



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 :

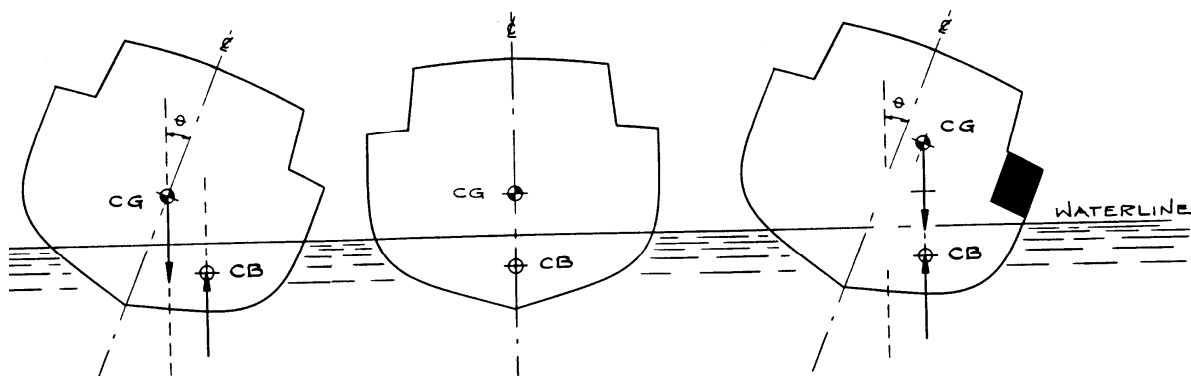
Le yacht flotte en équilibre entre deux forces:

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

équilibre, donc:

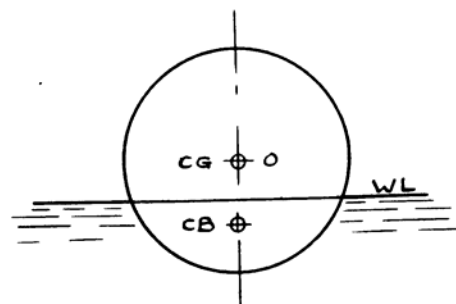
$$\Delta = W$$

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.



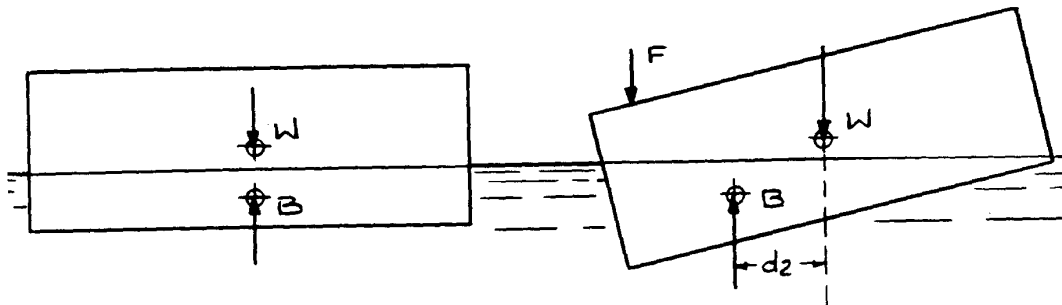
1.2. Eléments de la stabilité statique :

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.

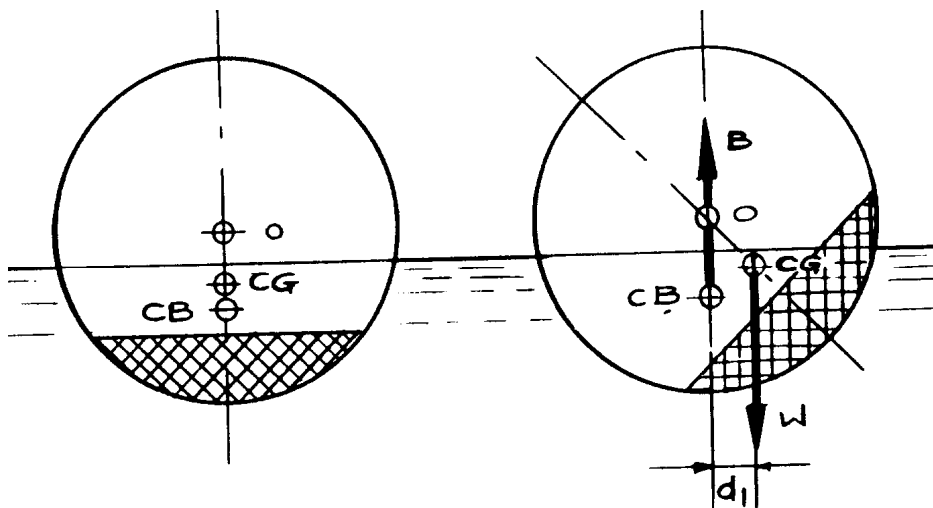


On crée une stabilité en jouant sur deux éléments

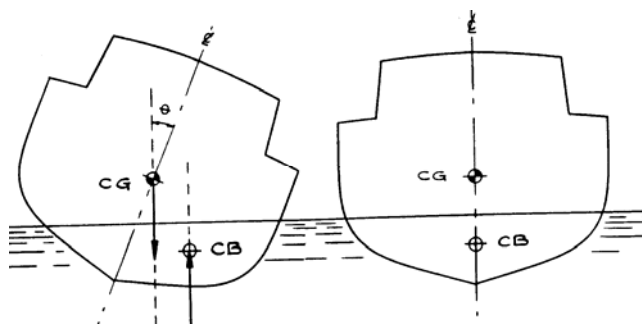
Forme : Le volume reste homogène mais on en change la forme.



