

Chapitre 2

Introduction à la conception de la coque

Dans ce chapitre, nous allons définir les différentes formes, paramètres, dimensions, proportions et caractéristiques d'une coque. Il comprend les différents formules et méthodes que nous utiliserons dans le chapitre 4 pour la conception et la vérification.

1. Types de coque:

La coque est le constituant premier d'un bateau : elle forme le flotteur, c'est-à-dire l'élément assurant la flottabilité et l'étanchéité.

La coque est disponible en plusieurs types différents. Chaque type a une forme unique qui lui donne certaines caractéristiques de manipulation et de performance. En général, les différentes formes de coque se trouvent dans l'une des catégories suivantes (voir Figure 2.1):

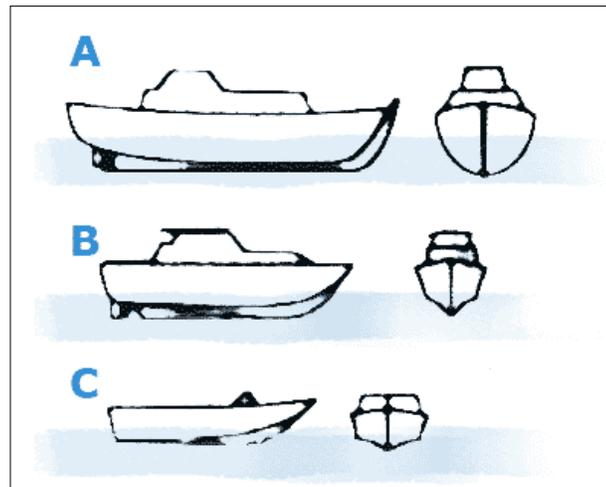


Figure 2. 1 - Types des coques: (A) Déplacement, (B) Semi-finale-déplacement, (C) Rabotage.

- Coque de déplacement: la coque est soutenue exclusivement ou principalement par la pression de l'eau déplacée par la coque.
- Coque de Semi-finale-déplacement, ou semi-finale-rabotage : la forme de coque est capable de développer une quantité modérée d'ascenseur dynamique, cependant, la majeure partie du poids du navire est encore soutenue par le déplacement.
- Coque de rabotage : Des coques qui montent sur l'eau s'appellent les coques de rabotage, parce que quand elles atteignent la vitesse, les coques sont

sensiblement soulevées au-dessus de l'eau. La forme de coque de rabotage est configurée pour développer la pression dynamique positive de sorte que son ébauche diminue avec l'augmentation de la vitesse.



Figure 2. 2 - Coque de rabotage ; Fountain 42RC.

2. Dimensions principaux:

La coque est mesurée par différentes dimensions telles que la longueur hors-tout (LOA), la longueur entre perpendiculaires (LPP), le maître-bau (B), le creux (D), le tirant d'eau (T) et le franc-bord (F) (voir Figure 2.3).

Les différents dimensions et proportions influencent plusieurs caractéristiques d'un bateau, comme la stabilité, la capacité, la résistance, l'énergie de propulsion, etc. La détermination de ces dimensions et proportions forme une phase importante dans l'architecture navale.

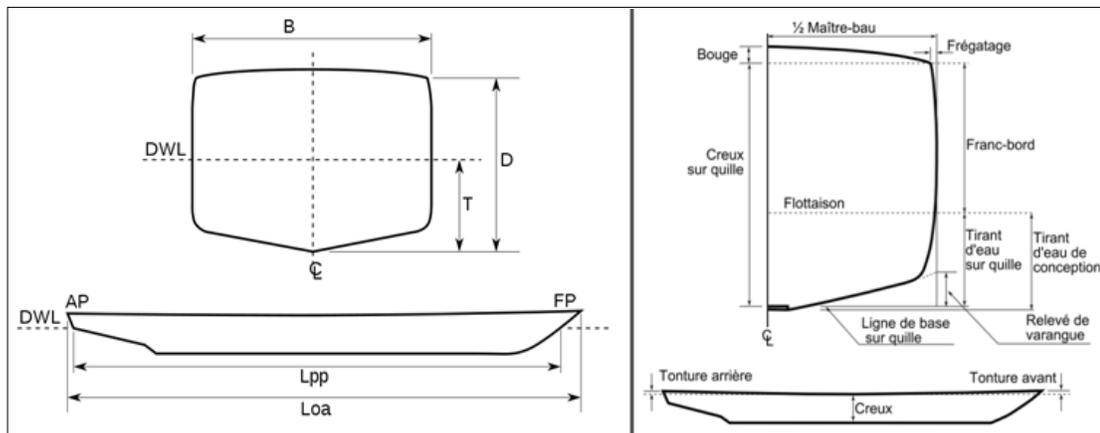


Figure 2. 3 - Mesures principales et terminologie de la forme d'une coque.

2.1. Longueur d'un bateau :

Selon les architectes et designers, la longueur d'un navire est mesurée en différents façons. Les mesures de longueur les plus couramment utilisées sont :

- Longueur hors-tout (LOA: Length Overall) Elle correspond à la distance entre les points extrêmes avant et arrière de la structure permanente du bateau.

- Longueur entre perpendiculaires (LBP: Length Between Perpendiculars ou LPP) Elle correspond à la longueur entre la perpendiculaire avant (PPAV) et la perpendiculaire arrière (PPAR) qui correspondent elles-mêmes à l'intersection de la coque avec la flottaison à pleine charge.
- Longueur sur la ligne de flottaison (LWL: Length on Load Waterline) est la distance mesurée dans le profil du point de proue au point de poupe de la ligne de flottaison (voir figure 2.4).

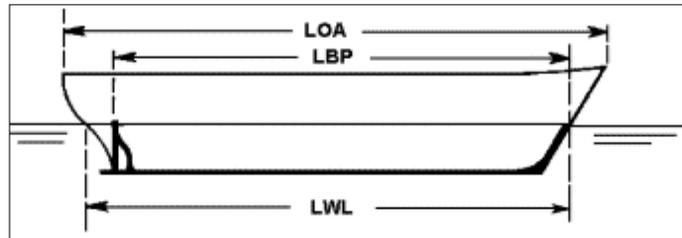


Figure 2.4 - Mesures de longueur.

Généralement, la longueur est déterminée selon des navires similaires ou à partir des formules et des diagrammes (résultants d'une base de données de navires similaires). La longueur résultante fournit alors la base de l'observation des autres dimensions. La forme classique de navire peut être utilisée comme un point de départ d'une procédure d'optimisation formelle. La méthode suivante doit être considérée pour calculer la longueur :

Formule recommandée par Posdunine, modifiée par Van Lamerran : (Réf. 1)

$$L_{PP} = C \cdot \left(\frac{V}{V + 2} \right)^2 \cdot \Delta^{1/3}$$

Où:

$C = 23.5$ pour $11 \leq V \leq 16.5$ Kn ; 24 pour $15.5 \leq V \leq 18.5$ Kn et 26 pour $V \geq 20$ Kn ;

L_{PP} est en (ft), V en (Kn) et Δ en (t).

2.2. Maître-bau :

Le maître-bau (B) d'un navire correspond à sa plus grande largeur (voir Figure 2.5). D'une manière générale, plus la largeur d'un bateau est large, plus la stabilité initiale augmente. (B_{WL}) est le terme employé pour mesurer la largeur d'un bateau le long de la ligne de flottaison.

Selon la *Réf. 1*; La largeur peut être choisie arbitrairement, elle sera juste pour satisfaire les exigences de stabilité. Le rapport L/B est moins significatif pour la stabilité que B/T .

Les rapports typiques de $(L/B) = 4$ pour les petits bateaux avec $L \leq 30\text{m}$; 6.5 pour $L \geq 130\text{m}$ et $4.0 + 0.025 (L - 30)$ pour $30\text{m} \leq L \leq 130\text{m}$ (*d'après Réf. 5*)

De même, une règle générale dit que les pluparts des monocoques (qui ont seulement une seule coque) de 6m à 250m ont un maître-bau qui peut être très rudement calculé par la formule suivante :

Maître-bau = LOA (longueur hors-tout, en pieds) à la puissance de $2/3 = L_{OA}^{2/3}$

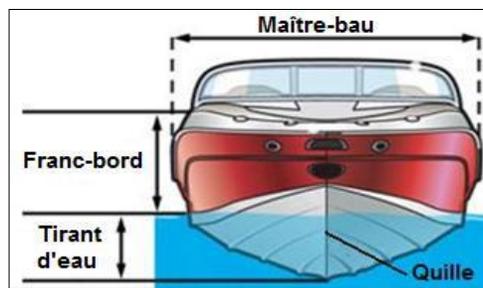


Figure 2. 5 - Maître-bau.

2.3. Creux: (Réf. 5)

En architecture navale, le creux (D) est l'une des dimensions caractéristiques, et mesure la distance entre le point le plus bas du pont principal et le point le plus bas de la quille d'un navire (voir figure 2.6). Il est égal à l'addition du tirant d'eau et du franc-bord. On l'utilise notamment pour son rapport avec la largeur (B/D) . Pour les navires monocoques : $1.55 \leq B/D \leq 2.5$

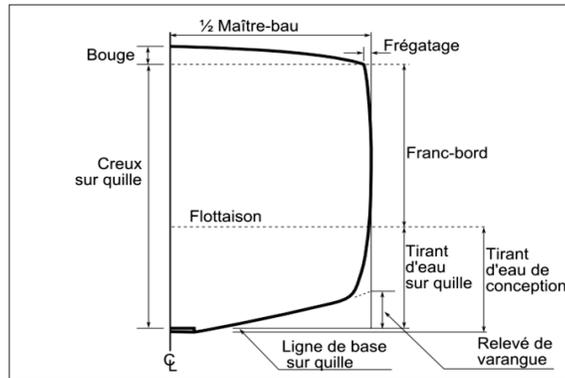


Figure 2.6 - Creux, Tirant d'eau et franc-bord.

