



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

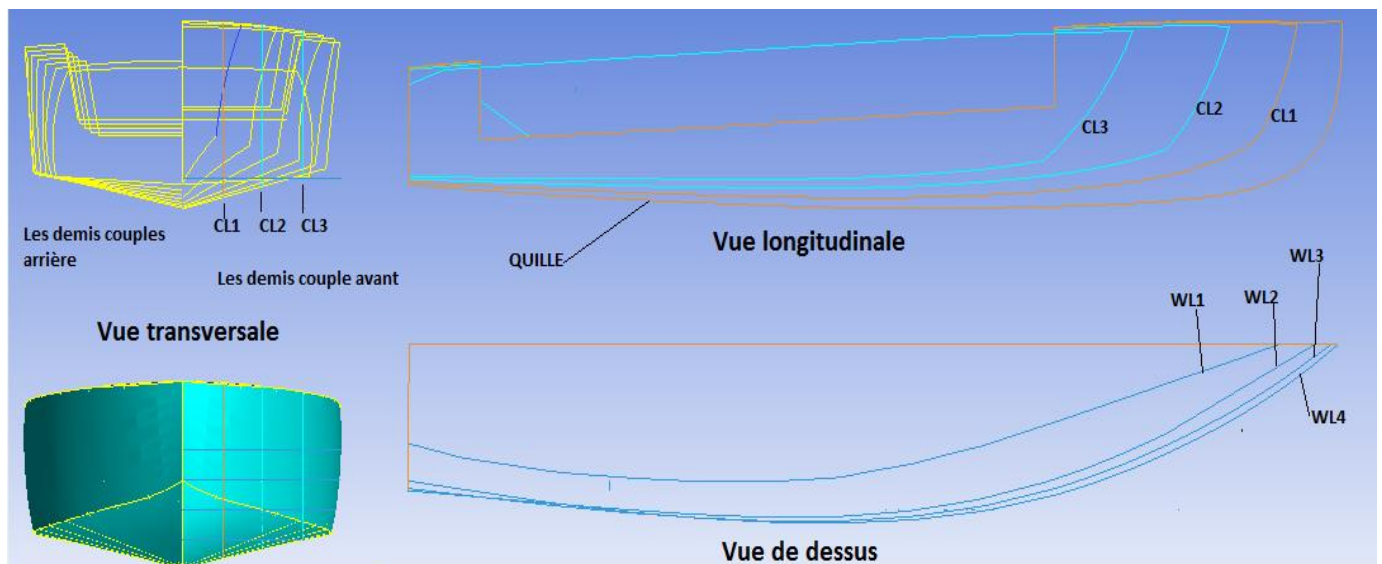
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Fabrication Mécanique et productive

Thème

**Etude analytique et expérimentale d'une maquette du Yacht
type Riva Aquarama en régime hydrostatique**



Encadré et orienté par:

M^r. KACIMI Bachir

Proposé et Co-encadré par :

Mme. TEKAL Fatiha

M^r. CHALLAL Makhlouf

Réalisé et présenté par:

LAKHDARI Hamid

TERKI Lounis

Promotion : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu le Bon Dieu de nous avoir donné le courage d'aller au bout de notre objectif.

Nous remercions profondément notre promoteur M o n s i e u r K A C I M I , avons d'avoir accepté de diriger notre travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui nous ont permis de travailler tranquillement.

Nous adressons les plus vifs remerciements et reconnaissances à nos Co-encadreur Mr CHALLAL Makhoul et Mme TEKALAL Fatima pour sa disponibilité et aide précieuse.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions les membres des laboratoires de : l'université
UMMTO

Nous remercions nos camarades de promotion pour leur soutien.

Notre sincères remerciements vont à tous nos enseignants.

Nous remercions également tous ceux et celles qui de près ou de loin, nous ont apporté aide et encouragement.

Dédicace

Je tiens avant tout à remercier M. CHALLAL Makhlouf notre Co-promoteur d'avoir nous proposé l'idée de ce projet et M. KACIMI Bachir notre promoteur, ainsi que Mme TEKLAL Fatiha qui nous ont permis de réaliser ce projet de fin d'étude et pour la confiance qu'ils nous ont accordé tout au long de la réalisation du projet.

Un merci tout particulier à mon collègue TERKI Lounis, qui m'a beaucoup aidé dans la réalisation de ce travail, merci pour ton soutien mon ami.

Je remercie également tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à aujourd'hui.

Je dédie ce travail à ma famille et surtout mes chers parents qui ont toujours été un soutien immense dans ma vie.

Enfin, Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail par une quelconque forme de contribution, trouve ici le témoignage de ma plus profonde reconnaissance.

