

BREVE APPROCHE DE CALCULS DE CARÈNES ET STABILITE

Résumé à l'attention des constructeurs de bateaux

00. Introduction.

01. Flottabilité.

02. Calcul du volume.

- 02.1 Choix des couples
- 02.2 Surface des couples
- 02.3 Courbe des aires des couples
- 02.4 Calcul du volume de carène
- 02.5 Centre de poussée
- 02.6 Echelle de déplacement
- 02.7 Centre de carène (ou de poussée)
- 02.8 Surface et centre du plan de dérive
- 02.9 Surface mouillée de la carène

03 Calculs des carènes inclinées

- 03.1 Notion d'équilibre
- 03.2 Carène inclinée

04 Métacentre

- 04.1 Hauteur métacentrique
- 04.2 Couple de redressement
- 04.3 Couple inclinant

05 Moment d'inertie de la flottaison

- 05.1 Période de roulis
- 05.2 Calcul de l'inertie de la flottaison « I » par les trapèzes
- 05.3 Calcul de l'inertie de la flottaison « I » par Simpson
- 05.4 Calcul de la stabilité initiale
- 05.5 Expérience d'inclinaison
- 05.6 Stabilité longitudinale

06 Stabilité dynamique

07 Flottabilité, stabilité, franc-bord

- 07.1 "bateaux de plaisance".
- 07.2 "bateaux de sport"

08 Envahissement

00. Introduction.

Les calculs des carènes ont pour but de déterminer, d'après les plans de forme, les caractéristiques d'une coque, tels le déplacement, la position du centre de poussée, ainsi que les moments de redressement à diverses inclinaisons, jusqu'au chavirement.

Les méthodes proposées ici aux constructeurs de bateaux ne nécessitent pas de connaissances mathématiques particulières.

01. Flottabilité.

La qualité élémentaire d'un bateau est de flotter.

Nous connaissons le théorème d'Archimède qui se résume en une phrase célèbre :

« Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, passant par le centre de gravité du volume immergé et égale au poids du volume de liquide déplacé »

On prendra en compte les éléments suivants :

- V correspond au volume immergé de la carène, exprimé en m³ ou en dm³.
- Δ désigne le poids du volume d'eau V en tonnes (ou en kilos), on parle du "déplacement" d'un navire.
- P indique le poids du bateau en tonnes ou en kilos
- d est la densité de l'eau (de 1.00 pour l'eau douce à 1.026 pour l'eau de mer).

Pour qu'un bateau flotte, nous avons la relation suivante :

$$P = \Delta = V * d$$

Cette équation étant impérative, le constructeur doit vérifier que le déplacement de la carène correspond au poids prévu du bateau, en conditions d'utilisation. En effet, le poids du bateau agit verticalement de haut en bas au centre de gravité "G" du navire, alors que la flottaison est donnée par une force égale et opposée, passant par le centre de flottabilité "B" de la carène.

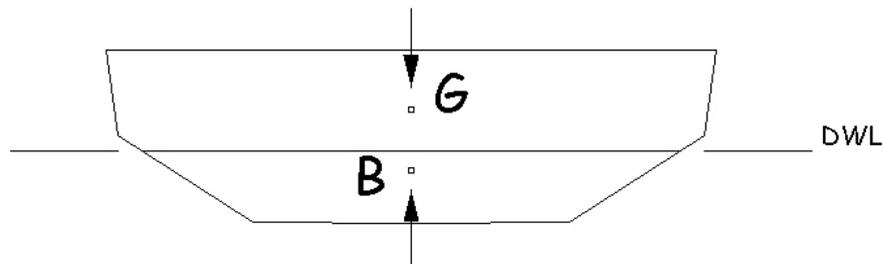


Fig 1

02. Calcul du volume.

Les calculs de carène commencent logiquement par la détermination du volume V de la partie sous-marine du bateau, soit le volume situé en dessous de la flottaison dessinée.

La forme de la carène d'un bateau évolue de l'avant vers l'arrière, suivant les choix et décisions du dessinateur.

Le volume d'une carène peut être comparé à la surface d'un couple moyen (fictif), multipliée par la longueur de la flottaison.

Le calcul du volume consistera ainsi à définir la valeur de ce couple moyen.

Pour ce faire, il faudra commencer par déterminer la valeur de la surface de chacun des couples tels que définis ci-dessous :

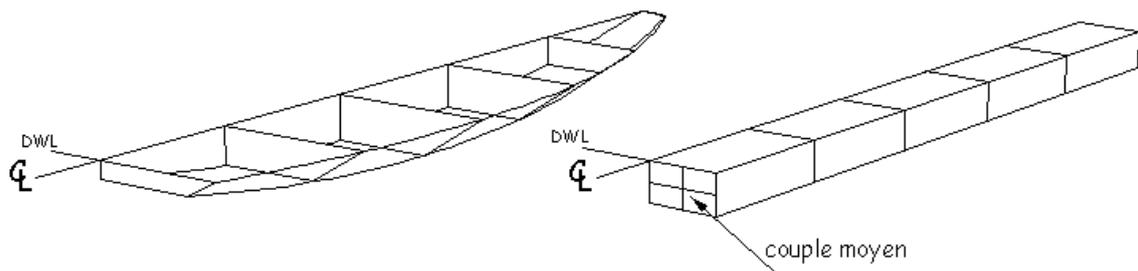
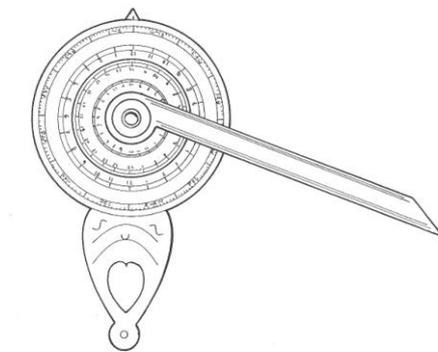


Fig. 2



nocturlabe, un instrument ancien pour mesurer l'heure de la nuit

02.1 Choix des couples

Dans toutes les méthodes, il y a tout d'abord nécessité de diviser la longueur de la carène du bateau en un certain nombre de couples, tous équidistants.

Pour appliquer une formule simple, on choisira un nombre impair de couples, donc un nombre pair d'espacements. Il sera également judicieux de placer un couple à chaque extrémité de la longueur de la flottaison. Plus on aura de couples, plus le calcul sera précis.

Dans la pratique on prendra un minimum de onze couples, si possible le double, voire plus, selon le type, l'importance de la coque et la précision recherchée.

Il est également possible d'améliorer la précision en incluant aux extrémités des demi-espacements entre les couples, méthode non développée ici.

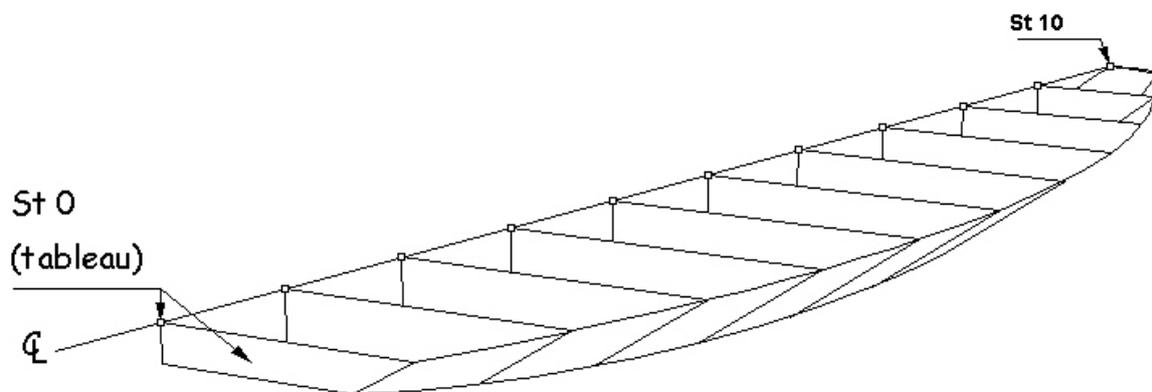


Fig. 3

Dans certains plans, généralement anciens, les couples ne sont pas forcément avec des espacements équidistants, mais avec des couples correspondant par exemple à la position des membrures. On ne pourra pas utiliser les formules de calculs mentionnées plus loin avec de tels plans.

Reste la possibilité de redessiner les vues, si l'on veut ou doit avoir accès aux calculs de stabilité usuels.

02.2 Surface des couples

La surface d'un couple peut se déterminer au moyen d'un planimètre, par calcul, ou par un programme informatique de dessin. Il y aussi des méthodes plus simplistes, mais largement suffisantes pour une approche globale telle que le nécessite le constructeur de bateaux.