2.4. Tirant d'eau:

Le tirant d'eau (T) est la hauteur de la partie immergée du bateau qui varie en fonction de la charge transportée. Il correspond à la distance verticale entre la ligne flottaison et le point le plus bas de la coque, usuellement la quille (voir Figure 2.6).

Le tirant d'eau doit correspondre à l'équation $\nabla = L \cdot B \cdot T \cdot C_B$. S'il n'est pas limité, on le choisit en fonction du maître-bau (Réf. 1).

Généralement, pour les navires monocoques : $2.25 \leq B/T \leq 3.75$. (Réf. 5)

2.5. Franc-bord:

Le franc-bord (F) d'un navire est la distance verticale entre la ligne de flottaison et le pont principal. Cette hauteur est variable selon le déplacement (voir Figure 2.6).

La valeur du franc-bord minimum est déterminante pour un navire : en effet, elle définit la marge de sécurité en cas d'envahissement du navire ou en cas de rencontres avec les vagues. Il est courant d'associer franc-bord et réserve de flottabilité. Un navire au franc-bord élevé aura moins de chances de voir les vagues se briser sur son pont; en revanche, il aura une plus grande prise au vent et dérivera plus facilement sous l'action de celui-ci.

3. Caractéristiques de la coque:

Pour définir la forme de la coque, il est possible de tirer un certain nombre de caractéristiques et coefficients de la forme qui ont une importance dans la détermination de la performance générale du navire.

3.1. Déplacement :

Le déplacement (Δ) est une mesure du poids d'un navire dans différentes situations de chargement. C'est le poids de l'eau équivalent au volume immergé de la coque. Il est exprimé en tonnes (voir Figure 2.7).

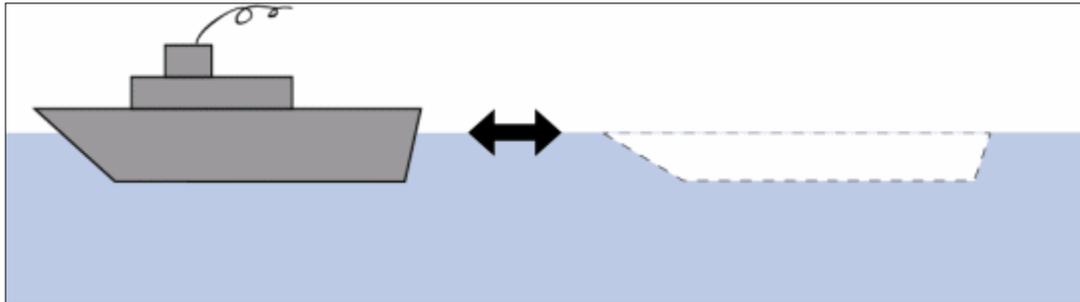


Figure 2. 7 - Déplacement d'un navire.

Le déplacement peut être défini par la formule suivante :

$$\Delta = \rho \cdot g \cdot \nabla$$

ρ : La densité de l'eau où le navire se flotte.

g : L'accélération due à la gravité.

∇ : Le volume sous l'eau.

3.2. Coefficient de bloc:

Le coefficient de bloc (C_b) est le rapport du volume de remplissage par le volume d'un bloc rectangulaire de longueur égal à (L_{pp}), de largeur (B) et de hauteur (T) (voir Figure 2.8).

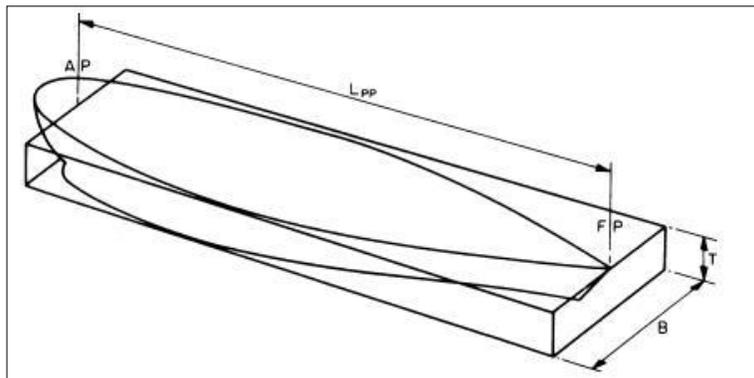


Figure 2. 8 - Coefficient de bloc.

D'où; d'après Réf. 12 :

$$C_b = \frac{\nabla}{B \cdot L_{pp} \cdot T}$$

La valeur de C_b varie entre 0.4 et 0.85, ce coefficient donne une idée sur la forme « V » de la coque et il est principalement utilisé comme critère pour les grands navires.

Formule d'Ayre; Réf. 5:

$$C_b = C - 1.68 \cdot F_n$$

$C = 1.08$ pour les bateaux à seule hélice et $C=1.09$ pour les double-hélices. Actuellement, cette formule est souvent utilisée avec $C=1.06$.

Cette formule peut être réécrite comme; Réf. 5 :

$$C_b = \frac{0.14}{F_n} \cdot \frac{L/B + 20}{26} \quad \text{ou} \quad C_b = \frac{0.23}{F_n^{2/3}} \cdot \frac{L/B + 20}{26}$$

Les formules ci-dessus sont valables pour $0.48 \leq C_b \leq 0.85$ et $0.14 \leq F_n \leq 0.32$

Une étude statique japonais donne que pour : $0.15 \leq F_n \leq 0.32$; Réf. 5

$$C_b = -4.22 + 27.8 \cdot \sqrt{F_n} - 39.1 \cdot F_n + 46.6 \cdot F_n^3$$

N.B. : *Nombre de Froude est un nombre sans dimensions compare les forces d'inertie et de la gravité. Il peut être employé pour mesurer la résistance d'un objet se déplaçant par l'eau, et compare les objets de différentes tailles. Pour un bateau, le nombre de Froude est défini comme ; Réf. 1 :*

$$F_n = V / \sqrt{g \cdot L}$$

Là où V est la vitesse du bateau, g est l'accélération due à la pesanteur et L est la longueur du bateau.

3.3. Coefficient prismatique: (Réf. 12)

Le coefficient prismatique transversal est la proportion du volume de déplacement par rapport à un prisme de longueur L_{pp} et de section égal à la section central (midship sectional area) A_x .

$$C_p = \frac{\nabla}{L_{pp} \cdot A_x}$$

Le coefficient prismatique vertical est la proportion du volume de déplacement par rapport à un prisme de longueur égale au tirant d'eau (T) et de section égal à la section du plan d'eau (waterplane sectional area) (A_W) (voir Figure 2.9).

$$C_{Vp} = \frac{\nabla}{T \cdot A_W}$$

Le coefficient prismatique est l'un des facteurs les plus importants utilisés dans la détermination de la forme générale de la coque. Ce coefficient varie de 0.5 à 0.8.

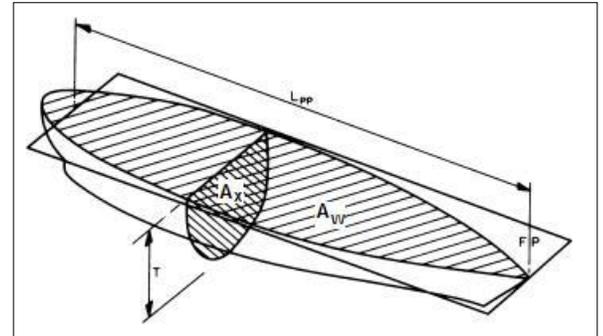


Figure 2.9 - Coefficients prismatiques

3.4. Coefficient de la section médiane (Réf. 5 et 12):

Le coefficient de la section médiane (Midship section coefficient), (C_M) est la proportion de la section médiane (A_x) par rapport à l'air de la rectangule des côtés égaux à la maitre -bau B et le tirant d'eau (T) (voir figure 2.10).

$$C_M = \frac{A_x}{B \cdot T}$$

La valeur recommandée de (C_M) peut être donnée par la formule suivante :

$$C_M = 0.977 + 0.085(C_B - 0.6) = 1.006 - 0.0056 C_B^{-3.56} = (1 + (1 - C_B)^{3.5})^{-1}$$

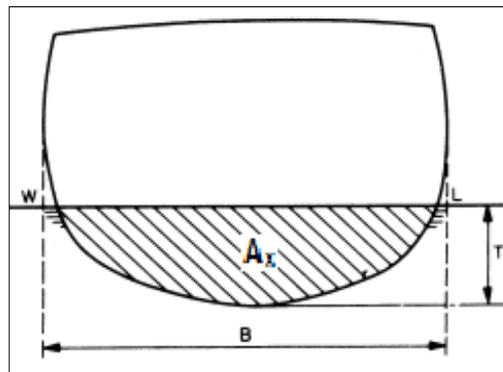


Figure 2.10 - Coefficient de la section médiane

3.5. Coefficient du plan d'eau : (Réf. 12)

Le coefficient du plan d'eau (Waterplane coefficient) (C_{WP}) est le rapport de l'air du plan d'eau (A_W) par la section d'un rectangle de dimensions (B) et (L_{WL}) (voir Figure 2.11).

$$C_{WP} = \frac{A_W}{B \cdot L_{WL}}$$

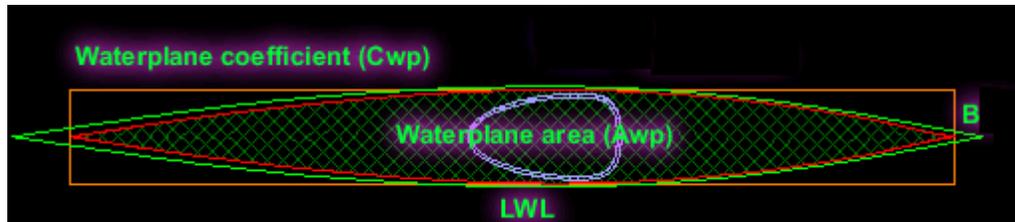


Figure 2. 11 - Coefficient du plan d'eau.

