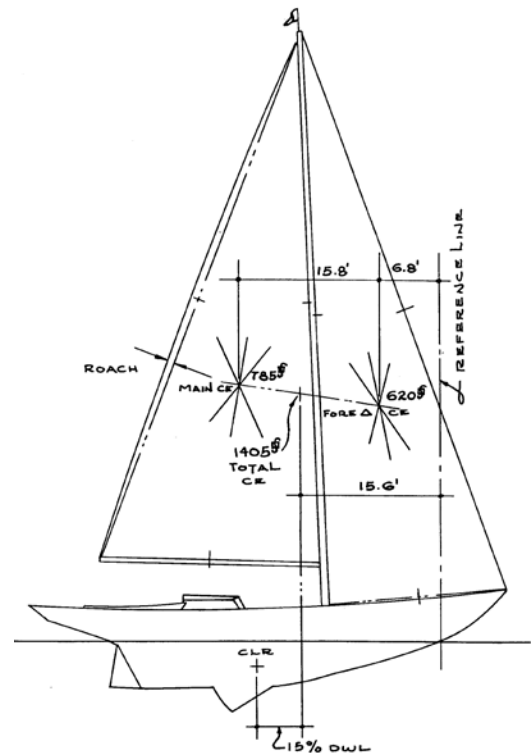


Dans la pratique cependant, un grand nombre de ces éléments échappent au calcul et c'est l'expérience de l'architecte ou du gréeur qui prime lors de la détermination de la surface à porter. Un exemple de méthode utilisable est basé sur la formule du coefficient de pression du vent:

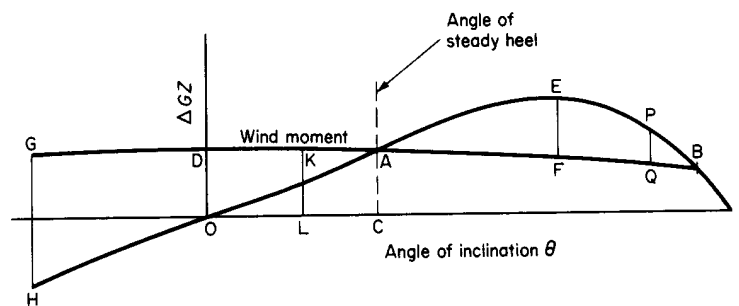
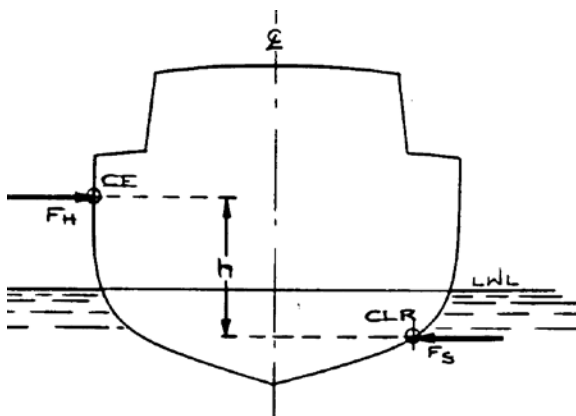
$$SA = \Delta \cdot GZ_{\Theta} / WPC \cdot LA \cdot C^2$$

SA est la surface de toile de route, GZ est déterminé pour l'angle d'immersion du liston, LA est le levier entre CE-CLR, le  $C^2$  sert à compenser ce levier pour la gîte  $\Theta$  et le WPC (wind pressure coefficient) dépend du service prévu pour le yacht et de l'expérience de l'architecte.

Notons au passage que ces mêmes données serviront à déterminer la stabilité de route et l'équilibre sous voile, autres éléments importants du comportement du voilier



Les mêmes éléments existent sur un bateau à moteur et il est des cas où il faut se préoccuper du fardage, qui viendra diminuer la réserve de stabilité du bateau.



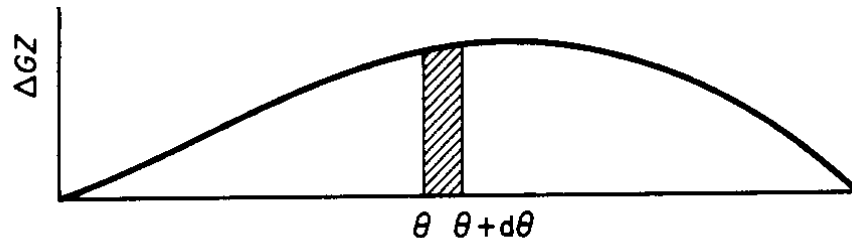
Si la pression du vent donne à ce bateau un angle de gîte permanent égal à l'angle  $\Theta$ , La réserve de stabilité n'est plus la surface sous la courbe, mais est réduite à la surface AEPBQF, soit moins de la moitié.

Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, les bateaux à moteur sont plus vulnérables aux coups de vent, car leur surface de fardage ne diminue que peu à la gîte, tandis que celle des voiliers se réduit presque à rien quand le mât est couché sur la surface.