Par exemple, on peut tout simplement compter les cm^2 du plan avec du papier millimétré et les porter à l'échelle 1:1; on peut aussi découper les couples dans du papier d'un grammage connu, puis peser avec précision chaque élément pour en déterminer finalement la surface.

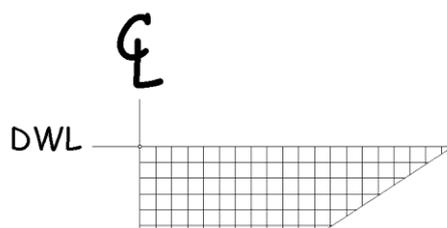


Fig. 4

On pourra également utiliser la méthode de Simpson ou celle des trapèzes (décrites plus bas), une solution d'intégration un peu plus chargée en calculs, mais qui mérite d'être connue du constructeur.

02.3 Courbe des aires des couples

Les valeurs des surfaces de tous les couples étant ainsi déterminées, on peut en faire une reproduction graphique sous forme de la courbe des aires. Cette courbe se doit d'être aussi harmonieuse que les lignes d'eau. Elle traduit en effet l'homogénéité du développement des formes de la partie sous-marine de la coque, un indice de sa facilité de pénétration dans l'eau et de sa résistance à l'avancement.

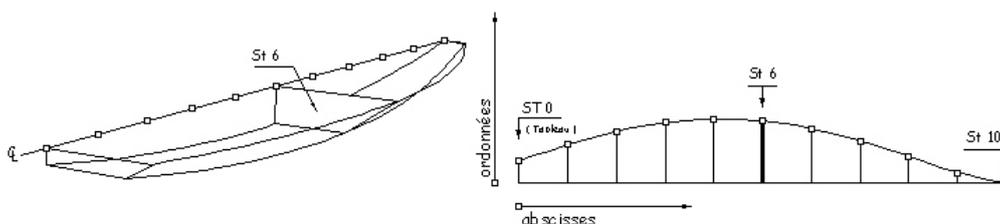


Fig. 5

Pour la surface de chaque couple, on prendra une valeur linéaire correspondante, traduisant l'importance de la surface considérée.

On choisira, par exemple, un cm d'ordonnée par dm^2 . Bien entendu, plus l'échelle est grande, plus la précision est améliorée. On portera en ordonnées la valeur de la surface de chaque couple, en respectant en abscisses l'espacement de ces derniers.

Il est d'usage de tracer la courbe des aires sous le plan longitudinal, avec les courbes des diagonales.

A noter que le premier couple, comme le dernier, ont généralement une valeur de zéro, à moins que la carène ne présente une marotte et/ou un tableau arrière immergé, comme dans le cas illustré.

La courbe des aires des couples permet de déterminer également le volume de la carène, ainsi que le centre longitudinal de poussée (LCB).

02.4 Calcul du volume de carène

Pour le constructeur, il est proposé deux solutions de calcul :

- la méthode des trapèzes
- la méthode mathématique dite de Simpson

02.4.1 Méthode des trapèzes

La méthode consiste à prendre comme valeur de volume la moyenne des surfaces des couples, multipliée par la valeur de l'espacement. On remplace donc des courbes par des droites et la méthode est moins précise que celle de l'intégration. On utilise la formule suivante :

Surface = $(a/2 + b + c + \dots + y + z/2)$ * espacement standard

C'est donc l'addition de la valeur de tous les couples, avec la moitié de la valeur du premier et du dernier, le tout étant multiplié par l'espacement.

02.4.2 Méthode de Simpson

La formule de base a été proposée par le mathématicien écossais James Stirling en 1730. Dans le domaine naval, elle permet de calculer avec une bonne précision la valeur de surfaces à partir d'ordonnées. On peut aussi calculer le volume d'une carène en intégrant les éléments de la courbe des aires. Mathématiquement, on parle d'intégration.

La formule à retenir comme la première règle de Simpson utilise les facteurs multiplicatifs suivants :

1, 4, 2, 4, 2,2, 4, 2, 4, 1 cette suite de chiffres est facile à connaître par cœur.

Pour appliquer cette formule, nous avons besoin d'un nombre impair d'ordonnées, donc d'un nombre pair d'espacements qui doivent être tous égaux.

Par exemple, sur un bateau de 10 m de longueur de flottaison, 11 ordonnées (les couples) avec 10 espacements de chacun 1 m.

Pour des carènes présentant souvent de fortes courbures aux extrémités, on peut affiner l'approche en subdivisant le premier et le dernier espacement en deux demi-espacements. La formule utilisera alors les multiplicatifs suivants :

1/2, 2, 1 1/2, 4, 2, 4, 2 ... 2, 4, 2, 4, 1 1/2, 2, 1/2 (toujours avec un nombre pair d'espacements)

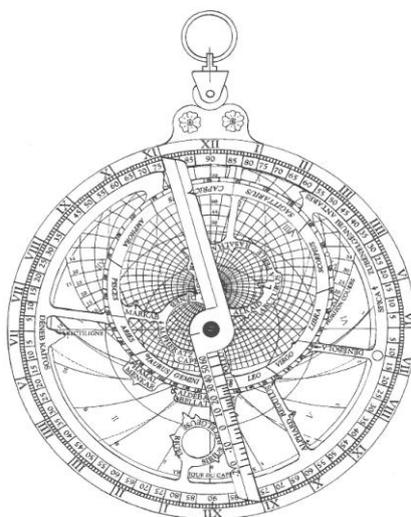
La formule SIMPSON peut se résumer ainsi :

Surface = (somme des fonctions) * 1/3 espacement, soit par exemple :

Couple no	valeur	multiplicatif	fonction
0	A	1	1*A
1	B	4	4*B
2	C	2	2*C
3	D	4	4*D
4	E	1	1*E
	SOMME DES	FONCTIONS =	TOTAL

$$\text{Surface} = \frac{\text{espacement}}{3} * \text{total fonctions}$$

La méthode SIMPSON est plus précise que celle des TRAPEZES et avec 10 espacements Simpson donne un résultat de l'ordre de 100.3%, la méthode des trapèzes 99% par rapport à la réalité (100%).



astrolabe de marine

02.5 Centre de poussée

Par un petit calcul supplémentaire, le constructeur va pouvoir déterminer le centre de poussée hydrostatique de la carène (B).

02.5.1 Dans l'axe longitudinal (X)

Pour ce faire, on procèdera au simple calcul des moments entraînés par la surface de chacun des couples, par rapport à une référence. Puis on déterminera la résultante de tous ces couples, soit le centre de gravité du volume global de la carène.

Le point de référence mentionné ci-dessus est volontiers choisi comme l'intersection de l'étrave avec la flottaison, soit le couple premier ou dernier selon l'ordre utilisé sur les plans.

Il suffit donc de multiplier la valeur de surface de chaque couple par son numéro d'attribution et on obtient le « couple moyen » correspondant à l'endroit où se situe longitudinalement le centre de poussée. Bien entendu, il s'agit d'une abscisse (X) généralement situé entre deux couples numérotés tels qu'utilisés jusqu'ici.

Exemple :

couple no.	valeur	multiplicatif	fonction	no. attribution (idem couple)	moment
0	A	1	1A	0	0 * 1A
1	B	4	4B	1	1 * 4B
2	C	2	2C	2	2 * 2C
3	D	4	4D	3	3 * 4D
4	E	1	1 ^E	4	4 * 1E
			∑ fonctions		∑ moments

$$\text{Couple moyen du centre de poussée "B"} = \frac{\sum \text{moments}}{\sum \text{fonctions}}$$

On peut également prendre comme bras de levier la distance (en mètres ou sous-multiples) par rapport à un point de référence. On obtient alors directement la distance à laquelle se trouve le centre de carène, dans le longitudinal.

Exemple :

couple no	valeur	multiplicatif	fonction	"X" du couple	moment
0	A	1	1A	X_0	$X_0 * 1A$
1	B	4	4B	X_1	$X_1 * 4B$
2	C	2	2C	X_2	$X_2 * 2C$
3	D	4	4D	X_3	$X_3 * 4D$
4	E	1	1 ^E	X_4	$X_4 * 1E$
			Σ fonctions		Σ moments

$$\text{Valeur "x" du centre de poussée "B"} = \frac{\Sigma \text{ moments "x"}}{\Sigma \text{ fonctions}}$$

Certaines approches sont faites en prenant comme référence le couple situé au milieu de la carène. Il faut alors faire attention à respecter les signes des valeurs, ces dernières étant positives ou négatives selon la position du bras de levier par rapport au couple central de référence.