4. Equation de conception : (Réf. 1)

Lorsqu'il s'agit de déterminer les dimensions et les coefficients principaux, il est approprié de se tenir à une séquence. Après la longueur, le coefficient de bloc (C_B) et la largeur du navire en relation avec le tirant (T) devront être déterminés. (C_B) sera discuté ultérieurement avec les proportions principales. L'équation :

$$\nabla = L \cdot B \cdot T \cdot C_B$$

établit la valeur du produit $B \cdot T$. L'étape prochaine consiste à calculer la largeur comme un facteur de ce produit. Si on varie B pendant la phase de la conception, T et D se varient généralement en inverse de la largeur B .

L'équation de conception décrit le déplacement :

$$\Delta = \rho \cdot g \cdot \nabla = \rho \cdot L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot g$$

Les valeurs initiales pour l'équation de conception peuvent être dérivées à partir des navires similaires, des formules et des diagrammes et elles sont souvent variées arbitrairement. Les caractéristiques de la conception désirées sont beaucoup influencées par les rapports L/B , B/T et C_B . L/B et C_B affectent la résistance et B/T la stabilité. L'équation de conception peut être exprimée en termes des ces rapports, le résultat est une équation pour déterminer B :

$$B = \left(\frac{\Delta \cdot (B/T)}{\rho \cdot C_B \cdot g \cdot (L/B)} \right)^{1/3}$$

B est donc la seule inconnue obtenue directement à partir de l'équation de conception. La longueur du navire et le tirant d'eau sont déterminés ensuite à partir des rapports L/B et B/T .

Généralement, la résistance augmente avec la diminution de L/B ; cette tendance est amplifiée par augmentation de la vitesse. La résistance minimale pour tous les coefficients de bloc et les vitesses correspondantes est obtenue pour $8 < L/B < 9$. Le navire avec C_B supérieur que la valeur recommandée pour le nombre de Froude doit être augmenté en largeur et en tirant d'eau pour permettre une valeur de C_B plus favorable.

5. Flottation et stabilité:

5.1. Flottation et principe d'Archimède :

On appelle poussée d'Archimède l'action vers le haut que l'eau exerce sur un objet plongé dedans. Cette poussée s'oppose au poids. On peut la mesurer : on constate qu'elle est égale au poids du liquide dont l'objet a pris la place. La poussée d'Archimède est plus grande dans un liquide de masse volumique plus grand.

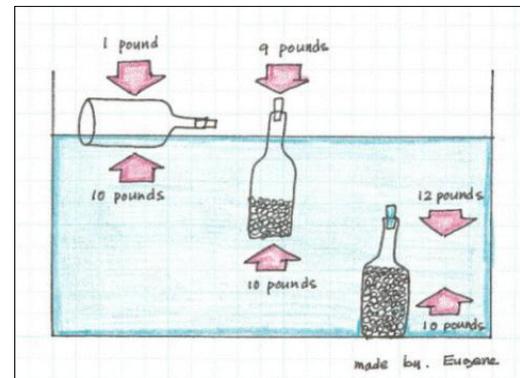


Figure 2. 12 – Principe d'Archimède.

Si un bateau peut flotter, c'est que la poussée d'Archimède que l'eau exerce sur lui est égale au poids du bateau. Si le poids du bateau est grand, le bateau s'enfonce beaucoup; il occupe la place d'un grand volume d'eau : alors la poussée d'Archimède est assez grande et est égale à son poids. La coque du bateau a un grand volume. Comme cette coque est creuse, son poids n'est pas trop grand, même si les substances qui servent à faire le bateau ont une grande densité. En fait en dessous de la ligne de flottaison le bateau contient surtout de l'air. Considérons le volume du bateau en-dessous de cette ligne de flottaison. Si ce volume est plus léger que le même volume d'eau alors le bateau flotte. Il faut donc considérer non seulement la densité de la matière constituant la coque mais également la densité de l'air enfermé dans la coque.

Puisque le corps est en équilibre, il doit être une force de la même magnitude et dans la même ligne d'action que le poids, mais pour s'y opposer. Cette force d'opposition est générée par les pressions hydrostatiques qui agissent sur le corps, ceux-ci agissent normale à la surface du corps et peut être résolu en composantes verticales et horizontales (voir Figure 2.13). La somme des composantes verticales doit être égale au poids. Les composantes horizontales doit être annulées si non le corps se déplace latéralement. La force gravitationnelle mg peut être imaginée comme concentrée en un point qui est le centre de masse, communément appelé le centre de gravité G ;

de même la force d'opposition peuvent être imaginées comme concentrée à un point B qui s'appelle le centre de carène.

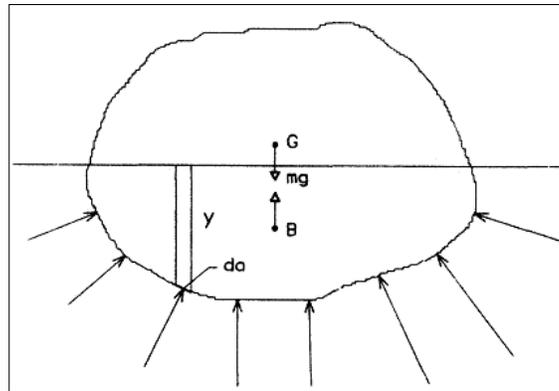


Figure 2. 13 – Flottabilité.

Considérons maintenant les forces hydrostatiques agissant sur un petit élément de la surface, d_a tel que y la profondeur sous la ligne de flottaison. P (pression) = $\rho \cdot g \cdot y$. La force normale sur un élément d_a est égale à $\rho \cdot g \cdot y \cdot d_a$.

Par intégration sur le volume, la force verticale totale va être : $\rho \cdot g \cdot \nabla$; où ∇ est le volume de la partie immergée. C'est aussi le poids de l'eau déplacée. C'est cette force verticale qui pousse le corps et elle est connue comme la force de poussée ou tout simplement la flottabilité

5.2. Stabilité initiale d'un bateau :

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 nouveaux règlements 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.

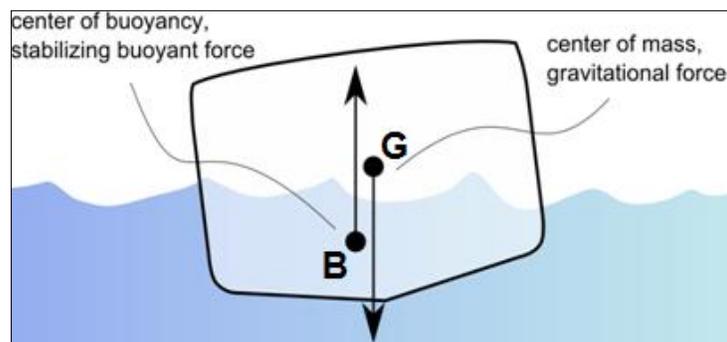


Figure 2. 14 – Stabilité d'un bateau, centre de carène et e gravité.

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 B , dont la position est liée à la géométrie de la coque, et le centre de gravité G qui varie suivant la répartition verticale et longitudinale des masses fixes et mobiles du navire (voir Figure 2.14).

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.

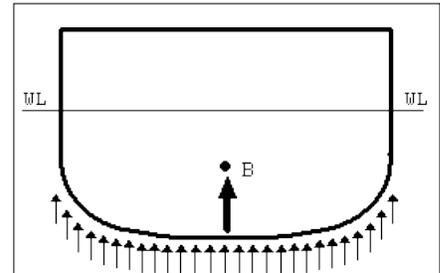


Figure 2. 15 – Centre de carène.

5.3. Centre de carène :

La carène étant la partie immergée de la coque d'un navire, le centre de carène, généralement nommé C (ou B : center of buoyancy chez les anglophones) est le centre de volume (et aussi le centre de gravité du fluide) déplacé par la carène d'un navire.

La position du centre de carène varie avec les tirants d'eau (l'enfoncement), l'assiette et la gîte (voir Figure 2.16). Lorsque le navire tangue et roule, ce point se déplace du côté où gîte le bâtiment (puisque de ce côté il y a plus de coque enfoncée dans l'eau et donc plus de fluide déplacé, alors que de l'autre côté une partie de la carène se retrouve hors d'eau). L'axe d'application de la force d'Archimède se déplace donc lui aussi.

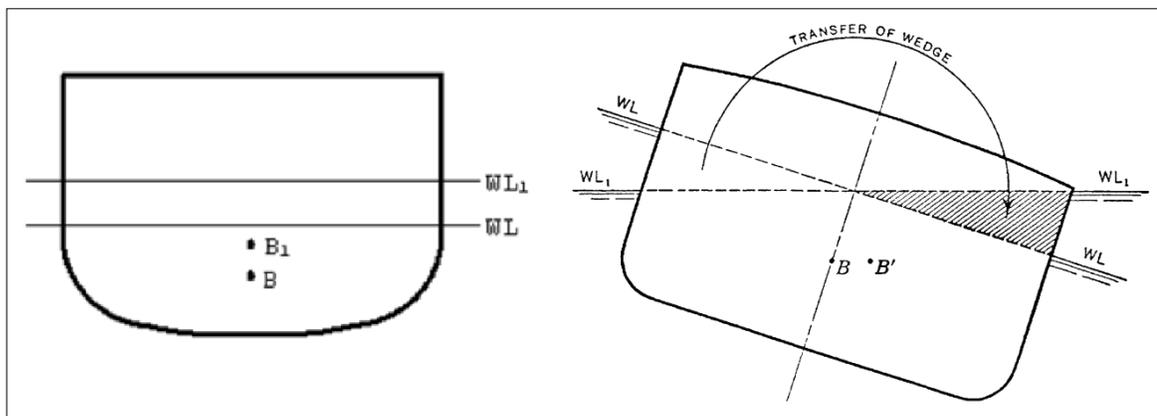


Figure 2. 16 – Déplacement du centre de carène.