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

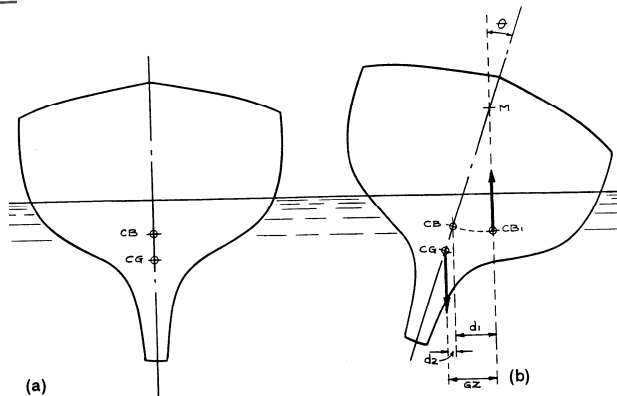


Dans la réalité, on a une composition des deux types de stabilité.



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

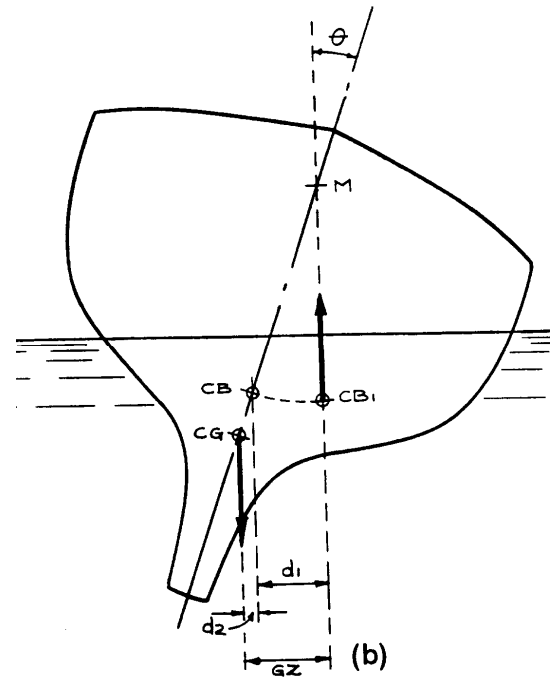
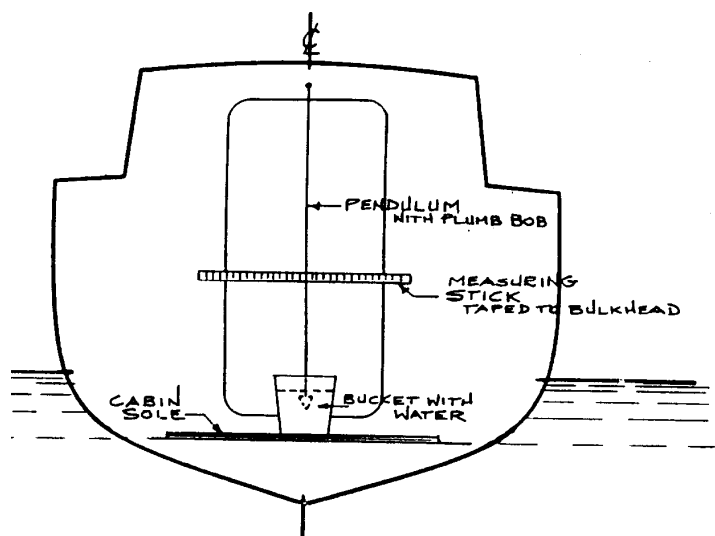
$$BM = (I_{wp}/Vol)$$

(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.

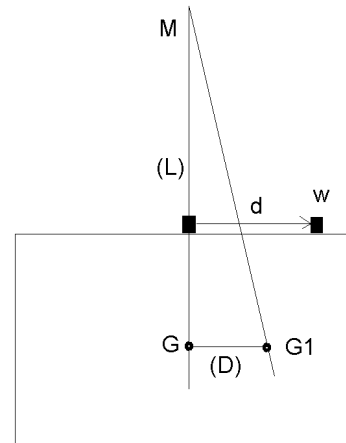


Le centre de gravité du bateau se déplace en fonction du poids déplacé

$$GG_1 = w.d/W$$

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.