## 5. STABILITE DYNAMIQUE :

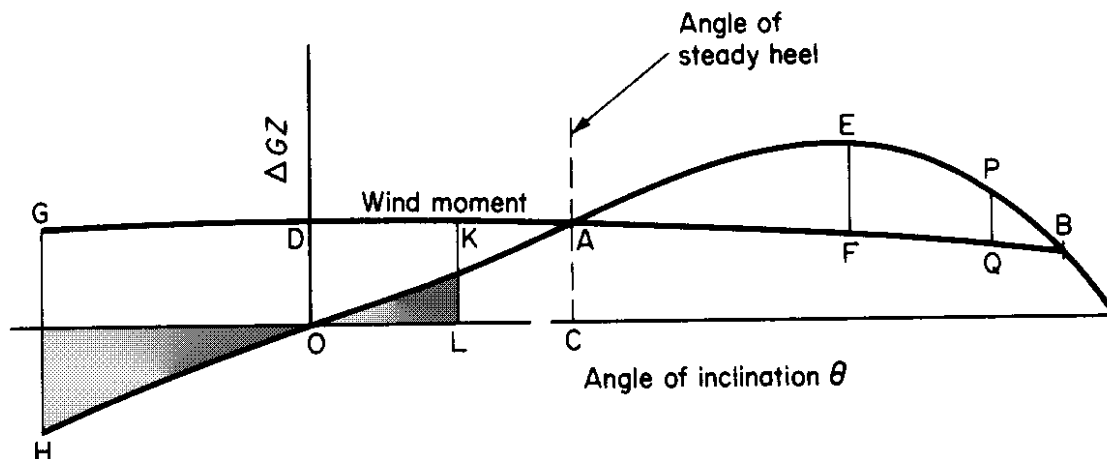
### 5.1. Travail et énergie :

On a déjà vu que la surface sous la courbe de  $GZ$  est la réserve de stabilité du navire. Il faut considérer qu'un changement d'inclinaison représente un travail, donc un échange d'énergie.



Dans la courbe ci-dessous, considérons d'abord un bateau qui a été incliné par une force extérieure jusqu'en GH. Dès la disparition de cette force, le bateau va récupérer l'énergie disponible et la dépenser en oscillant jusqu'en KL sur l'autre bord.

La surface entre OL est plus petite que la surface entre OH car la quille et les frottements ont absorbé de l'énergie au passage et amorti le retour de roulis.



Imaginons que le navire aie une gîte due au vent (ou une mauvaise répartition des poids) en AC (la courbe GAB représente le moment inclinant). Si une vague roule le bateau jusqu'en GH, l'énergie emmagasinée est maintenant la surface AGH.

Au retour, le bateau pourrait fort bien passer au-delà de B et donc chavirer. (Un exemple typique de ce genre de cas est un ULDB à quille pendulaire et ballast liquide qui serait pris à contre dans une rafale.)

### 5.2. Période de roulis :

Si on considère le navire comme un pendule, sa période de roulis est fonction inverse de la racine carrée du GM:

$$T_r = 2\pi k^2 / \sqrt{GM}$$

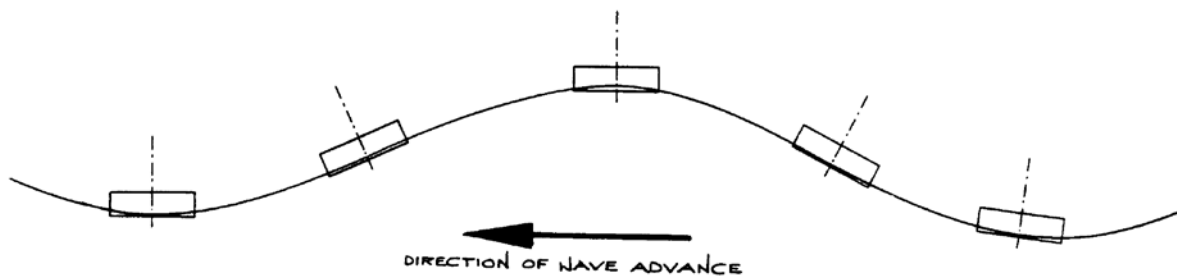
**Plus le navire est stable, plus son roulis sera rapide et inconfortable, plus le navire est volage, plus son roulis sera doux.**

Il est toutefois peu réaliste de vouloir calculer GM à partir de la période de roulis à cause du facteur  $k^2$  qui est fonction de l'inertie de rotation du navire, c'est à dire de sa forme, de la répartition des poids et des éventuels dispositifs d'amortissement de roulis.