5.4. Métacentre :

Pour l'équilibre du navire, ce qui importe est le métacentre de carène, qu'on définit comme l'intersection des axes d'application de la force d'Archimède pour de petites variations d'inclinaison ou autrement dit le point où la ligne verticale, passant par le centre de gravité d'un

navire, se rencontre avec la résultante de la pression latérale que l'eau exerce sur ce navire, quand il est penché de côté. En réalité ces différents axes ne se coupent pas forcément strictement mais en première approximation on peut toujours définir un métacentre de carène transversal m et un

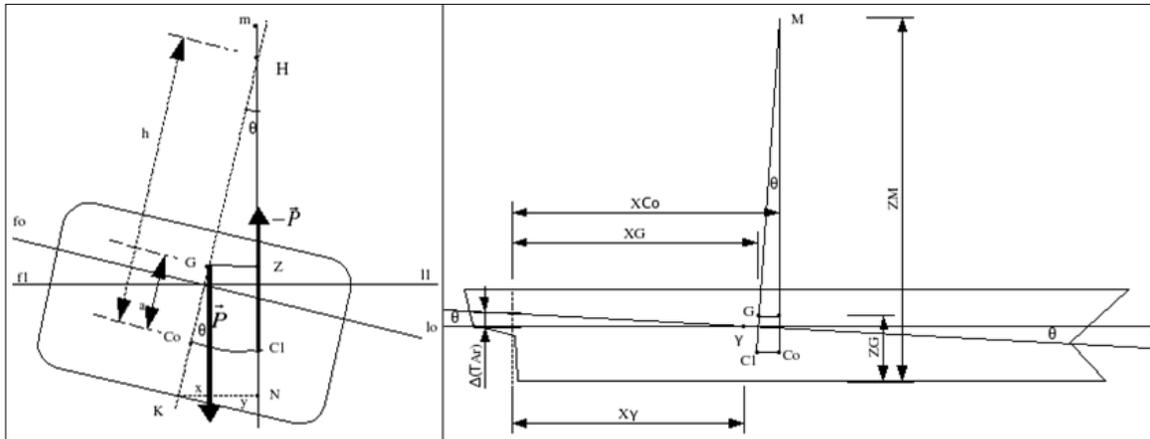


Figure 2. 17 – Métacentre.

métacentre de carène longitudinal M , pour chaque situation du navire ; ces métacentres dépendent de l'inclinaison et l'enfoncement du navire (voir Figure 2.17)

Pour qu'un navire soit stable, il suffit que le métacentre de carène soit toujours au-dessus du centre de gravité G d'un navire, alors que le centre de carène est fréquemment au-dessous de ce dernier. Plus le métacentre de carène sera haut, plus la stabilité de forme du navire sera grande.

5.5. Rayon métacentrique :

Pour une légère variation de gîte (ou d'assiette), le déplacement de la centre de carène peut être assimilé à l'arc d'un cercle dont le métacentre est le centre. Le rayon de cet arc de cercle est appelé rayon métacentrique. On distingue le rayon métacentrique transversal et le rayon métacentrique longitudinal, ce dernier a approximativement la valeur de la longueur du navire, contrairement au rayon métacentrique transversal qui a une valeur bien moindre.

Le rayon de ce cercle peut être calculé par la formule de Bouguer :

$$h = \frac{I_{\Delta}}{\nabla}$$

I_{Δ} est le moment quadratique de la surface de flottaison par rapport à son axe d'inclinaison (exprimé en m^4) et ∇ le volume de carène (exprimé en m^3).

N.B. : Le moment quadratique est une grandeur qui caractérise la géométrie d'une section et se définit par rapport à un axe ou un point. Il s'exprime dans le système international en m^4 .

Le moment quadratique est utilisé en résistance des matériaux, il est indispensable pour calculer la résistance et la déformation des poutres sollicitées en torsion (I_G) et en flexion (I_x et I_y). En effet, la résistance d'une section sollicitée selon un axe donné varie avec son moment quadratique selon cet axe.

Le moment quadratique est encore très souvent appelé moment d'inertie.

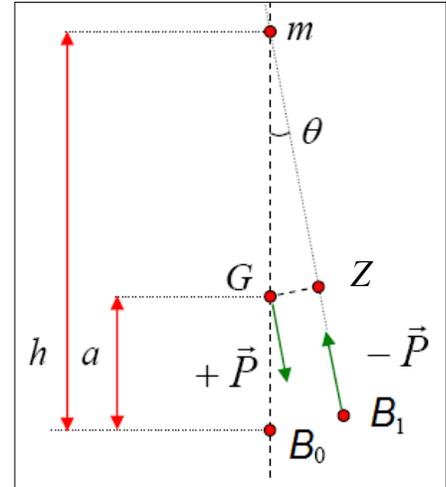


Figure 2. 18 – Couple de redressement

5.6. Couple de redressement :

Le graphique de la Figure 2.18 montre un corps flottant incliné d'un angle θ par rapport à sa position d'équilibre. On est en présence de 2 flottaisons isocarènes et le centre de carène B_0 se déplace en B_1 . Alors que le poids du navire $+P$ s'applique toujours depuis son centre de gravité G (inchangé) et de façon verticale par rapport à la nouvelle flottaison, la poussée d'Archimède $-P$ s'applique aussi verticalement mais à partir de B_1 .

Il en résulte la création d'un couple qui tend à redresser le navire et de valeur: $M = P \cdot GZ$; où la distance GZ représente le bras de levier du couple de redressement.

Dans le triangle GmZ , rectangle en Z , on a :

$$GZ = Gm \cdot \sin \theta = (h - a) \cdot \sin \theta ; \text{ D'où } M = P \cdot (h - a) \cdot \sin \theta$$

Si le métacentre m est au dessus de G , la distance $(h - a)$ est positive et le couple tend à redresser le navire. C'est un couple de redressement. Si le métacentre est en dessous de G , la distance $(h - a)$ est négative et le couple tend à aggraver la gîte. C'est un couple de chavirement.

Étant donné que le métacentre transversal a la valeur la plus faible, l'étude de la stabilité d'un navire est donc ramenée à celle de sa stabilité transversale.

Dans les calculs de stabilité initiale, nous travaillons sur des petits angles d'inclinaison ($\theta \leq 10^\circ$) pour lesquels nous admettons en première approximation que la hauteur métacentrique h est égale au rayon métacentrique r . C'est à dire que le centre de carène

B se promène sur un arc de cercle centré en m et de rayon égal au rayon métacentrique initial r .

De ce fait, le moment de redressement de notre exemple précédent peut s'écrire :

$$M = P \cdot (r - a) \cdot \sin \theta$$

Où $P \cdot (r - a)$ est appelé le module de stabilité initial transversal.

Ce couple de redressement peut être décomposé en :

- $(P \cdot r \cdot \sin \theta)$ appelé « couple de stabilité de forme ».
- $(-P \cdot a \cdot \sin \theta)$ appelé « couple de stabilité de poids ».

On voit maintenant clairement que pour un navire de poids constant P qui se trouve incliné d'un angle θ , sa stabilité dépend de deux choses :

- De la forme de la carène au niveau de la flottaison. En effet la valeur du couple de redressement dépend du rayon métacentrique r et compte tenu de la formule de Bouguer (voir section 5.5), elle dépend donc du volume de carène mais aussi de la forme de la surface de la flottaison (servant au calcul de l'inertie I_{Δ} de la surface). Plus la surface de flottaison est grande, plus le rayon métacentrique sera grand et plus le couple de redressement sera fort. Pour la même raison, quand il est impossible d'abaisser la position du centre de gravité (pour augmenter la valeur de $(r - a)$), il est malgré tout possible d'augmenter la stabilité transversale d'un navire en lui augmentant sa surface de flottaison, c'est à dire en lui pratiquant un « soufflage » de sa coque consistant (voir figure 2.19).

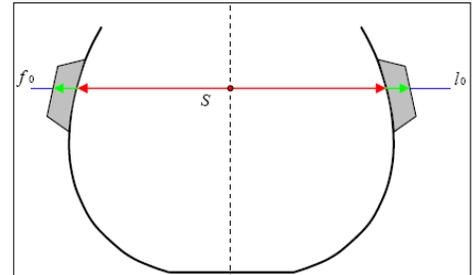


Figure 2. 19 – "Soufflage" de la coque.

- De la répartition des poids dans le navire. Plus le centre de gravité sera bas dans le fond de la cale, plus la valeur de a (distance B_0G , voir Figure 2.18) sera faible et plus le couple de redressement sera fort.

5.7. Courbe de stabilité initiale:

Il est très intéressant de connaître le module de stabilité initiale transversale $P \cdot (r - a)$ car il indique si, au repos, le navire restera droit ou non et donne une bonne idée de la stabilité en cours d'exploitation normale du navire et dans le mauvais temps, mais il est tout aussi utile de prévoir le comportement du navire soumis à un couple inclinant et de connaître sa réserve de stabilité c'est à dire sa capacité à ne pas chavirer.

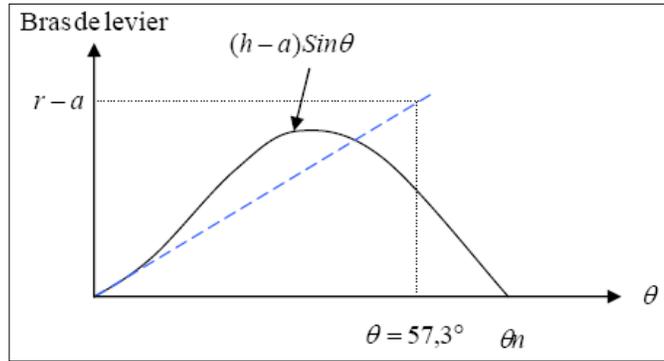


Figure 2. 20 – Courbe de stabilité.

Dans ce contexte de fortes inclinaisons, on ne peut plus assimiler le rayon métacentrique h comme étant égal à r comme on l'a fait jusqu'à maintenant pour les faibles inclinaisons. A ces inclinaisons importantes, la courbe C sur laquelle se déplace le centre de carène B n'est plus un arc de cercle de rayon r (voir Figure 2.20). Les valeurs de h et de a étant fonction de l'angle d'inclinaison et obéissant à des fonctions compliquées, la meilleure méthode de connaître ces éléments est la méthode graphique.

La courbe de stabilité est la représentation graphique du couple de redressement $P \cdot (r - a) \cdot \sin \theta$ en fonction de l'angle d'inclinaison θ pour un déplacement donné et une position donnée du centre de gravité.