Il est rappelé ici que la condition essentielle à l'équilibre stable du navire demande à ce que le centre de poussée hydrostatique se situe sur le même axe vertical que le centre de gravité du bateau.

Le centre de poussée nous indique également le lieu sur lequel on peut ajouter du poids (par exemple un lest mobile), sans risque modifier remarquablement l'assiette du bateau.

02.5.2 Dans l'axe vertical (Z)

On peut et doit vérifier le volume de la carène et le déplacement en calculant le volume par les surfaces des lignes d'eau au lieu de prendre les couples. C'est ce que l'on appelle la "**courbe des aires des lignes d'eau**".

La procédure sera identique à celle décrite ci-dessus : on calcule le déplacement en assimilant la carène à un cylindre de section droite, égale à la section moyenne des couples.

On divisera le tirant d'eau du corps sous-marin du bateau en un nombre impair de lignes d'eau de manière à appliquer soit la formule des trapèzes, soit celle de Simpson.

La surface de chaque ligne d'eau sera mesurée sur le plan longitudinal par les mêmes procédés que pour le calcul précédent.

La courbe des aires des lignes d'eau que l'on obtiendra de manière semblable à celle des couples doit présenter une même régularité que celle de sa consoeur.

En prenant les moments des surfaces des lignes d'eau, on obtiendra les coordonnées verticales (Z) du centre de poussée "B", une information essentielle aux calculs de stabilité dont le développement suivra plus loin.

Bien entendu les résultats obtenus pour le volume par les lignes d'eau doivent être les mêmes que ceux que l'on aura calculé en utilisant les sections. On aura ainsi une vérification immédiate de la précision de l'approche des calculs de volume de la carène.

A noter qu'avec cette même méthode on peut aussi trouver, par exemple, le centre de gravité d'un lest.

02.6 Echelle de déplacement

Les démarches entreprises ci-dessus permettront de trouver, en utilisant la surface de la flottaison, la charge correspondant à un enfoncement d'un centimètre de la flottaison du bateau.

L'intérêt de l'échelle de déplacement est plus important sur un navire de charge ou à passagers que sur un yacht. Il n'en reste pas moins que les normes CE concernant les bateaux de plaisance se basent aujourd'hui sur la capacité de charge d'un bateau et non plus sur son seul poids, comme antérieurement.

Le constructeur, tout comme le détenteur du bateau, sera intéressé de savoir de combien augmente le tirant d'eau du bateau entre sa condition dite "à lège" et celle de la "charge maximum admissible".
(voir aussi 05.6)

02.7 Centre de carène (ou de poussée)

Nous avons déterminé (en X et en Z) le centre de gravité du volume de la carène, correspondant au centre de poussée sur lequel s'exerce la poussée hydrostatique décrite par le principe d'Archimède.

Ce centre de poussée est souvent désigné par la lettre « B », sous l'influence du terme anglo-saxon de « Buoyancy », poussée hydrostatique.

Nous avons vu que ces données seront primordiales lors de l'approche des questions de stabilité du bateau.

On constate donc que la recherche du centre de carène s'établit conjointement et dans un même tableau de calculs que la détermination du volume de la carène. L'opération est certes un peu longue, mais reste indispensable, tout en étant relativement facile à réaliser du point de vue de la difficulté mathématique.

Un tableau systématique doit pouvoir être retrouvé dans les documents de référence usuels du professionnel du nautisme.

Le professionnel pourra ainsi présenter les caractéristiques du bateau faisant l'objet de son travail. Le modèle ci-dessous pourrait faire partie des archives du constructeur :

Couple no	valeur	SM	fonction	bras	moment
0		1			
1		4			
2		2			
3		4			
4		2			
5		4			
6		2			
7		4			
8		1			
			Σ fonctions		Σ moments

02.8 Surface et centre du plan de dérive

On considérera la surface de dérive comme étant la projection du contour immergé de la carène.

Le centre du plan de dérive du bateau sera admis comme étant le centre de gravité dudit plan longitudinal.

La détermination de la surface de dérive n'est pas de première importance; par contre, la position longitudinale de son centre doit être déterminée car il est nécessaire de la connaître pour déterminer, en particulier, le plan de voilure.

La détermination du centre se fera mathématiquement en utilisant le même procédé que pour la recherche du centre de poussée, soit les moments par rapport à la même référence (généralement la jonction entre l'étrave et la flottaison).

Plus simplement, on pourra rechercher le centre de gravité en découpant la forme du plan de dérive dans du carton fort et en déterminant le point d'équilibre du carton sur la lame d'un couteau par exemple.



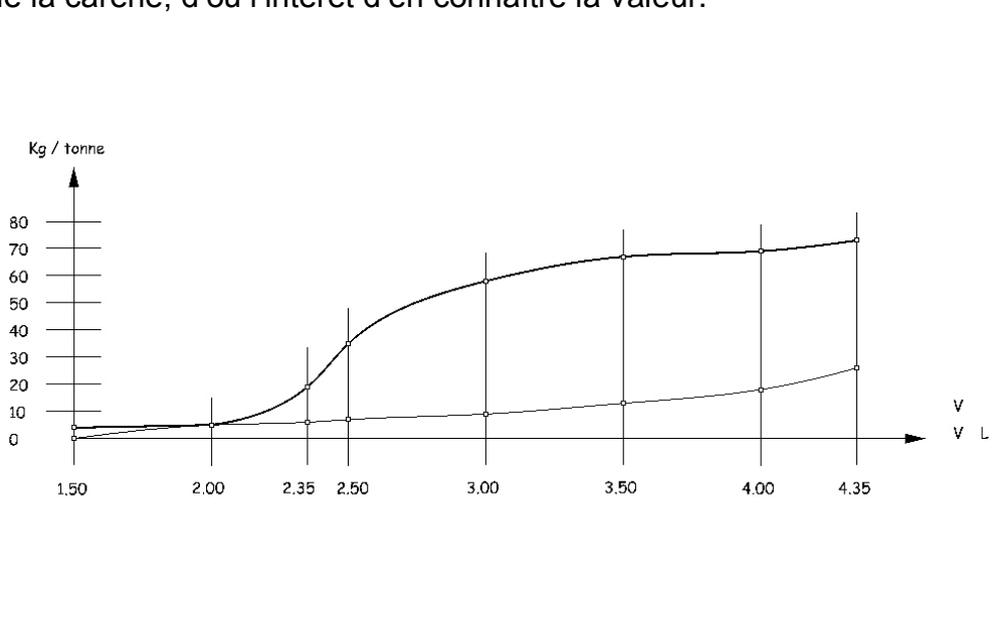
Fig.7

La position longitudinale du centre étant connue, on pourra ainsi vérifier, sur un voilier, la pertinence de la position du centre de voilure choisi ; ce dernier doit impérativement se trouver **en avant** du centre de dérive tel que défini ci-dessus si l'on veut un bon équilibre sous voile.

Il est statistiquement établi que cette « avance » (en anglais « lead ») du centre vélique sur le centre de dérive passe de 6 à 10% de la longueur de la flottaison pour un bateau de plaisance à 1.5 à 2% pour de grands navires.

02.9 Surface mouillée de la carène

La résistance à l'avancement d'un bateau dans l'eau dépend largement de la résistance due au frottement. Cette résistance est donc proportionnelle à la surface de la carène, d'où l'intérêt d'en connaître la valeur.



Beaucoup de tableaux comparatifs de bateaux se font en utilisant le rapport « surface mouillée / surface vélique » ou « surface mouillée / puissance moteur ».

Dans le même esprit que celui du calcul du volume de la carène, on considérera que la surface est assimilable à un rectangle de longueur égale à celle de la flottaison et d'une largeur correspondant à la moyenne des développements des couples.

On mesurera ces derniers sur le plan transversal, de l'axe de la quille jusqu'à la flottaison. Ces mesures peuvent se faire en utilisant une règle volante en papier millimétré, que l'on fera pivoter sur tout le développement de chaque couple de la carène pour en obtenir la longueur exacte.

Souvent, on relèvera en une même opération le développement de la carène et celui de tout le bordé, de manière à disposer aussi de la surface globale de l'ensemble de la coque ; on pourra ainsi calculer la surface et le poids de cette dernière.

03 Calculs des carènes inclinées

Un bateau ne se trouve en fait que rarement parfaitement droit. En effet, la force du vent sur le gréement ou sur les superstructures, la houle, les amarres, etc. ont pour effet d'incliner transversalement la coque. Aussi, la carène n'est plus symétrique dans son axe longitudinal.

L'appréciation des possibilités de redressement d'une carène inclinée permet d'en connaître les limites de gîte et de ce fait la sécurité du bateau dans sa navigation prévue.