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

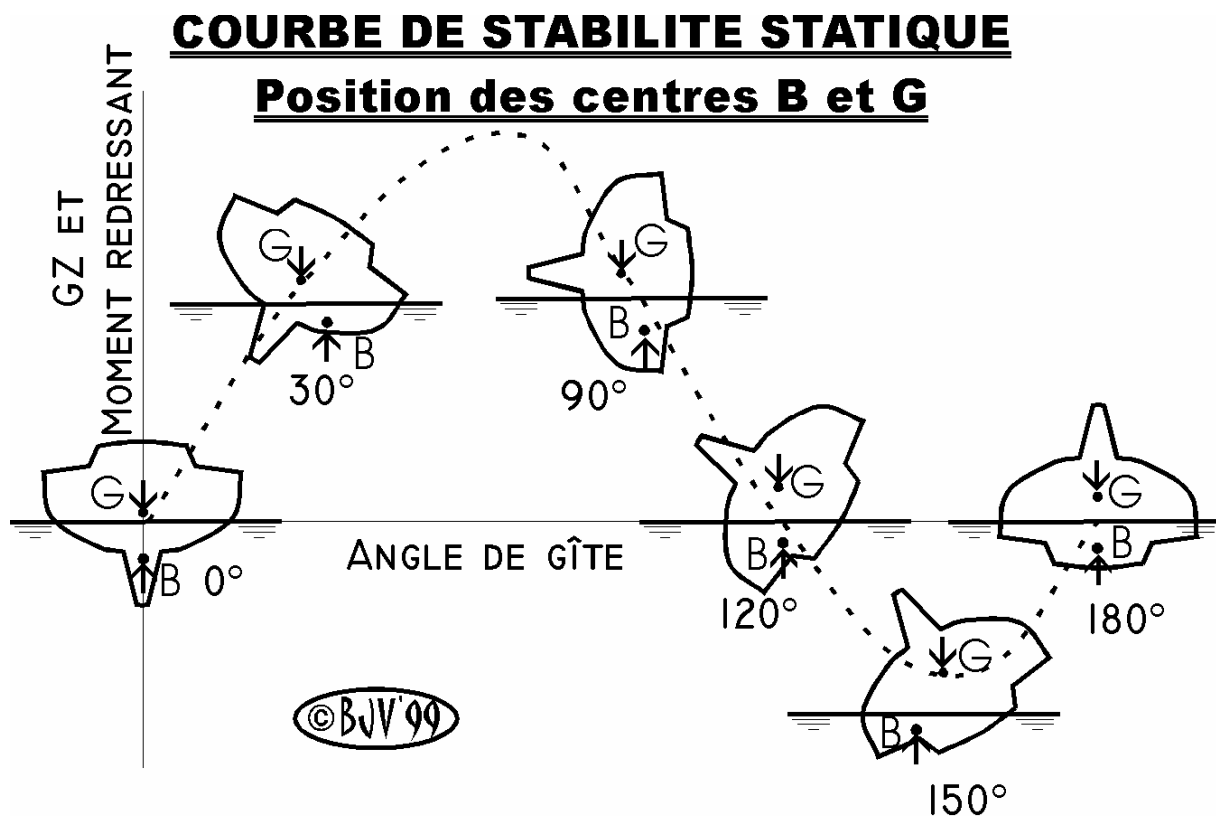
2. COURBE DE STABILITE STATIQUE :

Au delà de 10° 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 B 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° à 180° 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° , 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.

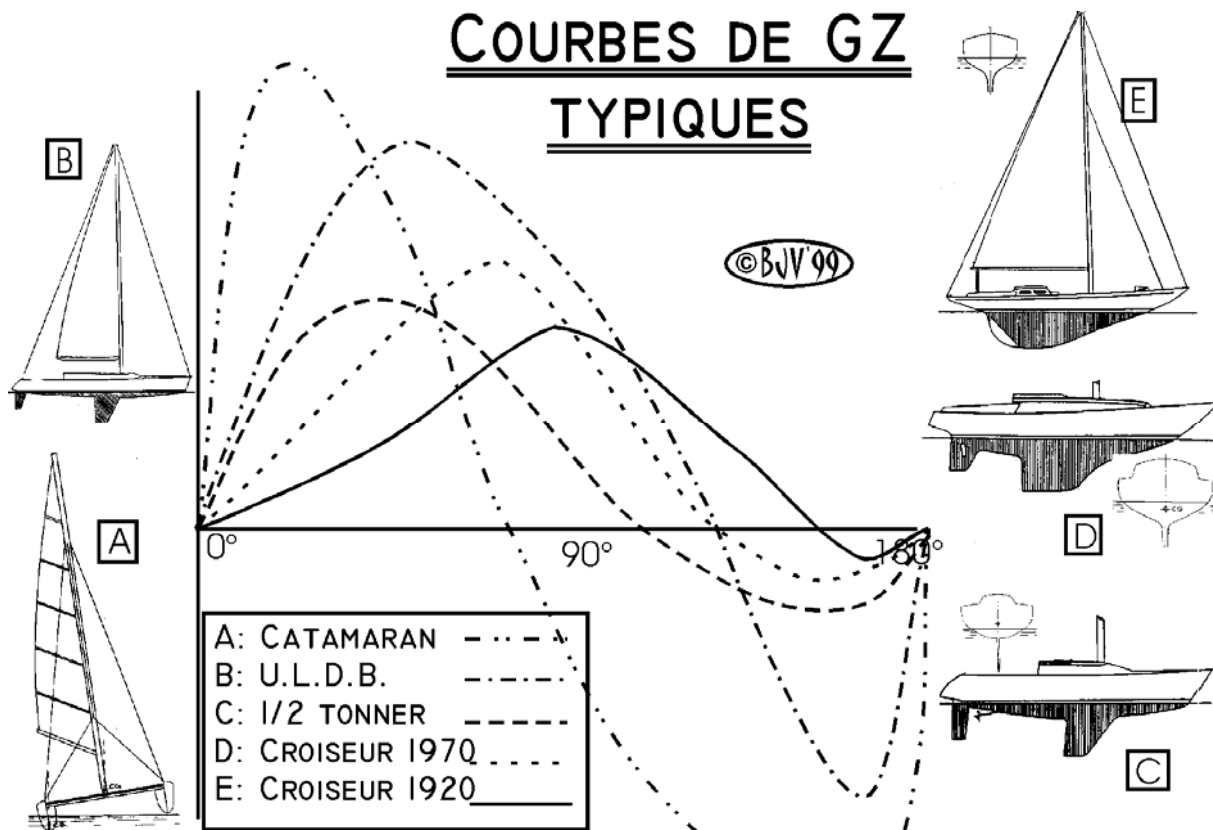
Plus on incline le bateau au-delà de 70° , plus la distance GZ diminue jusqu'à un point où B est de nouveau exactement aligné avec G à 120° dans ce cas (angle de stabilité indifférente = point de chavirement). Le bateau est en équilibre instable. Le moindre mouvement peut soit amorcer un redressement,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