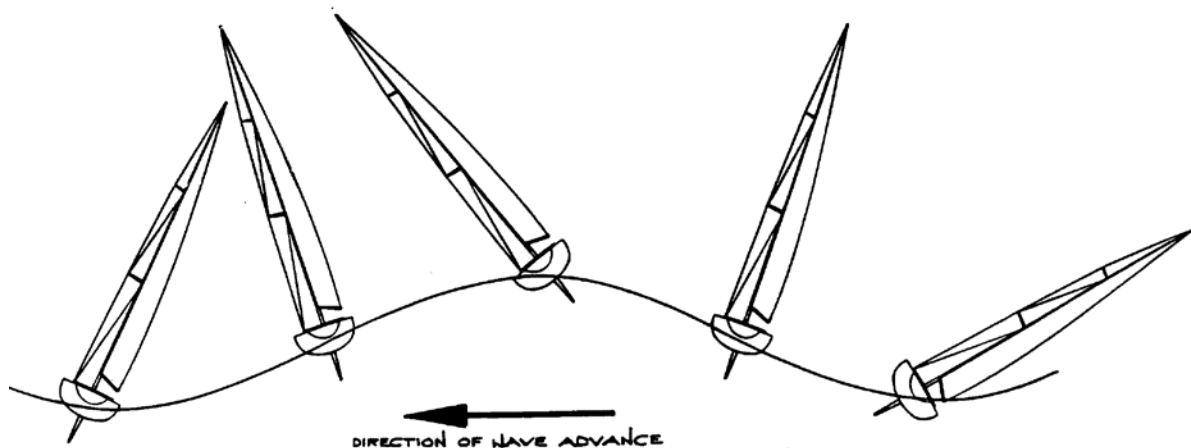
- |   |   |  |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Période de roulis</li> <li>➤ Période des vagues</li> <li>➤ Inertie (de masse ou de forme)</li> </ul> | } | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Amortissement</li> <li>➤ Amplification</li> </ul> |
|---|---|--|

### 5.3. Effet des vagues :

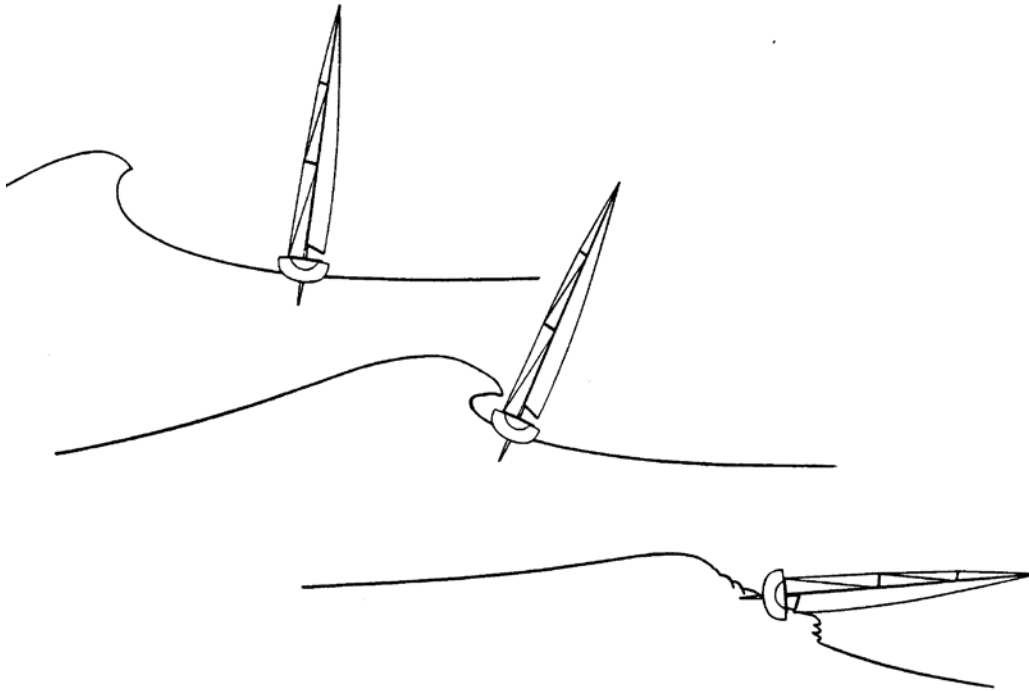
Un bateau très stable et avec peu d'inertie tendra à rester constamment perpendiculaire à la surface.



Un bateau moins stable et dont l'inertie au roulis est grande va chercher à suivre sa période propre plutôt que celle des vagues. S'il entre en résonance avec la période des vagues, l'amplitude du roulis risque d'augmenter progressivement.



La cause la plus évidente de chavirage est le bateau roulé par une déferlante.



Dans ce cas, s'il s'était agit d'une vedette ou d'un voilier démâté, donc dont l'inertie au roulis est moindre, il se serait sans doute déjà trouvé chaviré avant le passage de la crête de vague. Il est donc apparent qu'un voilier démâté, bien que plus stable, est plus vulnérable.

Bien sur une fois retourné, ce même voilier se redressera plus vite, mais entrent alors en ligne de compte les rentrées d'eau et dégâts divers, sans compter la réaction de l'équipage.

#### Bibliographies:

- KEMP & YOUNG : Ship stability, notes and explanations
- MUCKLE rév. TAYLOR : Muckle's naval architecture
- LOISIRS NAUTIQUES : Hors série 8, connaissance du tracé des carènes.
- HOWARD I. CHAPELLE: Yacht designing and planning.
- WESTLAWN INSTITUTE OF MARINE TECHNOLOGY: Syllabuses of the course of yacht design.