Ces notions sont largement utilisées dans les normes CE pour déterminer la classe de navigation (A, B, C ou D) d'un bateau de plaisance.

03.1 Notion d'équilibre

Si l'ensemble des forces et moments auxquels est soumis un objet est nul, ce dernier est considéré comme en équilibre.

On différenciera l'équilibre stable de l'équilibre instable :

Un équilibre peut être considéré comme stable si une sollicitation tendant à écarter l'objet de sa position d'équilibre entraîne une réaction qui cherche à ramener l'objet dans sa position première.

L'équilibre est considéré comme instable dans le cas contraire.

Dans le cas d'un bateau symétrique et droit, deux forces s'opposent et s'annulent :

- La poussée hydrostatique appliquée au centre de carène "B" situé dans l'axe longitudinal du navire.
- Le poids du bateau, appliqué au centre de gravité "G", lui aussi situé dans le même axe longitudinal du navire.

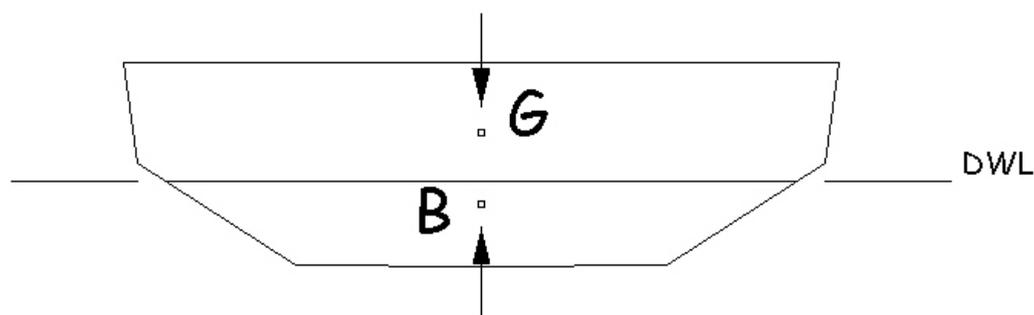


Fig. 8

03.2 Carène inclinée

Pour déterminer de la qualité stable ou instable d'un bateau, on doit se le représenter avec une inclinaison de quelques degrés, comme s'il était gîté par le vent ou une amarre tendue.

La gîte ne modifie pas les conditions de flottabilité du bateau, le déplacement restant égal au poids du navire.

Par contre la forme de la carène est devenue dissymétrique et le centre de poussée s'est déplacé de B en B₁, du côté du bord incliné.

Le centre de gravité "G" du bateau, quant à lui, ne s'est pas déplacé.

La réaction provoquée par cette gîte est un couple de forces égales et opposées.

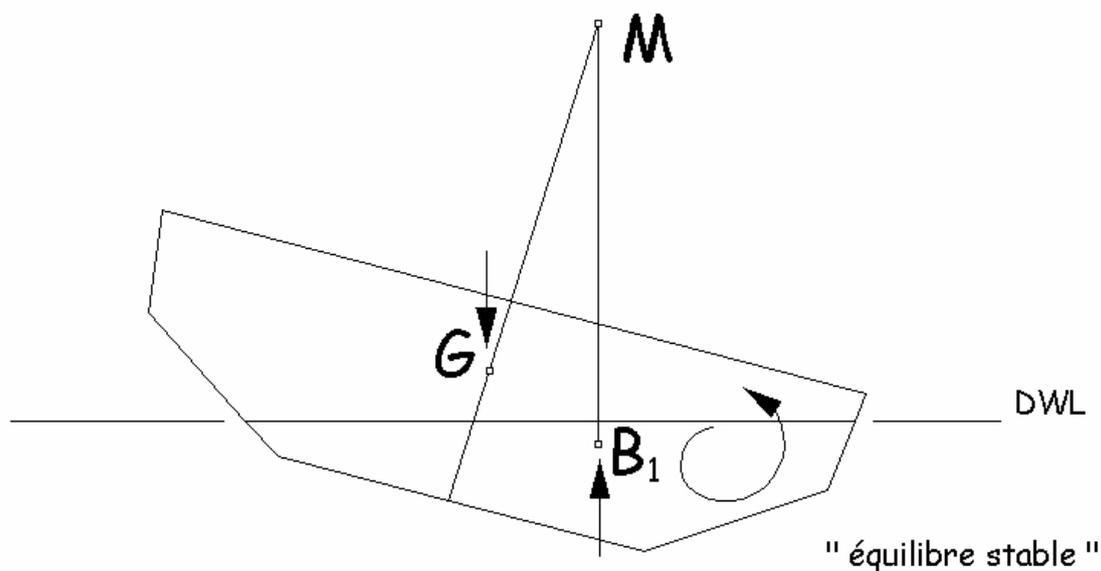


Fig. 9

Le moment en question tend à redresser le bateau. En effet la force d'Archimède agit en B₁, en une direction verticale qui passe par un point « M » situé sur l'axe de symétrie du bateau, en dessus du centre de gravité du bateau « G ».

L'équilibre est ainsi stable.

Si « M » était situé en dessous de « G » (navire avec un centre de gravité très haut, par exemple surcharge de personnes, de marchandises ou de glace), le couple aurait tendance à faire gîter encore plus le bateau et on serait en présence d'un équilibre instable.

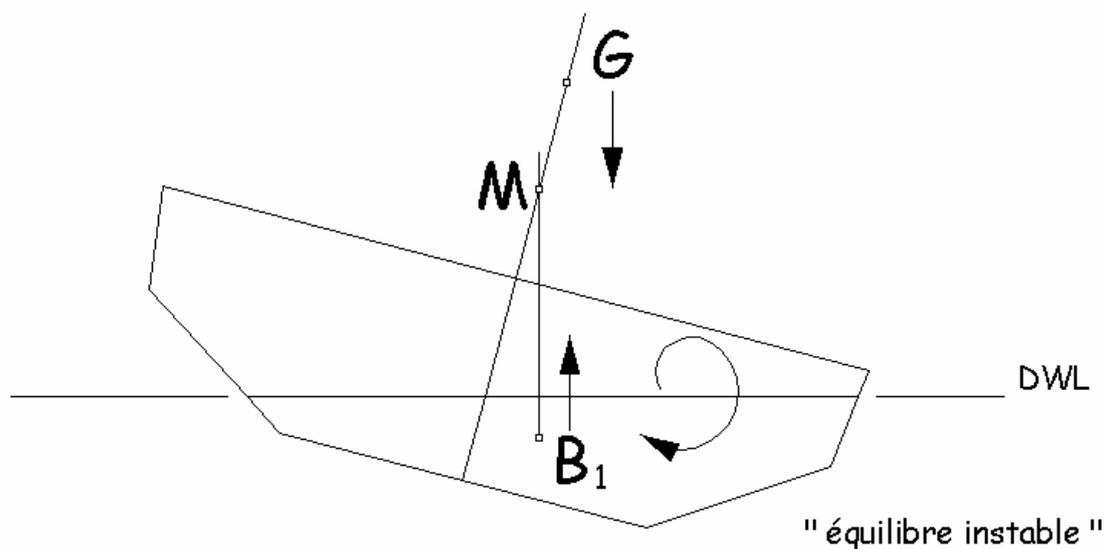


Fig. 10

03.3 Equilibre de coque de voilier

Une petite parenthèse pour mentionner une autre forme d'équilibre de coque, celle correspondant à la configuration de la carène au regard de l'équilibre sous voile.

Les coques actuelles sont souvent d'un dessin dicté par les emménagements et l'utilisation du navire comme résidence ou la recherche d'une coque planante.

A la gîte, de telles sections arrières ne favorisent pas une carène équilibrée sous voile et ces voiliers ont tendance à devenir très ardents et délicats dans le maintien d'une allure ou d'un cap.

Par contre, une carène traditionnelle, aux lignes offrant un bon balancement de formes à la gîte, permet d'avoir un bateau bien équilibré sous voile.

La figure ci-dessous montre la différence de ces deux types de carènes.

04 Métacentre

Le point « M » indiqué sous 03.2 ci-dessus est le centre autour duquel, à petits angles, pivote le centre de carène du bateau qui roule d'un bord sur l'autre sous l'influence des vagues, du vent ou d'une autre force. Nous avons vu que le centre de carène passe de « B » à « B₁ » dans ce cas de figure.

On appelle ce point le **métacentre** et la distance **BM** se nomme le **rayon métacentrique**.

Cette notion se retrouve pour la première fois dans le "Traité du Navire" de Pierre Bouger en 1746 déjà; elle reste toujours actuelle aujourd'hui.