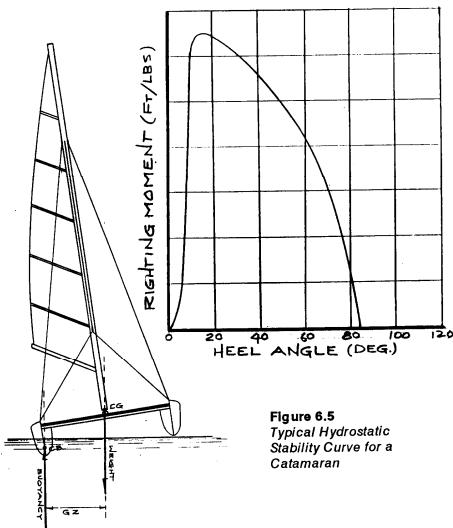


Figure 6.5
Typical Hydrostatic
Stability Curve for a
Catamaran

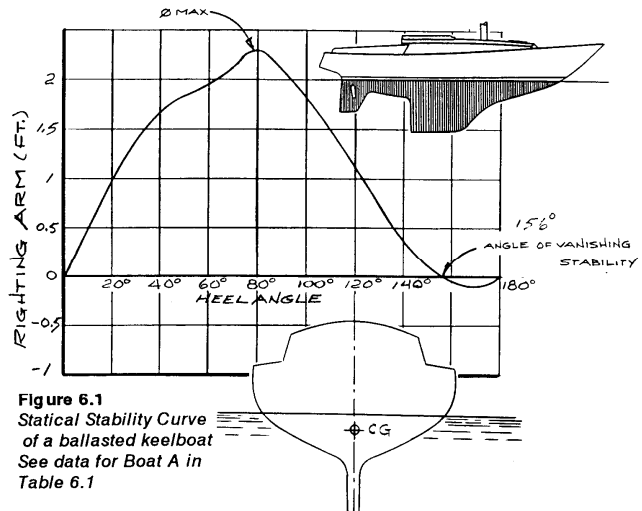


Figure 6.1
Statical Stability Curve
of a ballasted keelboat
See data for Boat A in
Table 6.1

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.

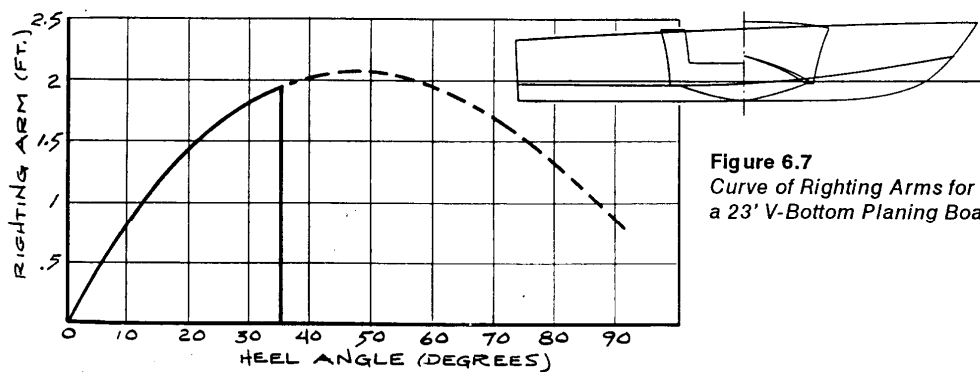


Figure 6.7
Curve of Righting Arms for
a 23° V-Bottom Planing Boat

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.