Pour la tracer, il faut disposer des valeurs suivantes :

- La position du centre de carène B .
- La position du métacentre m .

Pour le navire à l'état initial, sans gîte, ces valeurs sont données dans les tables

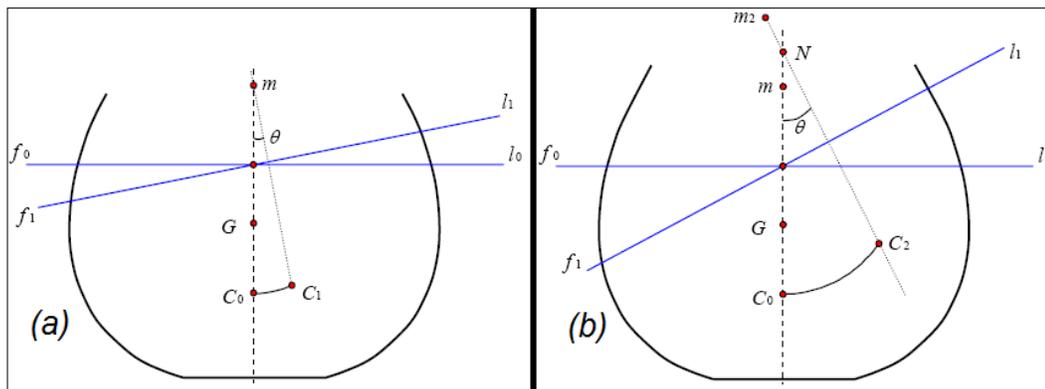


Figure 2. 21 – Inclinaison d'un bateau a) faible, b) forte.

hydrostatiques. On obtient alors la valeur de $r - a$ (distance Gm de la Figure 2.18 ; pour $\theta = 0^\circ$) qui nous donnera la pente initiale de la courbe (voir Figure 2.21).

Étant donné que le point métacentrique et le centre de carène se déplacent avec l'inclinaison. Pour le calcul de $(h - a)$ à différentes valeurs de θ , on utilise généralement les courbes pantocarènes (KN curves). Qui donnent, en fonction du déplacement du navire, la valeur KN , pour différents angles d'inclinaison. Un exemple de courbes pantocarènes est donné (voir Figure 2.22).

Cette valeur KN est parfois appelée « Bras de levier de redressement pour une côte nulle du centre de gravité ».

Dans la Figure 2.21, le bras de levier qui nous intéresse pour tracer la courbe de stabilité est la valeur de : $GZ = (h - a) \sin \theta$. Ici on a $GZ = KN - x$; où $x = KG \cdot \sin \theta$

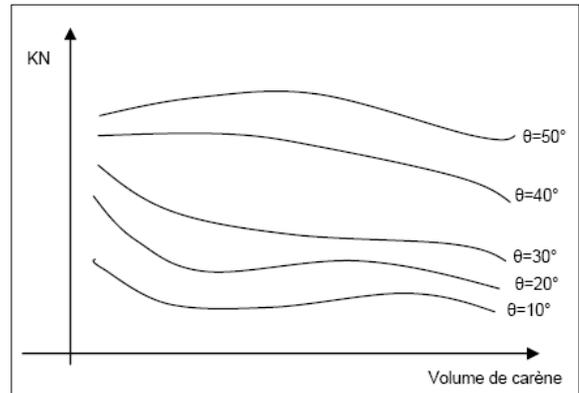


Figure 2. 22 – Courbes pantocarènes.

Sur la Figure 2.21, pour l'angle d'inclinaison de 1 radian ($57,3^\circ$) en abscisse, on porte la valeur initiale du bras de levier ($r - a$) pour une inclinaison nulle calculée plus haut. On porte ensuite aux différents angles les valeurs de GZ . La courbe à son départ, tangente la droite tracée en premier.

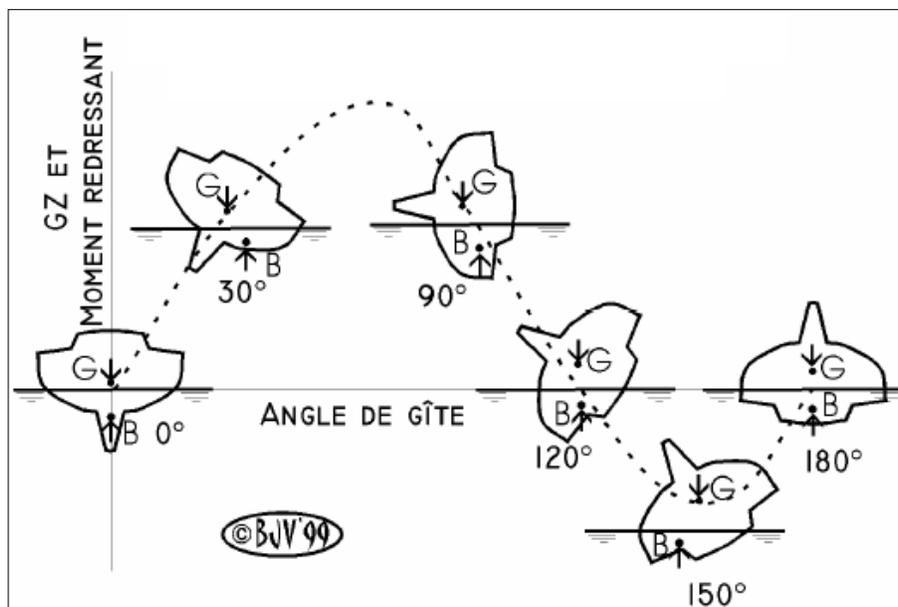


Figure 2. 23 – Courbe de stabilité.

Pour un navire ayant une bonne stabilité, quand il s'incline, sa surface de flottaison augmente, donc l'inertie de cette surface augmente (voir formule de Bouguer), donc le métacentre s'élève et la distance $h - a$ augmente car le point G est fixe. Le bras de levier GZ augmente donc. Le maximum est atteint quand le pont du navire commence juste à être immergé ou que le bouchain découvre. Au-delà de cette inclinaison, la surface de flottaison diminue fortement. La courbe recoupe l'axe des abscisses à la valeur θ_n , qui est l'angle de chavirement. A cette position, on est en équilibre instable. Au-delà, le bras de levier est négatif, on a un couple non plus de redressement, mais de chavirement. Le navire chavire et rejoint sa position d'équilibre, quille en l'air (voir Figure 2.23).

5.8. Réserve de stabilité: (Réf. 1)

L'aire sous la courbe, entre un angle θ_1 et un angle θ_2 est proportionnelle au travail nécessaire pour incliner le navire de θ_1 à θ_2 . Il en résulte que l'étude de la répartition de cette aire permet d'évaluer la capacité de redressement du navire. L'aire totale sous la courbe de stabilité est la réserve de stabilité.

D'une façon générale, plus la réserve de stabilité est importante d'une part, et plus l'angle critique de chavirement statique est grand d'autre part, meilleure sera la stabilité; sans oublier toutefois que l'aire utile sous la courbe est limitée à l'angle d'inclinaison qui produit l'envahissement par une quelconque ouverture. Pratiquement, ces deux paramètres caractéristiques seront d'autant plus grands que le franc-bord du navire sera important.

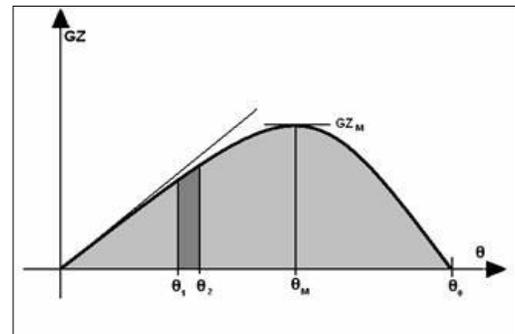


Figure 2. 24 – Réserve de stabilité.

Interprétation de la courbe de stabilité:

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

- 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.

5.9. Formules approximatives de la stabilité initiale: (Réf. 5)

Pour satisfaire la diversité des demandes formulées sur la stabilité, il est important de trouver dès le départ une base qui permet une évaluation continue des conditions de stabilité à chaque phase de la conception.

La valeur \overline{KM} peut être exprimée en fonction de B/T et la valeur \overline{KG} en fonction de B/D .

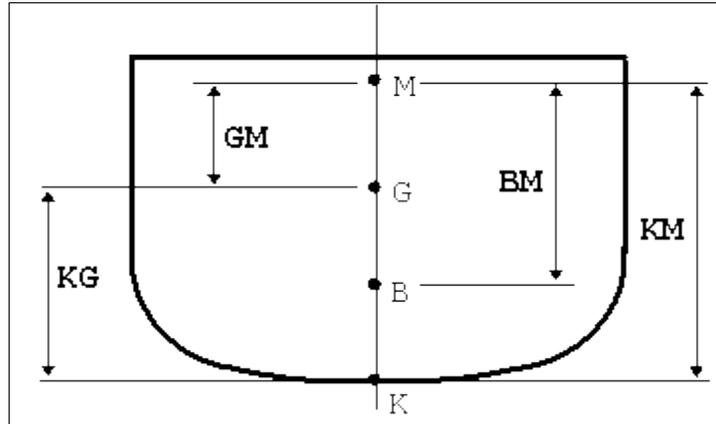


Figure 2. 25 –Distances entre les différents centres.

La hauteur métacentrique est généralement exprimée par la somme de trois termes (voir Figure 2.25) :

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}$$

Des formules approximatives pour \overline{KB} et \overline{BM} peuvent être exprimées en fonction des dimensions principales.