Hamid

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes oncles et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci

Lounis

Liste des symboles

α : Angle de gîte ($^{\circ}$)

ρ_{em} : Masse volumique d'eau de mer (kg/m^3)

ρ_{ed} : Masse volumique d'eau douce (kg/m^3)

ρ_N : Masse volumique du navire (t/m^3)

Δ : Déplacement du navire (t)

∇ : Volume de la carène (m^3)

P : Poussée d'Archimède (N)

L_f : Longueur à la flottaison (m)

LCF : Longueur du centre de flottaison (m)

B : Largeur du navire (m)

L_{ht} : Longueur Hors Tout du navire (m)

T : Tirant d'eau (m)

T_M : Tirant d'eau lu sur l'échelle milieu (m)

T_m : Tirant d'eau moyen (m)

T_{AV} : Tirant d'eau avant (m)

T_{AR} : Tirant d'eau arrière (m)

M_t : Moment de redressement (N.m)

K : Le point le plus bas du navire au niveau du maître couple.

\overline{X} : La section transversale la plus grande du navire (maître couple).

B : Centre de carène.

G : Centre de gravité du navire

M : Le point métacentrique transversal (centre de rotation transversal)

M_l : Le point métacentrique longitudinal (centre de rotation longitudinal)

GZ : Le bras de levier (m)

KB : La hauteur de centre de gravité du la carène (m)

KG : La hauteur de centre de gravité du navire (m)

BM: Rayon métacentrique du navire (m)

KM: La hauteur du métacentre (m)

GM: La hauteur métacentrique (m)

S₁ :Surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

S₂ : Surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

S₃ : Surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

S₄ : Surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

A₁ : Demi surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

A₂ : Demi surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

A₃ : Demi surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

A₄ : Demi surface de flottaison au tirant d'eau (cm)

h : Distance entre les couples (m)

y_n: Les demi-ouverture de surface de flottaison (m)

λ : Distance entre couples (m)

TPC : Poids ajouté pour avoir un enfoncement de 1cm.

WPA : Zone plan d'eau (m)

BM_L : Rayon métacentrique longitudinale (m)

LCB : Largeur du centre de la carène (m)

LHT : Longueur hors tout (m)

LPP : Longueur entre perpendiculaire (m)

L_m : Longueur moyenne (m)

S_m : Surface Moyenne (m²)

Δ_m : Déplacement moyen (t)

V_m : Volume moyen (m³)

Sommaire :

| | |
|--|----|
| Introduction Générale : | 1 |
| Chapitre I : généralité sur l' architecture navale..... | 3 |
| Introduction..... | 3 |
| I -Construction navale | 3 |
| I -1 Définition | 3 |
| I -2 : Elément de la construction navale | 3 |
| I .3 Présentation du navire | 5 |
| I -4 Définitions relatives au navire | 5 |
| I -5 Activités de la construction navale | 5 |
| I -6 Les matériaux de construction d'un navire | 6 |
| I -7 Architecture navale | 8 |
| I -8 Déplacement du Navire | 8 |
| I -9 Plan de formes | 10 |
| I -10 Le navire dans son repère | 11 |
| I -11 Les six (06) Mouvement du navire | 14 |
| I -12 Cotés du navire | 16 |
| I -13 Dimensions caractéristiques du navire..... | 17 |
| I -14 Tirants d'eau | 19 |
| I -15 L'assiette du navire | 20 |
| I -16 Dock flottant | 20 |
| I -17 Charpente du navire | 23 |
| I -18 Types de profils utilisés en construction navale..... | 36 |
| Conclusion..... | 37 |
| Chapitre II : Rappel sur l'hydrostatique d'un flotteur..... | 38 |
| Introduction | 38 |
| II-1 Définitions | 39 |
| II-2 La poussée d'Archimède | 40 |
| II-3 Stabilité de l'équilibre d'un corp flottant | 41 |
| II-4 Condition d'équilibre | 42 |