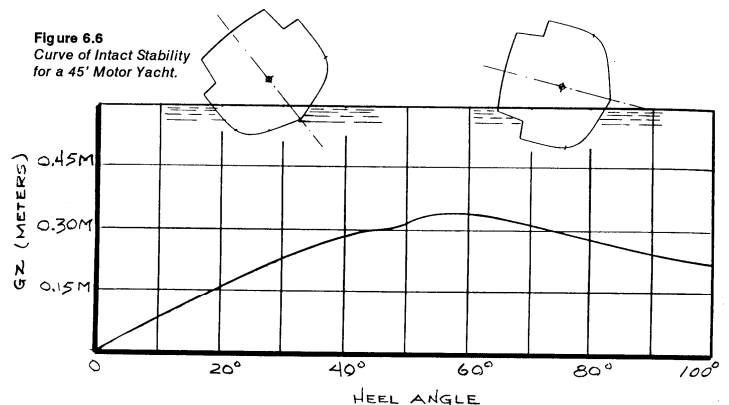
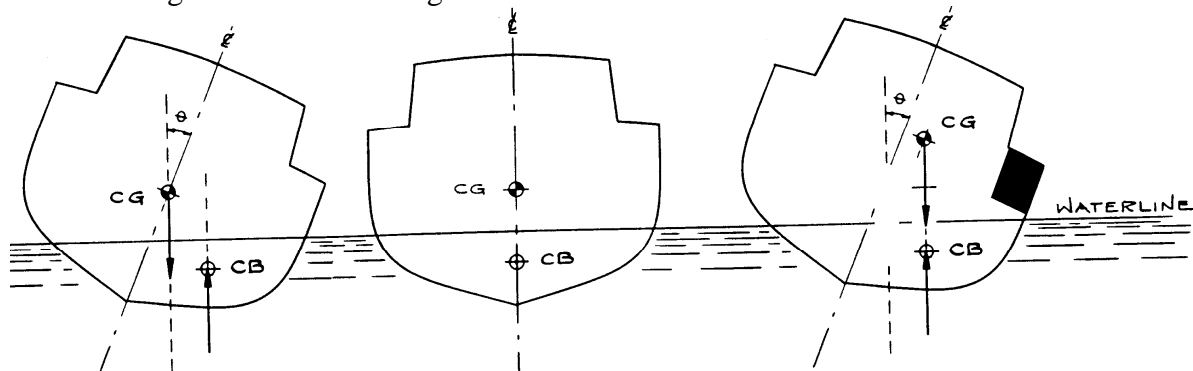


Figure 6.6
Curve of Intact Stability
for a 45° Motor Yacht.

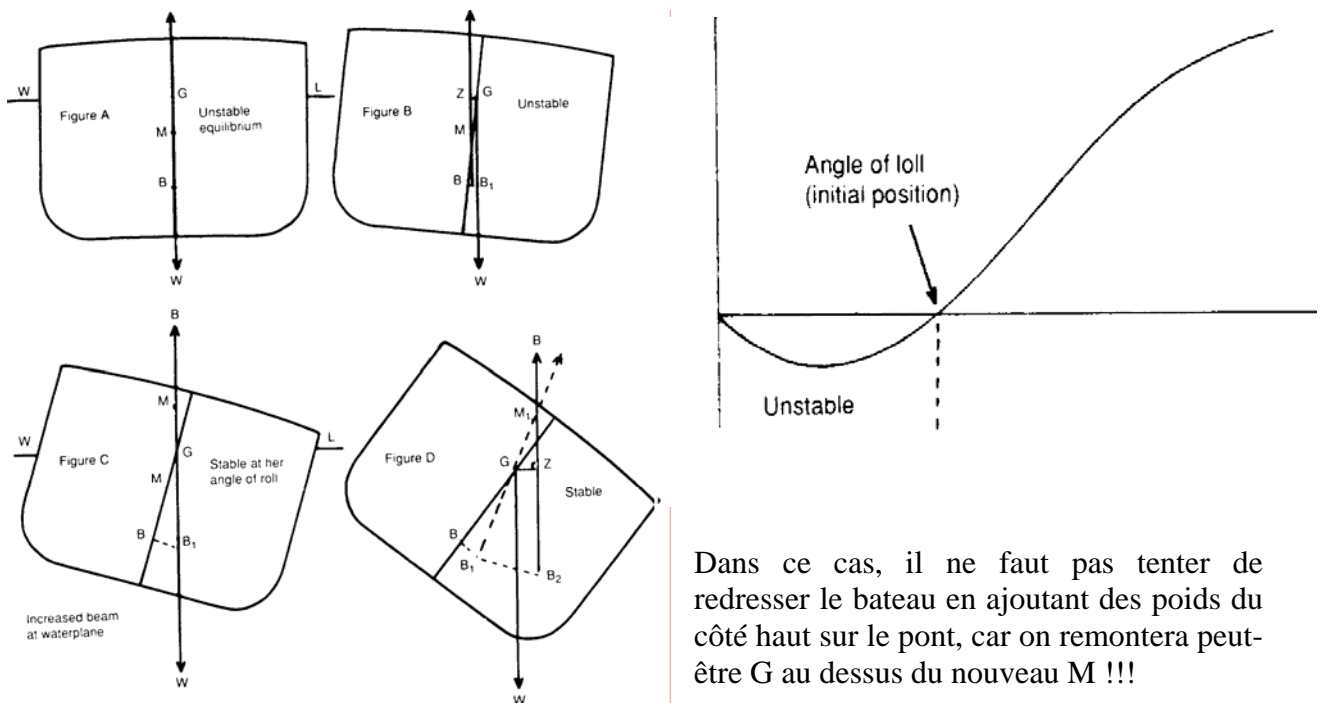
2.5. La gîte, ses causes et interprétation :