- Hauteur du centre de carène au dessus de la quille:

$$\overline{KB} = T \left(2.5 - \frac{C_B}{C_{WP}} \right) / 3 : \text{Moorish / Normand; formule recommandées pour } C_M \leq 0.9.$$

$$\overline{KB} = T / \left(1 + \frac{C_B}{C_{WP}} \right) : \text{Posdumine et Lackenby; formule recommandées pour } C_M > 0.9.$$

Des formules dérivées sont les suivants :

$$\overline{KB} = T(0.9 - 0.36 \cdot C_M) \quad : \text{Normand.}$$

$$\overline{KB} = T(0.9 - 0.3 \cdot C_M - 0.1 \cdot C_B) \quad : \text{Schneekluth.}$$

$$\overline{KB} = T \left(0.78 - 0.285 \cdot \frac{C_B}{C_{WP}} \right) \quad : \text{Wobig.}$$

- Hauteur du métacentre au dessus du centre de carène (Rayon métacentrique):

L'équation approximative se dérive de l'équation $\overline{BM} = I_T / \nabla$, où le moment d'inertie transversale du plan d'eau est exprimé comme le moment d'inertie d'un rectangle circonscrit $L \cdot B^3 / 12$ multiplié par un facteur de réduction. Ce facteur de réduction est exprimé comme une fonction de C_{WP} :

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla} = \frac{f(C_{WP}) \cdot L \cdot B^3}{12 \cdot L \cdot B \cdot T \cdot C_B} = \frac{f(C_{WP})}{12} \cdot \frac{B^2}{T \cdot C_B}$$

Les équations d'estimation du facteur de réduction $f(C_{WP})$ sont les suivantes:

$$f(C_{WP}) = 1.5 \cdot C_{WP} - 0.5 \quad : \text{Murray (plan de flottation trapézoïdale)}$$

$$f(C_{WP}) = 1.04 \cdot C_{WP}^2 \quad : \text{N.N ; McClogh}$$

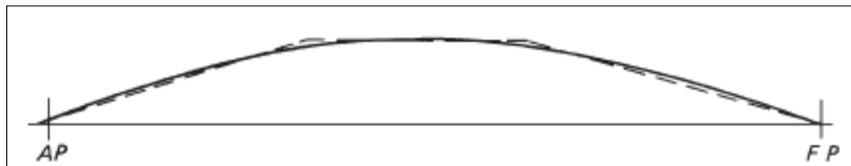


Figure 2. 26 - Comparaison d'un plan de flottation avec un trapézoïde de la même section.

- Hauteur du métacentre au dessus de la quille:

$$\overline{KM} = B \cdot \left(13.61 - 45.4 \frac{C_B}{C_{WP}} + 52.17 \left(\frac{C_B}{C_{WP}} \right)^2 - 19.88 \left(\frac{C_B}{C_{WP}} \right)^3 \right)$$

Cette formule est applicable pour $0.73 < C_B / C_{WP} < 0.95$

Une autre formule (Schneekluth) dérivée par combinaison des formules approximatives de \overline{KB} et \overline{BM} :

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = T(0.9 - 0.3 \cdot C_M - 0.1 \cdot C_B) + \frac{(1.5 \cdot C_{WP} - 0.5)B^2}{12 \cdot T \cdot C_B}$$

En supposant que : $C_{WP} = (1 + 2 C_B / \sqrt{C_M}) / 3$; la formule de Murray sera $\overline{BM} = 0.0834B(B/T) / \sqrt{C_M}$. Étant donné que la formule de Murray peut être appliquée exactement pour le plan de flottation trapézoïdale (voir Figure 2.26), la valeur doit être

réduite pour le plan de flottation normal. Le constant sera 0.08. Donc la formule peut être écrite sous la forme suivante:

$$\overline{KM} = B \cdot \left(\frac{0.08}{\sqrt{C_M}} \cdot \frac{B}{T} \cdot C + \frac{0.9 - 0.3 \cdot C_M - 0.1 \cdot C_B}{B/T} \right)$$

5.10. Stabilité longitudinale : (Réf. 1)

Les principes en jeu sont les mêmes que ceux de la stabilité transversale, mais pour les inclinaisons longitudinale la stabilité dépend de la distance entre le centre de gravité et le métacentre longitudinal. Dans ce cas, la distance entre le centre de carène et le métacentre longitudinal sera gérée par le second moment de la plane de flottation autour d'un axe transversal passant par son barycentre. Pour les formes normales d'un navire, cette quantité est plusieurs fois la valeur du second moment de la section autour la ligne médiane.

Puisque \overline{BM}_L est obtenu en divisant le même volume de déplacement que pour la stabilité transversale, il sera important par rapport à \overline{BM} et souvent proportionnel à la longueur du navire.

$$\overline{KM}_L = \overline{KB} + \overline{BM}_L = \overline{KB} + I_L / \nabla$$

Où I_L est le second moment de la section du plan de flottation autour de l'axe transversal passant par son barycentre, centre de carène.

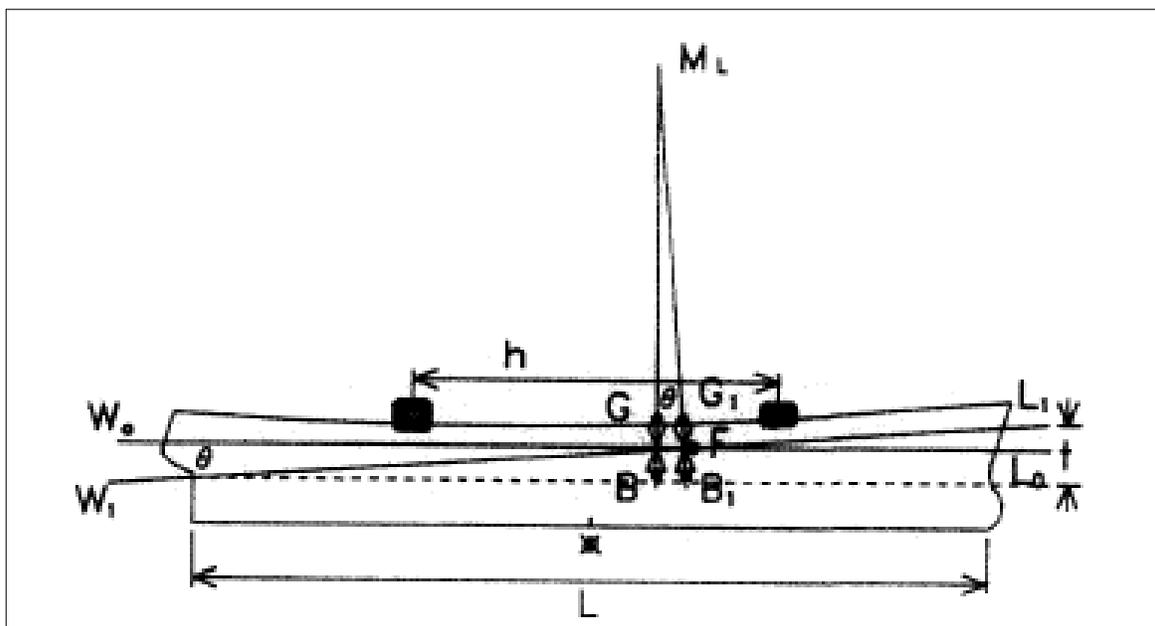


Figure 2. 27 –Stabilité longitudinale.

Si le navire dans la Figure 2.27 est incliné longitudinalement (trimé) par le déplacement d'un poids w , de sa position initiale à un nouvel emplacement h avant, le moment de coupe sera $w \cdot h$. Cela entraînera de déplacer le centre de gravité du navire de G à G_1 et le navire sera assiette causant B de déplacer à B_1 , tels que:

$$\overline{GG_1} = w \cdot h/W$$

Où W est la masse totale du navire et B_1 est verticalement au dessous de G_1 .

L'assiette est la différence de tirants d'eau avant et arrière. Le changement d'angle d'assiette peut être considéré comme la variation de cette différence divisée par la distance longitudinale entre les points où les tirants d'eau sont mesurés. D'après la Figure 2.27:

$$\tan \theta = t/L = \overline{GG_1}/\overline{GM_L} = w \cdot h/W \cdot \overline{GM_L}$$

D'où: $w \cdot h = t \cdot W \cdot \overline{GM_L}/L$

C'est le moment qui cause une assiette t , donc le moment qui provoque un changement d'une unité d'assiette est: $W \cdot \overline{GM_L}/L$

Ce moment de changement d'assiette d'une unité est une figure pratique de citer pour montrer la facilité avec laquelle un navire est trimé. Cela peut être une quantité relativement importante et il peut être préférable de travailler avec le « moment pour trimer un centimètre ou MTC », qui serait $W \cdot \overline{GM_L}/100 \cdot L$

Empiriquement, la plupart des petits bateaux de construction normale ont un $\overline{GM_L}$ proche de leur LWL (longueur à la ligne de flottaison). Pour ces bateaux, on pourra donc admettre que: $MTC = \Delta/100$

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)

$$TPC = (A_W \cdot \rho_{eau\ de\ mer})/100$$

- Centre de carène longitudinal:

Le centre de carène longitudinal LCB affecte la résistance à l'assiette du navire. LCB est la distance entre le début de la ligne de flottaison et le centre du volume de déplacement. Cette position optimale est habituellement décrite en termes d'une bande relativement large et en fonction du coefficient de bloc C_b et le nombre de Froude. En général, LCB sera déplacé vers l'arrière avec la vitesse et le nombre de Froude de la conception des navires. Que le navire devienne plus rapide par sa longueur, la proue doit être carénée pour atteindre la résistance de vague acceptable, ce qui entraîne un mouvement de LCB vers l'arrière à travers le milieu du bateau. À des vitesses encore plus élevées, la proue doit être encore plus carénée résultant une LCB à l'arrière du milieu du navire.

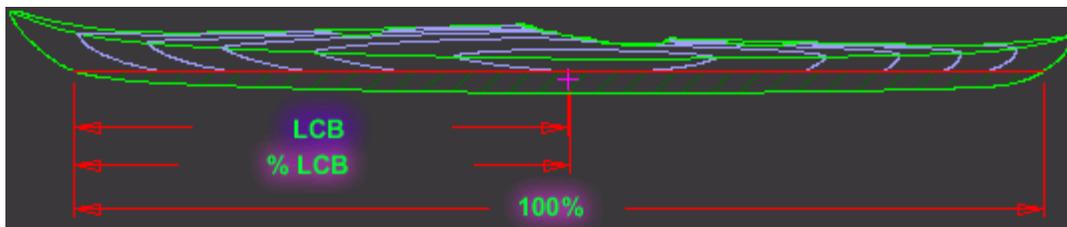


Figure 2. 28 – Centre de carène longitudinal.