Nous verrons qu'avec des angles de bande de plus d'une dizaine de degrés, le métacentre se déplace. Dans l'étude de la stabilité du bateau pour des angles de gîte plus importants, il y aura lieu d'en tenir compte.

04.1 Hauteur métacentrique

On appelle **hauteur métacentrique** la distance entre le centre de gravité "G" et le métacentre "M", une valeur dont l'expression courante est le "**GM**".

Dans la figure ci-dessous on a la relation suivante :

$$GM = KB + BM - KG$$

KB correspond à la hauteur du VCB par rapport à la quille, KG étant le VCG mesuré depuis cette même quille (on pourrait aussi utiliser comme référence commune la flottaison au lieu de la quille).

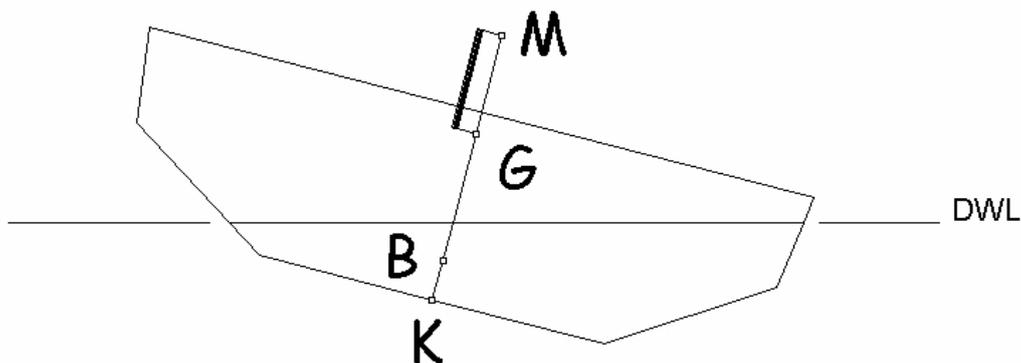


Fig. 11

Ainsi, l'importance de la hauteur métacentrique pour les petits angles de gîte est-elle une approche basique de la stabilité initiale d'une unité.

Pour des petits bateaux moteur, la hauteur métacentrique est de l'ordre de 60 à 75 cm; pour un yacht à voile elle monte à quelques 90 à 140 cm, voire plus.

04.2 Couple de redressement

Le bras de levier d'un couple correspond à la distance séparant les lignes d'action des forces concernées. Dans notre figure, on prendra la distance "GZ". Le point Z est à l'intersection entre la verticale B₁M et l'horizontale passant par G; l'angle GZM est de ce fait droit (90°).

Il est à relever ici que le bras de levier du couple de redressement du bateau est en relation étroite avec la hauteur métacentrique ; la formule mathématique, pour de petits angles, est la suivante :

$$GZ = \text{hauteur métacentrique} \cdot \sin \varnothing$$

Soit

$$GZ = GM \cdot \sin \varnothing$$

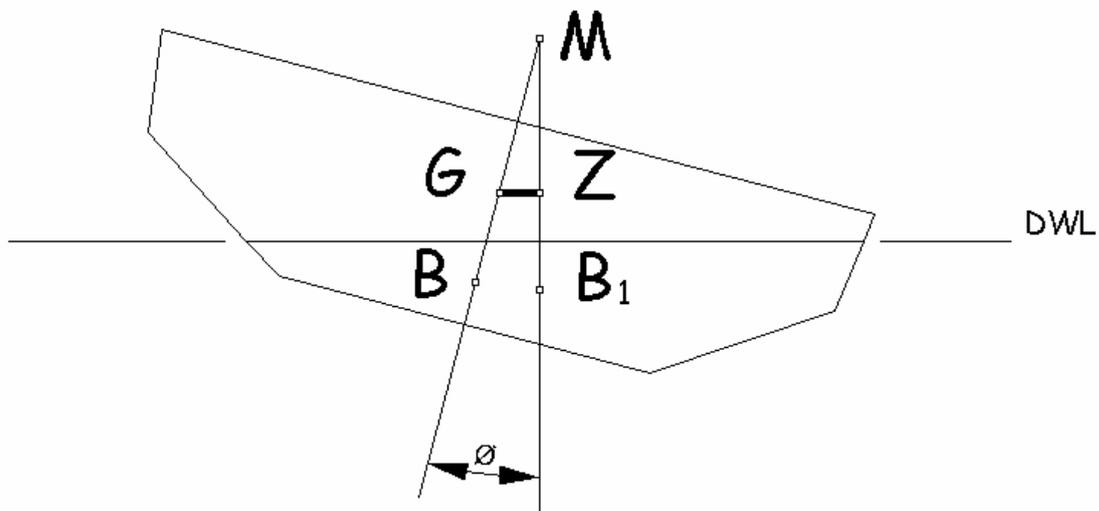


Fig. 12

Cette notion de GZ est aujourd'hui le plus souvent utilisée comme représentation de la stabilité d'un bateau. C'est elle que l'on utilise dans les normes CE.

Nous avons vu que le déplacement, quant à lui, ne change pas.

Ainsi, le moment (force * bras de levier) augmente jusqu'à une valeur maximale, puis diminue jusqu'à s'annuler ; on nomme cette valeur **l'angle de chavirement statique** ou l'AVS (Angle of Vanishing Stability). Passé ce stade, le moment devient chavirant et s'annule à nouveau lorsque le bateau est à l'envers, quille en l'air.

Les calculs usuels mènent à l'établissement de courbes de stabilité semblables au modèle ci-dessous.

On y retrouve deux éléments d'importance :

- l'angle de gîte présentant la valeur maximale de couple
- l'angle de gîte auquel correspond un couple de redressement nul.

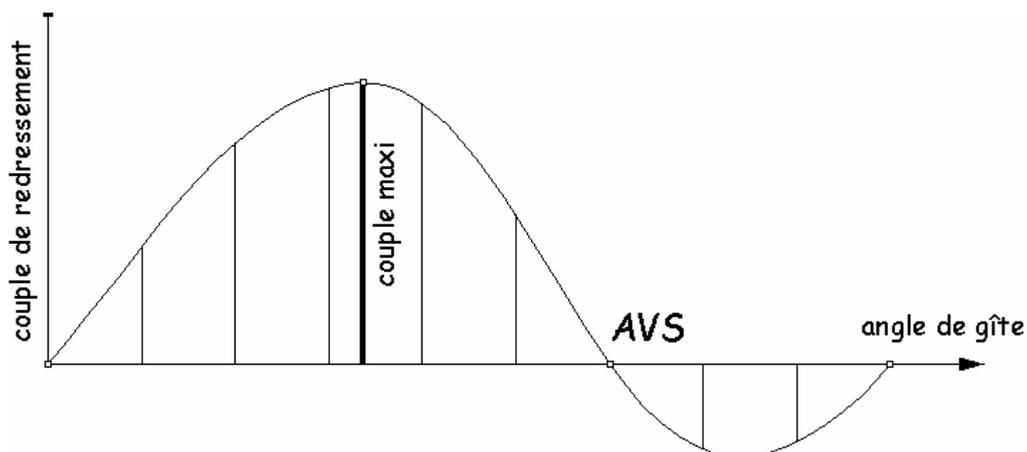


Fig. 13

04.3 Couple inclinant

Le vent dans les voiles, ou contre les superstructures d'un bateau, produit un couple chavirant.

La force dépend de l'intensité du vent ; le bras de levier correspond à la hauteur du centre vélique et/ou des superstructures par rapport à la flottaison.

En marine, l'intensité du vent se mesure sur la base de l'**échelle BEAUFORT**. Cette échelle comporte 13 degrés allant de 0 à 12. Elle a été créée par L'amiral britannique Francis Beaufort en 1806 et retenue comme base internationale lors d'un congrès en 1946.

Chaque degré correspond à une forme de difficulté nautique distincte et on y retrouve une valeur moyenne de vitesse du vent ainsi que la pression exercée par ce dernier.

Les chiffres utilisés dans cette échelle n'ont pas été pris au hasard, mais relèvent d'une approche mathématique bien réfléchie.

La pression du vent dans les voiles augmente au carré de la vitesse de celui-ci.

Par exemple, à 5 Beaufort (18 nœuds), la vitesse du vent est le double de celle d'un 3 Beaufort (9 nœuds).

Par contre, en ce qui touche la pression du vent, elle est 4 fois plus forte, passant de 2.5 kg/m^2 à 10 kg/m^2 .

Le tableau ci-dessous montre que la pression moyenne pour chaque force de vent en unité BEAUFORT correspond précisément au cube de cette valeur. Par exemple, à force 6Bf on a 216 fois (6x6x6) la pression correspondant à force 1Bf. Cela signifie également qu'à force 10Bf le vent n'est que 25 fois plus rapide, mais qu'il exerce une pression mille fois plus importante qu'à force 1Bf.