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 $80 \times 3 = 240 \text{ Kg.m}$

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

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

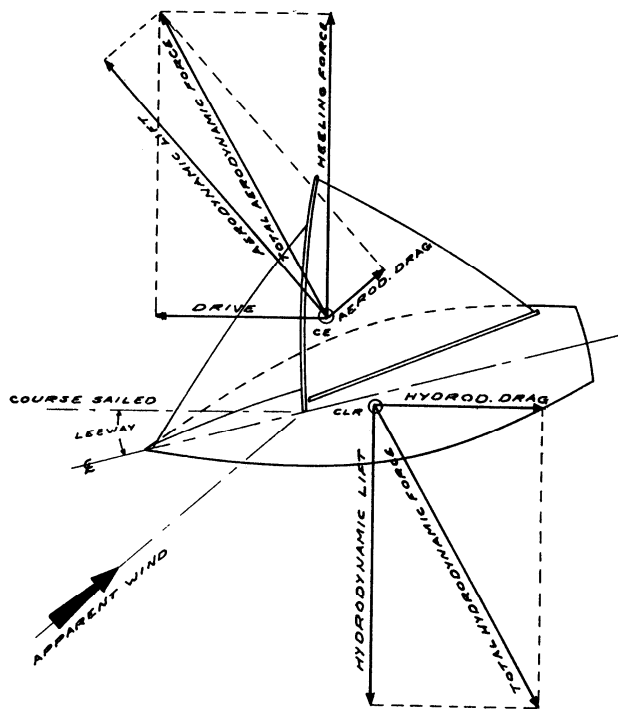
Le changement est plus prononcé à l'arrière car le point de pivotement (centre de la flottaison) est généralement situé entre $3/5$ et $2/3$ de la flottaison en partant de l'étrave

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

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.

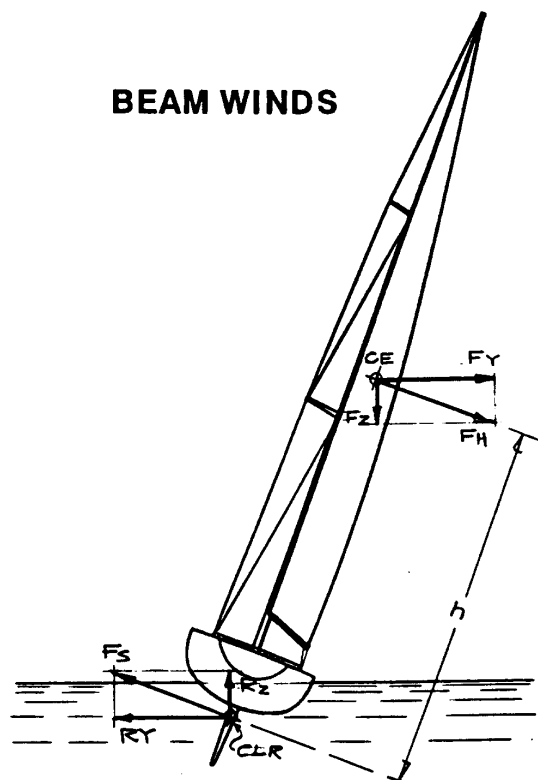
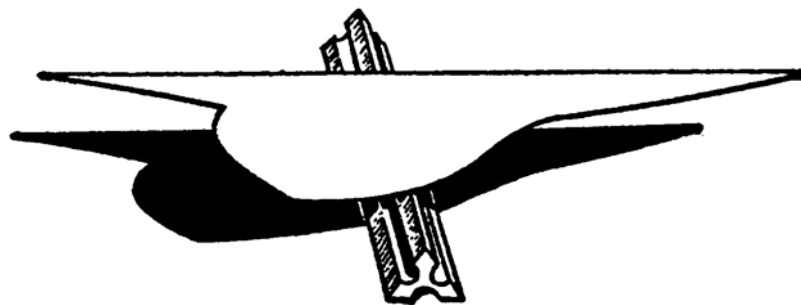


Figure 2.10

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

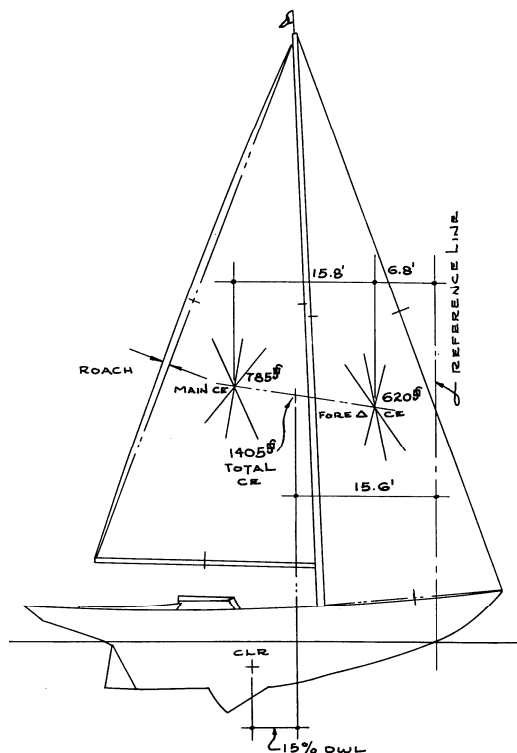


Dans la pratique cependant, un grand nombre de ces éléments échappent au calcul et c'est l'expérience de l'architecte ou du gréeur qui prime lors de la détermination de la surface à porter. Un exemple de méthode utilisable est basée sur la formule du coefficient de pression du vent:

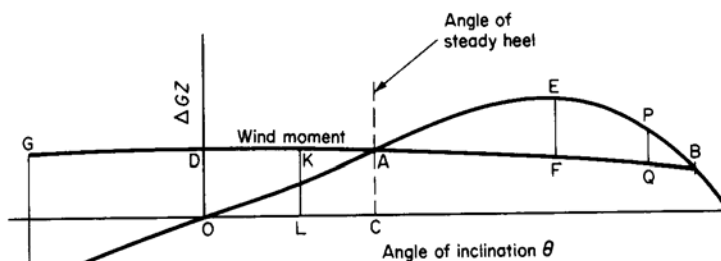
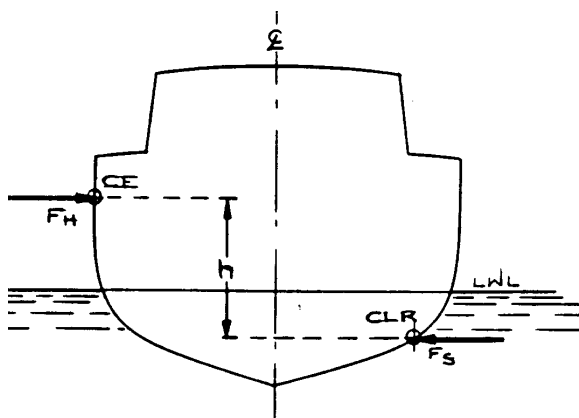
$$SA = \Delta \cdot GZ_{\Theta} / WPC \cdot LA \cdot C^2$$

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 Θ 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.



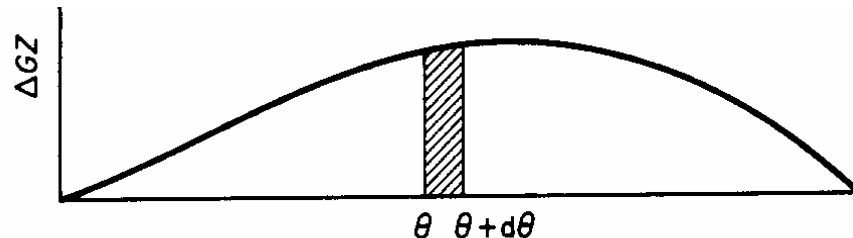
Si la pression du vent donne à ce bateau un angle de gîte permanent égal à l'angle Q, La réserve de stabilité n'est plus la surface sous la courbe, mais est réduite à la surface AEPBQF, soit moins de la moitié.

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 :

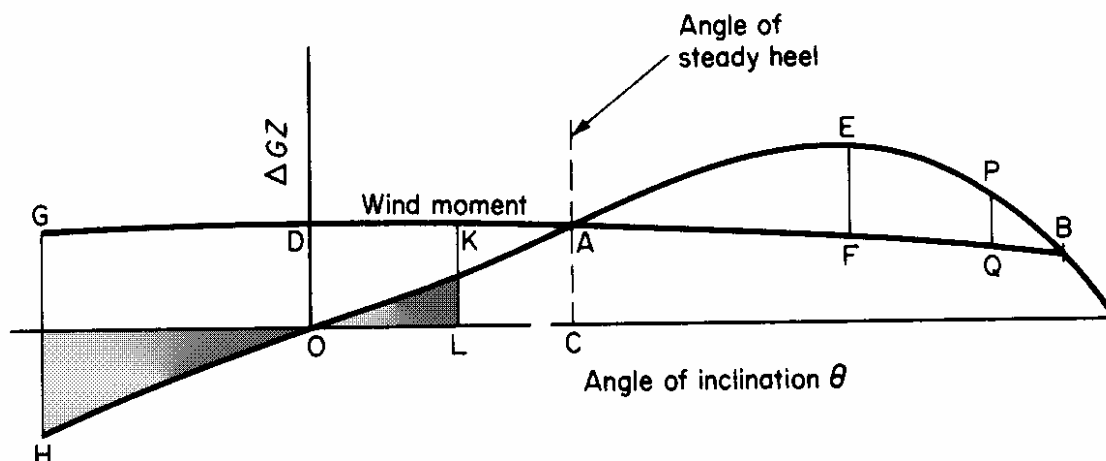
5.1. Travail et énergie :

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 frottement 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:

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

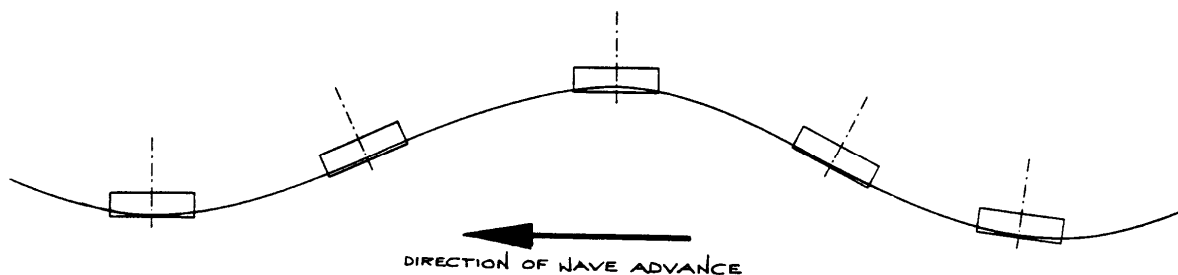
Plus le navire est stable, plus son roulis sera rapide et inconfortable, plus le navire est volage, plus son roulis sera doux.

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.

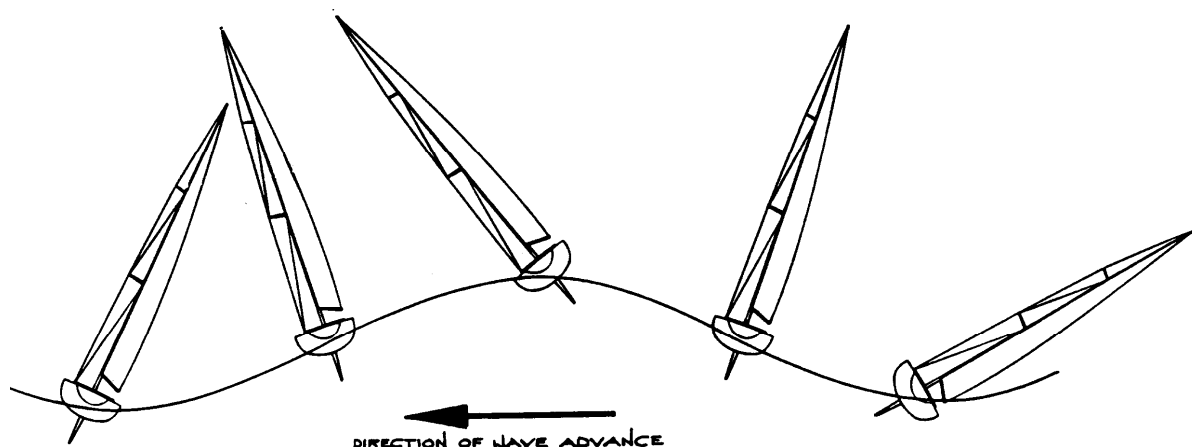
- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Période de roulis ➤ Période des vagues ➤ Inertie (de masse ou de forme) | } | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Amortissement ➤ Amplification |
|---|---|--|

5.3. Effet des vagues :

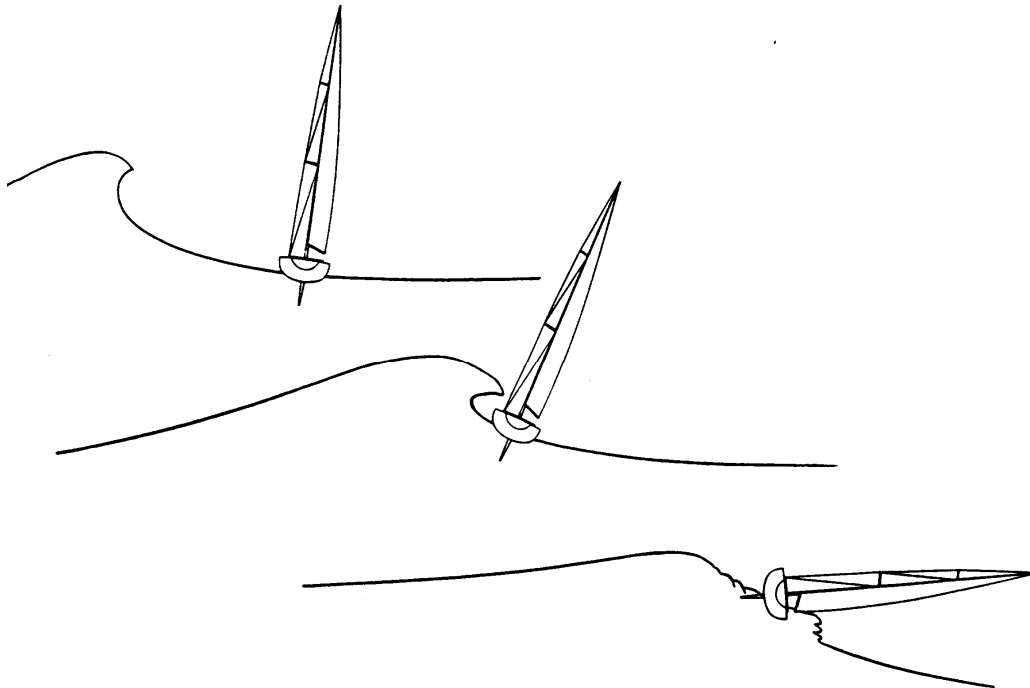
Un bateau très stable et avec peu d'inertie tendra à rester constamment perpendiculaire à la surface.



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 agi 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.

Bibliographie :

- 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.