Harvard (Réf. 5):

$$LCB = 9.70 - 45 \cdot F_n \pm 0.8$$

Schneekluth and Bestram (Réf. 5) :

$$LCB = 8.80 - 38.9 \cdot F_n$$

$$LCB = -13.50 - 19.4 \cdot C_p$$

Là LCB est estimé en pourcentage de longueur, en avant positif du milieu du navire.

5.11. Stabilité dynamique: (Réf. 7)

Jusqu'à présent la stabilité a été considérée comme un problème statique. En réalité, il est un processus dynamique. Un pas dans l'examen dynamique de la stabilité est d'étudier ce qui est connu sous le nom de la stabilité dynamique d'un navire.

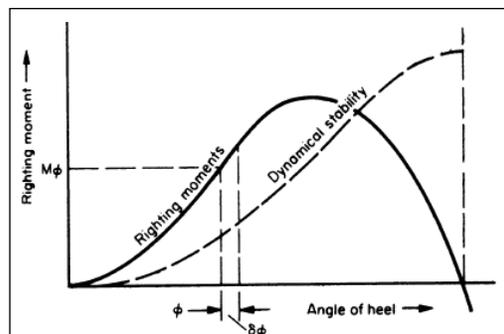


Figure 2. 29 – Courbes des moments de redressement.

La stabilité dynamique d'un navire à un angle de gîte donné est définie comme le travail effectué pour l'inclinaison du navire à cet angle d'une façon très lentement et à déplacement constant, c'est à dire sans tenir compte du travail effectués contre la résistance de l'air ou l'eau.

Considérons un navire avec une courbe du moment de redressement comme le montre dans la Figure 2.29. Le moment de redressement à un angle de gîte ϕ est M_ϕ . Puis, le travail effectué pour d'inclinaison du navire d'un petit angle additionnel δ_ϕ est donnée approximativement par $M_\phi \cdot \delta_\phi$

Par conséquent, le travail total de l'inclinaison transversale à un angle ϕ est :

$$\int_0^\phi M_\phi \cdot \delta_\phi = \int_0^\phi \Delta \overline{GZ}_\phi \cdot \delta_\phi$$

La stabilité dynamique à n'importe quel angle, donc, est proportionnelle à l'aire sous la courbe de stabilité statique jusqu'à cet angle. Faisant référence la Figure 2.30 ci-dessous, d'après le déplacement du point B au point B_1 lorsque le navire est incliné, la séparation vertical sera $\overline{B_1Z_1} - \overline{BG}$. D'ou la stabilité dynamique à un angle de gîte ϕ est donnée par: $\Delta(\overline{B_1Z_1} - \overline{BG})$.

$$\overline{B_1Z_1} = \overline{B_1R} + \overline{BG} \cdot \cos \phi = \frac{\nu(b_1h_1 + b_2h_2)}{\nabla} + \overline{BG} \cdot \cos \phi$$

Où ν est le volume de la cale immergé ou émergé (immersed or emerged wedge), que leurs centres du volume au b_1 et b_2 et soit h_1 et h_2 sont les pieds de perpendiculaires passées de b_1 et b_2 à ligne de flottation W_1L_1 (voir Figure 2.30).

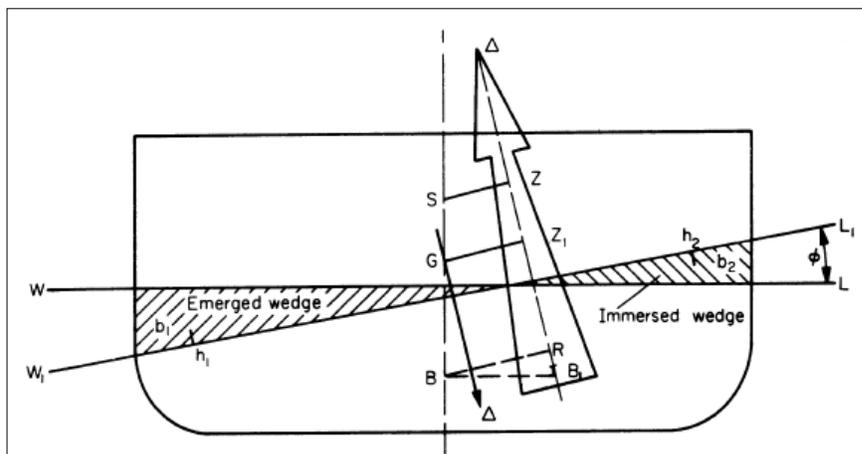


Figure 2. 30 –Stabilité dynamique.

La stabilité dynamique sera donnée par la formule de Moseley:

$$\Delta \left[\frac{v(b_1 h_1 + b_2 h_2)}{\nabla} - \overline{BG}(1 - \cos \phi) \right]$$

De même, cette expression peut être évaluée pour une série d'angles de gîte, et la courbe de stabilité dynamique sera établie.

5.12. Évaluation de la stabilité: (Réf. 7)

Après avoir montré comment la stabilité d'un navire peut être défini et calculé, il reste à discuter de la norme actuelle de la stabilité à viser pour tel ou tel navire, en compte tenu de son utilisation prévue. Pour les navires classiques, la stabilité longitudinale est toujours élevée et n'est pas nécessaire d'être considérées là.

Quel degré de stabilité statique simple est requis? Même si un navire a une stabilité positive dans la position droite, elle ne restera pas droit en raison des petites forces; du vent, de mer, ou des mouvements à bord du navire; le troubleront. Même si le navire ne fait pas réellement chavirer, il serait désagréable d'être dans un navire qui se prélassait sur un côté ou l'autre de la droite. Donc le besoin de stabilité résulte de la volonté d'avoir un flottement droit du navire. Même si, en théorie, une très petite hauteur métacentrique serait suffisante dans ce but, il doit être adéquates de couvrir toutes les conditions de chargement du navire.

Ensuite, il est nécessaire d'examiner les circonstances pendant la durée de vie du navire qui le feront gîter. Il s'agit notamment de:

- a) l'action du vent, qui sera le plus prononcé dans les navires de franc-bord élevé ou grande superstructure et l'action des vagues dans le roulement du navire;
- b) L'inclinaison générée par un virage à grande vitesse.
- c) la foule des passagers sur un côté.

5.13. Stabilité dynamique due aux efforts externes: (Réf. 7)

La stabilité dynamique est la capacité du navire de résister contre les forces d'inclinaison externes. 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. Les courbes du moment d'inclinaison peuvent être projetées sur la courbe GZ pour déterminer la valeur limite du vent et de mer que le navire peut supporter. Le courbe du vent est très semblable au courbe de la correction du cosinus parce que la surface du navire diminue lorsque le navire s'incline (voir Figure 2.31).

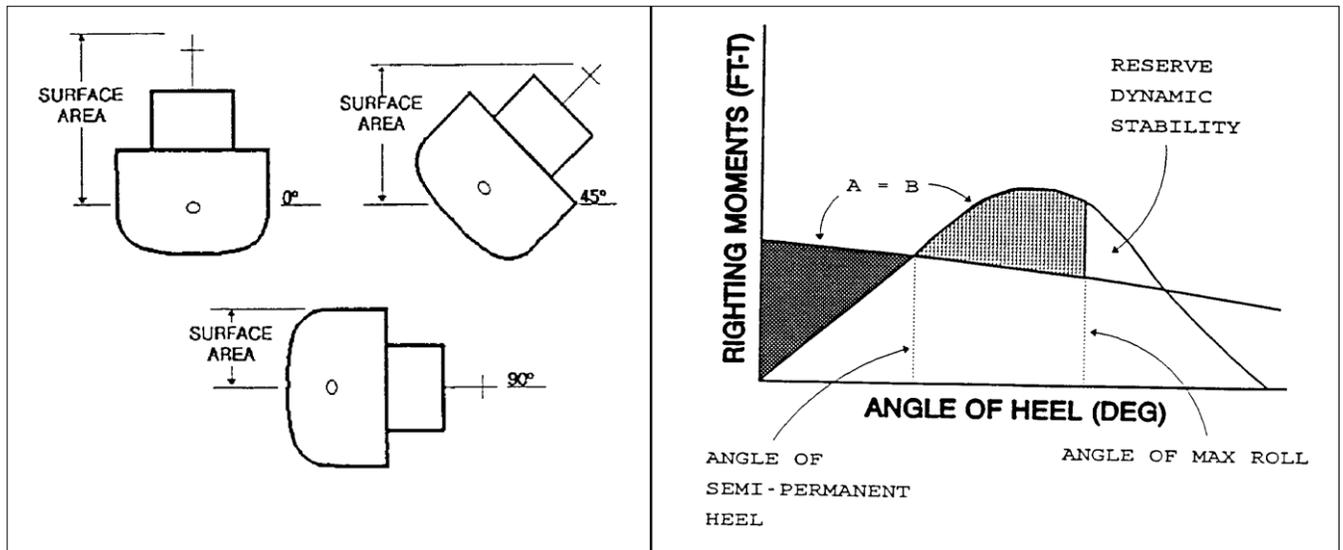


Figure 2. 31 – Stabilité dynamique.

- Angle de gîte statique (Angle of semi-permanent heel):
- Angle max. de roulis (Angle of max roll):
- Surface A:
- Surface B:
- Réserve de la stabilité dynamique (Reserve dynamic stability):

Angle d'où le navire fera gîter avec un effort externe constant

Le plus grand angle à laquelle le navire fera rouler dans le cas d'un vent instantané.

Région où le moment d'inclinaison est plus grand que le moment de redressement. (L'énergie que l'effort externe a, mais le navire n'a pas).

Région où le moment de redressement est plus grand que le moment d'inclinaison. (L'énergie que le navire a, mais l'effort externe n'a pas).