Force Bf	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pression	0.05	0.4	1.3	3.2	6.3	11	18	26	36	50	68	85
Rapport	1	8	27	64	125	216	343	512	720	1000	1331	1728

Un petit exemple :

Un vent de force 5, soit 18 nœuds provoque une pression de 6.3 kg/m² ; s'appliquant sur une surface vélique de 25 m², le vent provoque ainsi une force de (6.3 x 25) près de 160 kg qui pousse sur le centre vélique situé dans cet exemple à 4 mètres en dessus de la flottaison.

Ce vent engendre ainsi un couple inclinant de (4 x 160) 640 kgm.

Lors d'une rafale de force 6, le couple passe à 1100 kgm, soit pratiquement le double.

A titre indicatif voici quelques valeurs moyennes concernant le vent :

Force Beaufort	Vitesse en nœuds	Vitesse en m / s	Pression en Kg / m ²	Définition marine
1	1 à 3	05. à 1.8	0.05	Très légère brise
2	4 à 6	1.9 à 3.3	0.4	Légère brise
3	7 à 10	3.4 à 5.4	1.3	Petite brise
4	11 à 15	5.5 à 7.9	3.2	Jolie brise
5	16 à 21	8.0 à 11.0	6.3	Bonne brise
6	22 à 27	11.1 à 14.1	11.0	Vent frais
7	28 à 33	14.2 à 17.2	18.0	Grand frais
8	34 à 40	17.3 à 20.8	26.0	Coup de vent
9	41 à 47	20.9 à 24.4	36.0	Fort coup de vent
10	48 à 55	24.5 à 28.5	50.0	Tempête
11	56 à 63	28.6 à 32.6	68.0	Violente tempête
12	> 63	> 32.6	>85.0	Ouragan

A relever qu'en pratique le vent n'est pas totalement perpendiculaire à la surface concernée (voiles, par exemples). Aussi, les chiffres ci-dessus doivent être modulés en appliquant un coefficient "C" correspondant à l'angle d'incidence sous lequel le vent frappe la surface.

On peut aussi retenir la formule suivante pour exprimer la force du vent sur les flancs ou les voiles d'un navire, en Newton :

0.5 x densité de l'air (1.225) x Cx (1.24) x surface (m²) x vitesse² du vent (m/s)

05 Moment d'inertie de la flottaison

On appelle moment d'inertie d'une surface sa capacité de résistance à une giration par rapport à un axe. A titre d'exemple illustratif, on constate qu'il est plus facile de renverser un livre posé sur la tranche que si le même objet est posé sur sa face.

Dans le cadre d'un bateau, c'est la capacité de résistance de la surface de la flottaison par rapport à son axe longitudinal.

Cette inertie se mesure en prenant la valeur moyenne au cube, des demi-largeurs du plan de la flottaison.

Le moment d'inertie s'abrège par la lettre « I ».

Les éléments étant pris au cube, on voit l'importance que peut revêtir le bau de la coque : une petite augmentation de largeur peut conduire à une importante augmentation de l'inertie, donc de la stabilité du bateau concerné.

Plus le moment d'inertie « I » de la surface de flottaison est grand, plus il peut « emmagasiner » d'énergie et « résister » à la gîte.

05.1 Période de roulis

C'est le temps que met un bateau roulant d'un bord sur l'autre pour revenir dans une même position, après avoir effectué une oscillation complète.

Sur un petit bateau, on peut au besoin provoquer ce mouvement et mettant le poids du corps d'un bord, puis de l'autre, créant ainsi un balancement de la coque.

On peut alors mesurer la période de roulis en relevant le nombre de secondes que mets le bateau pour passer d'un bord sur l'autre et revenir à la même position.

Une grande (et douce) période traduit une petite valeur de GM et inversement un roulis rapide (et inconfortable) signifie que le GM est plus grand.

Pour un yacht de croisière, la période de roulis moyenne est de l'ordre de 4 à 8 secondes, alors que pour un paquebot ou un cargo, on peut enregistrer des périodes de l'ordre de 20 à 24 secondes.

On peut aussi avoir une approche en utilisant la formule d'approximation suivante :

$$\text{Période de roulis moyenne} = 0.8 * \text{largeur de flottaison} / \sqrt{\text{GM}}$$

soit aussi

$$\text{GM} = (0.8 * \text{largeur de flottaison} / \text{période de roulis})^2$$

Sur cette base, un canot d'une largeur de 1.5 m et présentant une période de roulis de 4 secondes devrait ainsi avoir un GM de $(0.8 * 1.5 / 4)^2 = 0.09$ m. Ce même canot, mais avec une période de roulis de 2 secondes, aura un GM de l'ordre de 0.36 m.

Une certaine prudence reste de mise avec cette méthode approximative qui doit rester uniquement un guide, un ordre de grandeur. En effet, la forme de la coque et l'inertie de la flottaison sont très variables d'un bateau à l'autre et ce sont des éléments importants au regard des calculs de stabilité.

05.2 Calcul de l'inertie de la flottaison « I » par les trapèzes

Tout comme nous l'avons fait pour le calcul des surfaces ou des volumes, on reprendra la formule de base des trapèzes, soit $(a/2 + b + c + \dots + y + z/2) \cdot \text{espacement standard}$
 Mais les valeurs des demi-largeurs seront prises à la puissance trois et leur valeur sera prise au tiers; la formule finale sera ainsi la suivante :

$$\text{Inertie} = (a^3/2 + b^3 + c^3 + \dots + y^3 + z^3/2) / 3 \cdot \text{espacement standard}$$

Couple no.	Demi-largeur	Au cube	Valeur
0	A	A ³	1/2 A ³
1	B	B ³	B ³
2	C	C ³	C ³
3	D	D ³	D ³
4	E	E ³	E ³
5	F	F ³	F ³
6	G	G ³	1/2 G ³
SOMME DES VALEURS =			TOTAL

Valeur de « I » = Total / 3 * espacement standard

Pour obtenir la valeur du moment d'inertie de toute la surface de flottaison d'un bateau à coque symétrique, on multipliera par deux (2) ce résultat (bâbord + tribord).

05.3 Calcul de l'inertie de la flottaison « I » par Simpson

Parallèlement, avec Simpson, on reprendra également les valeurs des demi-largeurs au cube et on les introduira dans le tableau systématique soit :

Couple no.	1/2 largeur	Au cube	Multiplicatif	Fonction
0	A	A ³	1	1 * A ³
1	B	B ³	4	4 * B ³
2	C	C ³	2	2 * C ³
3	D	D ³	4	4 * D ³
4	E	E ³	2	2 * E ³
5	F	F ³	4	4 * F ³
6	G	G ³	1	1 * G ³
SOMME DES FONCTIONS =				TOTAL

$$\text{Valeur de « I »} = \frac{\text{Espacement}}{3} * \frac{\text{total des fonctions}}{3}$$

On n'oubliera pas de multiplier le résultat par deux (2), pour tenir compte de toute la surface de flottaison, bâbord et tribord.

05.4 Calcul de la stabilité initiale

Avec le résultat de la valeur de l'inertie obtenue, il est démontré que l'on peut calculer la valeur du rayon métacentrique BM au moyen de la formule suivante :

Rayon métacentrique = inertie / déplacement

Ou

$$\mathbf{BM = I / \Delta}$$

Cette relation est importante, car on peut la mettre en relation avec ce que nous avons vu précédemment :

$$GM = KB + BM - KG$$

ou

$$GM = BM - BG$$

et

$$GZ = GM \cdot \sin \varnothing$$

On obtient ainsi assez facilement la valeur du GZ pour un angle de gîte \varnothing donné, soit la stabilité du bateau dans cette condition.

A constater cependant que l'exactitude du calcul va dépendre de celle de l'appréciation de la position du centre de gravité du bateau. Il est donc impératif de vérifier cette donnée, ce qui se fait par l'expérience d'inclinaison faisant l'objet du point suivant.

05.5 Expérience d'inclinaison

Il s'agit d'une méthode permettant avec facilité de déterminer la position du centre de gravité d'un bateau par rapport au centre de poussée de la carène. Ce dernier se retrouve facilement sur le dossier des calculs de carène, pour un déplacement et une assiette donnée.

05.5.1 But

L'expérience a pour but de confirmer l'exactitude des calculs hydrostatiques de la stabilité d'un bateau. C'est la manière la plus simple et précise de confirmer les facultés de redressement d'un bateau, une fois ce dernier construit et opérationnel, dans son élément.