L'énergie de redressement qui permet au navire de résister à tout moment d'inclinaison additionnelle.

Quand un navire est exposé à des moments d'inclinaison, il s'incline. Si l'énergie d'inclinaison est impartie instantanément, le navire doit être capable à surmonter cette énergie ou il chavire. Le navire sera incliné à l'angle de roulis maximum, puis reporte lui-même à l'endroit où le moment de redressement est égal au moment d'inclinaison ($A=B$). Si le moment d'inclinaison reste constant, le navire reste à l'angle de statique de gîte. La réserve dynamique de la stabilité est le reste de redressement de l'énergie qui permet au navire de supporter les forces additionnelles d'inclinaison.

- Effet du vent et de roulement:

En cas du vent la force générée au dessus de la surface d'eau du navire est résistée par la force hydrodynamique produit par le mouvement lent de côté du navire à travers l'eau. La force du vent peut être prise pour agir dans le barycentre de la zone au-dessus de l'eau et la force hydrodynamique comme agissant en moitié du tirant d'eau (voir Figure 2.32).

Une formule simple sert à calculer le bras d'inclinaison dû au vent est:

$$\text{Bras d'inclinaison (m)} = 0.17 \cdot 10^{-6} \frac{A \cdot V_w^2 \cdot H}{\Delta} \cos^2 \phi$$

Où V_w signifie la viscosité nominal du vent (en Knots ; prise comme 100 Knots); A est la surface projetée du navire au dessus de la ligne de flottation (en m^2); H est le bras du levier de la moitié du tirant d'eau au centre de la surface projetée (en m) et Δ le déplacement (en MN).

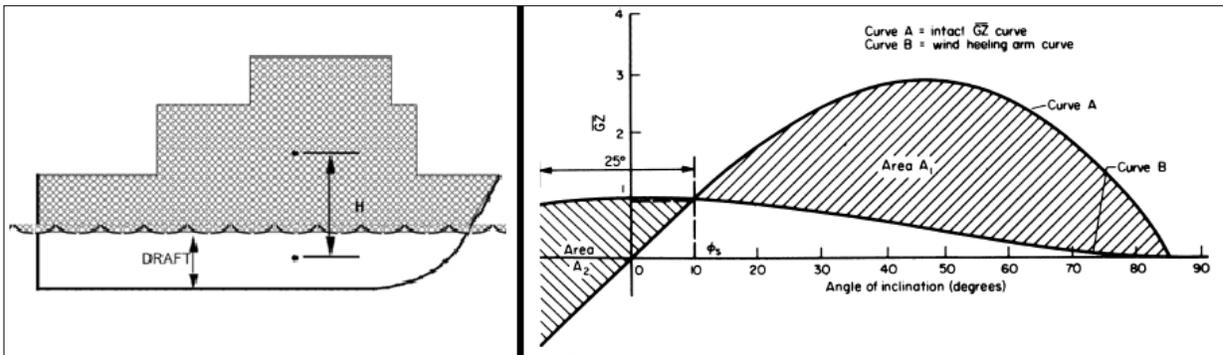


Figure 2. 32 – Effet du vent.

Dans ce cas les critères de stabilité sont:

- Le bras d'inclinaison \overline{GZ}_s au point d'intersection de deux courbes c.à.d. à l'angle ϕ_s doit être pas plus que 60% de \overline{GZ}_{max} .
- La surface A_1 (l'énergie en excès de redressement) doit être plus petite que 140 % de A_2 (l'excédent d'énergie de gîte dû au rouleur de 25 degrés contre le vent).

- Angle d'inclinaison due au virage:

Quand un navire fait un virage sous l'action de son gouvernail, le gouvernail de direction détient la coque à un angle d'attaque relatif à la direction de l'avance. La force hydrodynamique sur la coque, due à cet angle, agit en direction du centre du cercle de virage que le navire fait (voir Figure 2. 32).

La formule qui sert à calculer le bras d'inclinaison dû au virage est:

$$\text{Bras d'inclinaison (m)} = \frac{V_s^2 \cdot \overline{GL}}{g \cdot R_T} \cos \phi$$

Où V_s signifie la vitesse du navire (en m/sec); R_T est le rayon de virage (en m); \overline{GL} est le bras du levier de la moitié du tirant d'eau au centre de gravité du volume au dessus de la ligne de flottation (en m) et g est l'accélération due à la pesanteur (en m/s^2).

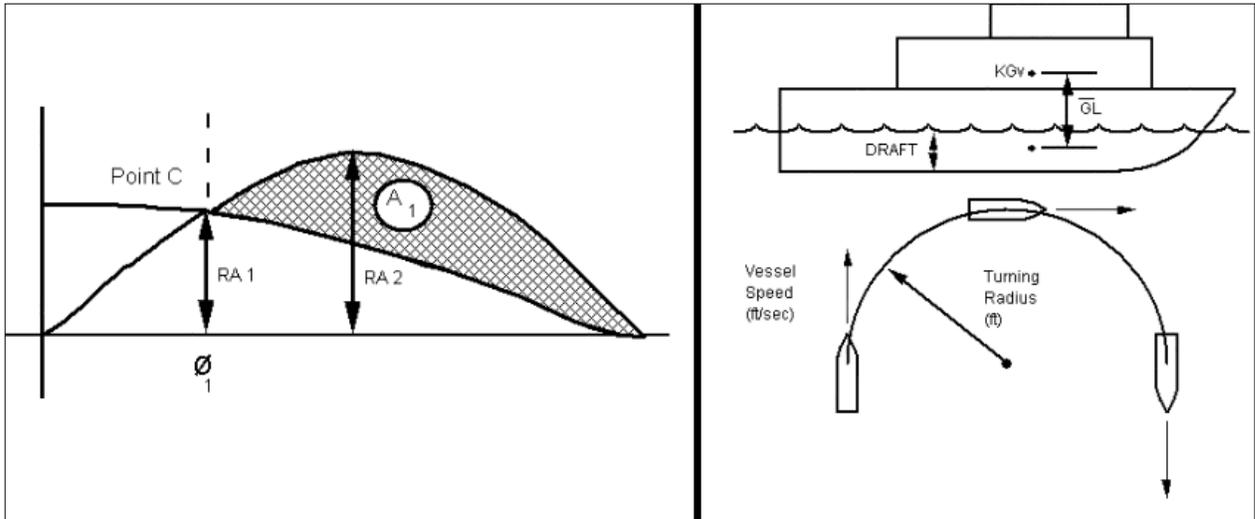


Figure 2.33 – Effet du virage.

Dans ce cas les critères de stabilité sont:

- l'angle de gîte statique $\phi_1 < 10^\circ$.
- Le bras d'inclinaison RA_1 au point d'intersection de deux courbes c.à.d. a l'angle ϕ_1 doit être pas plus que 60% de \overline{GZ}_{max} .

- o Angle d'inclinaison due à la foule des passagers sur une côté:

La courbe du bras est superposée sur la courbe de stabilité statique. Le bras d'inclinaison étant considéré comme:

$$\frac{W \cdot D}{\Delta} \cos \phi$$

Où W est la masse des passagers, D est la distance de l'axe centrale du navire au centre de gravité des passagers et Δ le déplacement, compris la masse de passagers.

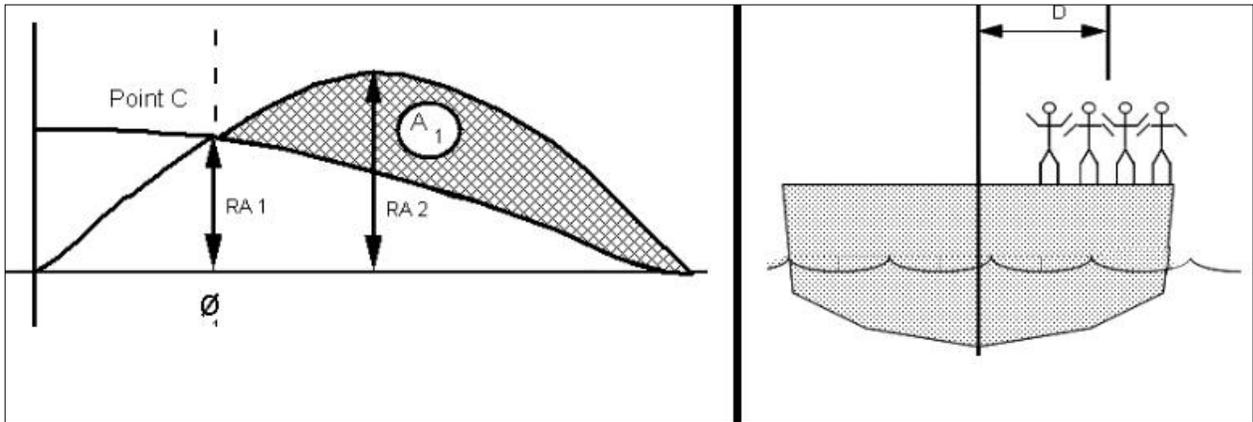


Figure 2. 34- Effet de la foule des passagers sur une coté.

Les critères de stabilité sont:

- l'angle de gîte statique $\theta_s < 15^\circ$.
- La surface A_1 (l'énergie en excès de redressement) doit être plus petite que 40 % de A_2 (Energie total de redressement).
- Le bras d'inclinaison \overline{GZ}_s au point d'intersection de deux courbes doit être pas plus que 60% de \overline{GZ}_{max} .

Conclusion:

Le chapitre 2 nous aide à avoir la capacité de comprendre les règles principales utilisées dans l'architecture navale et de bien savoir les différentes caractéristiques et méthodes des calculs qui servent à expliquer tous les parties principales d'interprétation de la forme d'un bateau et de d'une coque.

Après l'explication nécessaire sur la partie le plus importante qui est la coque, nous allons présenter ; dans le chapitre suivant; le système de propulsion mécanique grâce a lequel le bateau peut avoir l'énergie nécessaire pour se déplacer par une vitesse et puissance désirée, les différents éléments et caractéristique de ce système seront explique dans le chapitre 3.