05.5.2 Méthode

Sur la base des formules vues précédemment et rappelées ci-dessous, on va tout simplement déplacer des masses connues sur des distances transversales précises. Par exemple, on peut déplacer des gueuses en béton ou des tonneaux pleins d'eau sur le pont.

On obtiendra ainsi des couples chavirants déterminés, lesquels entraîneront une inclinaison \varnothing du navire qui pourra être mesurée au moyen d'un pendule ou d'un clinomètre.

En général, il est recommandé d'utiliser des poids de l'ordre du 1 :20^e du déplacement, soit, pour un bateau de 25 tonnes, environ 1'250 kg. Le poids en lui-même importe peu, mais il doit être connu avec précision.

L'angle de gîte devra être mesuré avec beaucoup de soin, par exemple en mesurant l'écartement du fil d'un pendule sur une règle placée horizontalement. La distance de ce déplacement permettra, par trigonométrie, de déterminer avec précision l'angle de gîte provoqué par le mouvement des masses indiquées ci-dessus.

Il est important de bien mesurer l'assiette du bateau en relevant avec exactitude son tirant d'eau avant, arrière et éventuellement milieu pour relever avec précision le centre de poussée de la carène dans le dossier de plan.

Le poids du navire sera déterminé par pesée ou par le calcul du volume du déplacement sur la base des plans.

05.5.3 Formules

Nous savons (04.2) que le sinus de l'angle de gîte \emptyset est égal à GZ / GM , ce qui s'exprime par la formule

$$GZ = GM \cdot \sin \emptyset \quad \text{d'où} \quad \sin \emptyset = GZ / GM.$$

Par ailleurs nous avons vu que, dans un équilibre stable, le couple inclinant est égal au couple de redressement; ceci entraîne la formule :

$$GZ = \frac{\text{couple inclinant}}{\text{déplacement}} \quad \text{ou} \quad GZ = \frac{\text{masse déplacée} \cdot \text{distance}}{\Delta}$$

On sait aussi que la cotangente de l'angle \emptyset est physiquement représentée par la longueur du pendule divisée par son déplacement sur la règle horizontale.

La formule finalement utilisée s'exprime de deux manières pour de petits angles d'inclinaison :

$$GM = \frac{\text{masse déplacée} \cdot \text{distance} \cdot \text{longueur du pendule}}{\text{déplacement du bateau} \cdot \text{déplacement du pendule}}$$

ou aussi

$$GM = \frac{w \cdot d}{\Delta \cdot \tan \emptyset}$$

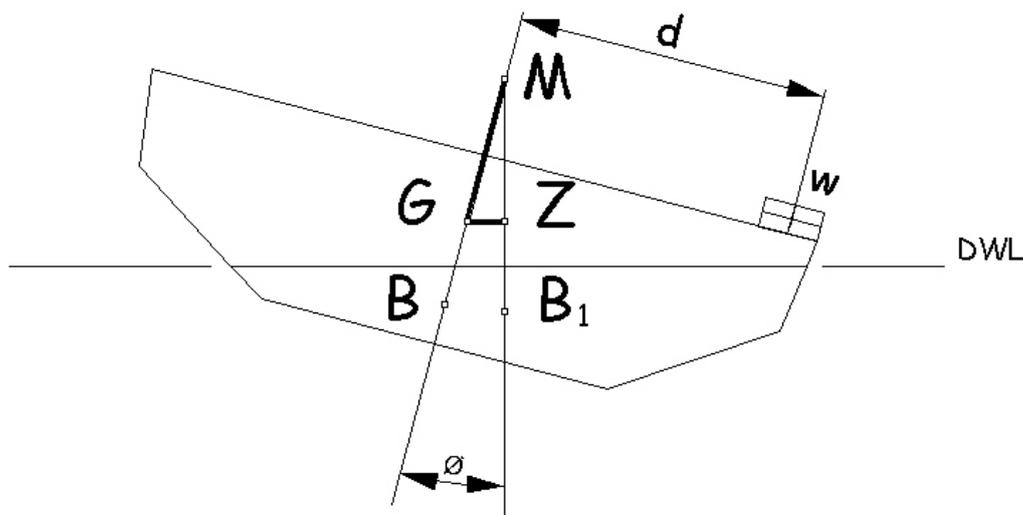


Fig. 14

05.5.4 Exemple

Prenons un yacht de 3000kg de déplacement et sur le pont duquel on place deux sacs de sable de 50 kg, l'un (le sac A) à bâbord, l'autre (le sac B) à tribord, le tout au fort du bateau, soit au maître bau qui mesure 3.00 m.

Au centre du bateau on pose un pendule d'une longueur de 2 m, sous forme d'un fil à plomb. Une règle horizontale permet de mesurer le déplacement latéral du pendule.

En théorie, si les sacs sont similaires et le déplacement latéral identique, on devrait retrouver un même angle à chaque manutention, mais la pratique nous montre qu'il peut y avoir des différences ! On prendra donc la moyenne des diverses mesures pour garantir plus de précision.

Dans un premier temps, on déplace le sac A de bâbord sur tribord. On mesurera le déplacement du pendule sur tribord.

Puis, on déplace le sac B de tribord sur bâbord ; on mesure à nouveau le déplacement du pendule.

On déplace alors le sac A de tribord sur bâbord, en mesurant encore une fois le déplacement du pendule.

Enfin, on ramène le sac B sur tribord, soit un retour en tous points à la situation initiale de départ. On mesure ce dernier écart du pendule.

On peut alors faire une moyenne des déplacements et obtenir par trigonométrie l'angle d'inclinaison moyen \emptyset provoqué par le déplacement du sac de poids connu, sur une distance en principe identique. Pour de petits angles, la longueur du pendule divisée par le déplacement latéral moyen donne la cotangente de l'inclinaison moyenne.

Ayant ainsi déterminé avec précision la gîte provoquée par le déplacement d'une masse connue sur une distance précise, on peut appliquer les formules 05.5.3 pour déterminer la valeur du GM et du GZ, but de l'expérience d'inclinaison.

Le déplacement moyen ayant été mesuré à 0.11m dans cet exemple, l'**angle de gîte** est égal à : $(\text{Cot. } \emptyset = 2.00 / 0.11)$ **3 degrés**.

Avec la formule sous 05.5.3 on obtient le **GM** $\{(w \cdot d / \Delta) \cdot (\text{pendule} / \text{déplacement})\}$, soit dans le cas d'espèce $\{(50 \cdot 3 / 3'000) \cdot (2.00 / 0.11)\}$, un GM de **0.91 mètre**.

De même, dans ce cas de figure, le **GZ** mesure $(0.91 \cdot \sin 3^\circ)$ **0.05 mètre**.

On admet généralement des valeurs de GM de l'ordre de :

- Multicoque 5.00 à 8.00 m
- Monocoque 0.60 à 1.30 m
- Croiseur à moteur 0.60 à 0.70 m

Le critère dit de **Nickum** indique que $GM/B > 0.1$, une approche simple et utile.

Quand au critère de **Rahola**, il indique :

- le GZ à 20° doit être supérieur à 0.14 m,
- le GZ à 30° doit être supérieur à 0.20 m
- le bras de levier du couple de redressement maximum doit être celui d'un angle de gîte supérieur à 35°.

Ces approches permettent d'avoir une première impression sur les caractères de stabilité d'un bateau.

05.5.5 Ajout d'une masse

Pour calculer la diminution de GM due à l'ajout d'une masse supplémentaire à bord, il faut utiliser la formule suivante :

$$GM_{nx} = GM - (w \cdot h / \Delta)$$

En effet le nouveau moment créé par l'adjonction doit être divisé par le déplacement du bateau, puis soustrait au GM initial.

Exemples :

Un yacht de 8000 kg, avec GM initial de 100 cm se voit installer une antenne radar de 10 kg au niveau des barres de flèche, soit à 600 cm en dessus du centre de gravité initial. Quelle est la perte de valeur du GM ?

La formule de base est $GM_{nx} = GM - (w \cdot h / \Delta)$, soit

$$GM_{nx} = 100 - (5 \cdot 600 / 8000) = 99.625 \text{ cm}$$

Ce qui n'est pas trop important à première vue

4 personnes de 75 kg montent sur le fly-bridge d'une vedette à moteur, soit à 220 cm du centre de gravité initial. Le déplacement est de 4000kg et le GM de 60 cm.

La formule de base est $GM_{nx} = GM - (w \cdot h / \Delta)$, soit

$$GM_{nx} = 60 - (300 \cdot 220 / 4000) = 43.5 \text{ cm}$$

La diminution est largement plus importante et le calcul ne tient pas compte du fait que ces passagers pourraient se trouver tous sur un même bord, soit un joli couple de chavirage.

05.6 Stabilité longitudinale

Nous avons vu aux points 02.2, 5 et 7 la question du centre de poussée de la carène ainsi que la notion de l'enfoncement. Celle-ci se base sur le calcul dit de Tonnes Par Centimètre, soit le poids provoquant un enfoncement d'un centimètre de la flottaison du bateau.

L'architecte ou son ordinateur va aussi calculer la valeur du GM longitudinal, une notion qui n'intéresse que peu le constructeur, mais qui lui permettra cependant de connaître les éléments qui guident l'assiette du bateau, en français le « trim ».

Cet élément est connu sous le nom de **Moment pour Trimer 1 Cm, ou MTC**.

On peut considérer que le GM longitudinal correspond à une valeur assez proche de la longueur de la flottaison des bateaux conventionnels.

Par ailleurs on admet empiriquement que le moment pour « trimer » un cm correspond au centième du déplacement, soit :

$$\mathbf{MTC = \Delta / 100}$$

On peut également admettre que sur un bateau conventionnel le centre de flottaison (LCB) se retrouve entre les 2/3 et les 3/5 de la flottaison, à partir de l'étrave.

Exemples :

Sur un yacht de 5000 kg de déplacement, un équipier de 75 kg se déplace de 4 m vers l'avant. Quel changement d'assiette peut-on attendre de ce fait ?

- Le déplacement provoque un moment de $75 \cdot 4 = 300 \text{ kg} \cdot \text{m}$
- Le MTC est de l'ordre de $5000 / 100 = 50 \text{ kg} \cdot \text{m}$
- Le changement d'assiette représente $300 / 50 = 6 \text{ cm}$

Le LCB se trouvant au 2/3 de la longueur de flottaison, on en conclura que l'assiette sera plus importante sur l'avant avec un enfoncement de (2/3 de 6) 4 cm, alors que la poupe se redressera de (1/3 de 6) 2 cm.

Pour l'adjonction d'un élément, comme par exemple la masse d'une chaîne et d'une ancre à l'avant, on calculera le moment par rapport au centre de gravité du bateau et on appliquera le même mode de calcul que dans l'exemple ci-dessus.

06 Stabilité dynamique

Contrairement à la stabilité statique, il est beaucoup plus délicat de cerner la stabilité dynamique.

Avec l'introduction des normes CE, l'International Standards Organisation (ISO) a développé ses propres standards sous le nom de **STIX** (STability IndeX).

Divers éléments touchant la stabilité y sont répertoriés et permettent une approche sur la base d'une échelle allant de 1 à 100.

En plus de la longueur et du déplacement du bateau, des facteurs de base, l'index STIX prend en compte des éléments tels que :

- > Capacité de réponse au chavirement au vu de la surface sous la courbe GZ,
- > Possibilité de redressement au vu de l'angle AVS et de la masse du yacht,
- > Possibilité de redressement en tenant compte de l'eau prise dans les voiles,
- > Force additionnelle générée par les vagues, principalement les déferlantes,
- > Effets hydrodynamique (en particulier forme de coque),
- > Facteur déplacement - longueur,
- > Facteur déplacement - largeur,
- > Gîte provoquée par survente,
- > Roulis en résonance,
- > Envahissement par diverses ouvertures de coque,
- > Envahissement lors d'un chavirage ou lorsque le bateau sancit

Les bateaux qui souhaitent répondre à la catégorie « A » doivent démontrer un facteur STIX supérieur à 32.

Pour la catégorie « B », ce facteur doit dépasser 23.

En catégorie « C » il doit être de plus de 14.

Pour la catégorie « D » le STIX sera supérieur à 5.

Ceci, bien entendu, en plus des valeurs de base exigées en ce qui concerne le déplacement et l'angle de chavirement, soit en particulier :

En ce qui touche l'angle de chavirement statique AVS demandé :

Catégorie	Moins de 12 m	Plus de 12 m
A	140°	130°
B	130°	120°
C	105°	095°

Au niveau du déplacement :

Catégorie	déplacement	Angle AVS minimum	Remarque
A	3.0 tonnes	130° -(2x déplacement)	mini. = 100°
B	1.5 tonnes	130° -(5x déplacement)	mini. = 095°

Ces calculs sont en principe établis par les architectes concepteurs du bateau ou par les organismes certifiés chargés d'établir les documents de conformité.

Le principe de ces règles reste cependant utile au constructeur, principalement pour des unités immatriculées sur la base d'un « module A ou A bis » tel que décrit dans les normes CE.

07 Flottabilité, stabilité, franc-bord

Le franc-bord doit être suffisant pour garantir les caractéristiques de flottabilité d'un bateau, au vu de sa catégorie de navigation.

En Suisse, on distingue deux types de navires d'utilisation à titre privé :

07.1 "bateaux de plaisance".

Ce sont en principe des unités datant d'avant 2001, soumises aux **normes de suisses de l'ONI** et non à celles de la directive 94/25. L'article 136 de l'Ordonnance donne les valeurs minimales du franc-bord suivantes :

- a. pour les bateaux motorisés :
 - 0.30 m pour un moteur ne dépassant pas 6 kW
 - 0.35 m pour un moteur entre 6 et 30 kW
 - 0.40 m pour un moteur de plus de 30 kW
 - 0.25 m pour les bateaux pneumatiques.
 -
- b. pour les bateaux à rame :
 - 0.25 m au minimum

Pour les voiliers sans moteur, c'est la notion de stabilité et de flottabilité qui prédomine.

07.2 "bateaux de sport"

On désigne par ce terme un bateau **soumis à la directive 94/25 CE**. Les directives européennes leur sont applicables avec, pour les questions de franc-bord, la norme ISO 12217. Ces règles sont donc valables pour pratiquement tous les bateaux construits ou importés en Europe et en Suisse depuis 2001.

Dans la catégorie des bateaux de sport, on distinguera les bateaux "non-voile" et les bateaux "à voile".

Parallèlement, il a été fixé deux sous-catégories, soit moins de 6 m ou plus de 6 m de longueur.

07.2.1. Un bateau "**non-voile**" est simplement une unité autre qu'un voilier. Si ce bateau devait avoir une quelconque voile de stabilisation, la surface de cette dernière ne doit pas dépasser 7% de son déplacement en charge à la puissance 2/3. Par exemple, un bateau de 1000 kg de déplacement ne doit pas dépasser 7.0 m² de voilure, une unité de 2000 kg 11.1 m², etc.

- Pour un bateau de sport non-voile de 6 m et plus, c'est la norme ISO 12217-1 qui est applicable.

- Pour un bateau de sport non-voile de moins de 6 m, la norme ISO 12217-3 est à utiliser.

07.2.2. Pour un bateau de sport à **voile** d'une longueur de coque de 6m et plus, c'est la norme ISO 12217-2 qui doit être prise en compte.

Pour un bateau de sport à voile de moins de 6 m, la norme ISO 12217-3 s'applique, soit la même norme que pour les bateaux non-voile.

07.2.3. Les bateaux **pneumatiques de moins de 8 m** ne sont pas concernés par ces normes.

Ces normes tiennent compte de nombreux facteurs tels que :

- bateau ponté
- bateau partiellement ponté
- bateau non ponté
- caractère d'insubmersibilité
- angle d'immersion
- vagues
- gîte due au vent
- etc

Ces normes sont complétées par d'autres, telles celles applicables aux cockpits, aux hublots, capots, charge maximum, etc. La procédure d'appréciation doit être laissée aux professionnels. Pour les navires de catégorie de conception "A" et "B", les calculs doivent impérativement être faits par un organe certifié.

08 Envahissement

Un bateau est exposé à divers risques tels que :

- envahissement par mauvaise étanchéité
- envahissement à la gîte
- chavirement provoqué par le déplacement des personnes à bord
- chavirement provoqué par les éléments (vagues, vent, etc)

La "hauteur d'envahissement" est définie comme la hauteur en dessus de la flottaison du premier point où l'eau pourra pénétrer dans une partie du bateau.

On entend par "angle d'envahissement", la gîte, en eau calme, à laquelle débute l'envahissement du navire.

Le terme anglais de "knockdown" s'emploie pour définir la situation dans laquelle un navire est couché et atteint un angle de gîte suffisant pour que la tête de mât soit immergée.

Le "chavirage" se dit d'un bateau qui a atteint un angle de gîte dont il ne peut revenir sans intervention extérieure.

L' "inversion" se dit d'un bateau qui se retrouve quille en l'air.

© P.-A. Reymond
Architecte et Expert naval
Ancien chargé de cours CEPM
reymondsurveys@gmail.com

Edition 2010

Dessins : J. Borghini