| | |
|--|-----------|
| <i>II-5 La flottaison</i> | 43 |
| <i>II-6 Stabilité initiale d'un bateau</i> | 44 |
| <i>II-7 Stabilité transversale</i> | 45 |
| <i>II-8 Couple de redressement</i> | 46 |
| <i>II-9 Calcul du volume</i> | 47 |
| <i>II-10 Choix des couples</i> | 48 |
| <i>II-11 Surface des couples</i> | 48 |
| <i>II-12 Courbe des aires des couples</i> | 49 |
| <i>II-13 Calcul du volume de carène</i> | 50 |
| <i>II-14 Les lois d'intégration numérique pour le calcul des aires</i> | 50 |
| <i>II-15 Stabilité de navire</i> | 53 |
| <i>II-16 Le TPC</i> | 58 |
| <i>Conclusion</i> | 59 |
| Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva | 60 |
| <i>Introduction</i> | 60 |
| <i>III-1 Présentation globale de logiciel de dessin</i> | 64 |
| <i>III-2 Calcul de volume de la carène</i> | 68 |
| <i>III-3 Calcul des surfaces de flottaisons</i> | 68 |
| <i>III-4 Déduisons le tirant d'eau « T »</i> | 71 |
| <i>III-5 Distinction de la surface de flottaison</i> | 73 |
| <i>III-6 Calcul de TPC à l'eau douce</i> | 74 |
| <i>III-7 Validation par test expérimentale</i> | 74 |
| <i>III-9 Calculs des déplacements sur navire</i> | 81 |
| <i>III-10 Calculs de la stabilité transversale GM</i> | 82 |
| <i>III-11 Calculs du moment de redressement M_r</i> | 84 |
| <i>Conclusion</i> | 86 |
| Conclusion générale | 87 |
| Références bibliographiques | 89 |

Listes des figures :

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure I -1 : Différent type de matériaux utilisés dans la construction navale. | 7 |
| Figure I -2: Déplacement du navire | 9 |
| Figure I -3 : Déplacement Isocline..... | 9 |
| Figure I -4 : Déplacement Isocarène. | 10 |
| Figure I -5 : Plan de formes..... | 11 |
| Figure I -6: Perpendiculaires définies par une flottaison de référence | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -7: Perpendiculaires définies par le safran et le bulbe d'étrave | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -8 : Ligne de base d'un navire à quille horizontale | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -9:Repère (vue perspective)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -10:Repère (vue transversale et élévation longitudinale)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -11: Les six mouvements du navire..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -12: Cotés du navire..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -13: Vue Longitudinal de la section Longitudinale du navire..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -14: Mesure du bouge sur une coupe au maître. Erreur ! Signet non défini. Figure I -15:Vue de la section transversale du navire..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -16: Echelles des tirants d'eau | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -17 L'arc et contre arc du navire..... | 20 |
| Figure I -18: Assiette d'un navire..... | 20 |
| Figure I -19 : Fonctionnement comparé d'une forme de radoub et d'un dock flottant. | 22 |
| Figure I -20 : construction de la coque du navire..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -21: les trois parties de la coque..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -22 : Exemple type de coque échantillonnée | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -23: Panneau d'un navire. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -24: La similitude entre le navire et une poutre l..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -25: Exemple type de couple..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -26: Structure du pont | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -27: structure de Gousset | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -28: structure de la muraille | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I -29: cloisons transversales du navire..... | 30 |
| Figure I -30: Types de Cloisons..... | 31 |
| Figure I -31: Différents types de quilles. | 32 |
| Figure I -32: carlingue centrale et latérale. | 33 |
| Figure I -33: Différents type de varangues. | 33 |
| Figure I -34: Double fond..... | 34 |
| Figure I -35: types des fond | 36 |

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure I-36: Types usuels de profilés en construction navale. | 37 |
| Figure II-1 : aperçu des surfaces et couple moyen..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure : II-2 Équilibre d'un navire..... | 40 |
| Figure II-3 : Cas d'un équilibre stable | 42 |
| Figure II-4: Cas d'un équilibre instable | 42 |
| Figure II-5 : Conditions de flottabilité du navire | 44 |
| Figure II-6 : Stabilité d'un bateau, centre de carène et gravité. | 44 |
| Figure II-7. Moment de redressement pour les petits angles de gîtes..... | 45 |
| Figure II-8 : courbe GZ | 47 |
| Figure II-9 : couple moyen du navire | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure II-10 : suraface d' un couple | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure -11 Reproduction graphique sous forme de courbe des aires pour les valeurs des couples..... | 49 |
| Figure II-12 :Principe de la méthode de Trapèze | 50 |
| Figure II-13 : Principe de la méthode des paraboles (1ère règle de Simpson)..... | 51 |
| Figure II-14: Principe de la deuxième méthode de Simpson..... | 52 |
| Figure II-15 : Le rayon métacentrique transversal et longitudinal | 54 |
| Figure II-16 : Exemple d'expérience pour le calcul de la stabilité GM..... | 55 |
| Figure II-17 : Tonne Par Centimètre | 58 |
| Figure III-1 : Maquette de yacht type Riva Aquarama vue de dessous | 60 |
| Figure III-2 : Maquette de yacht type Riva Aquarama vue de dessus | 61 |
| Figure III-3 : La coque du Yacht..... | 61 |
| Figure III-4 : Vues de la maquette en perspective..... | 62 |
| Figure III-5 : Intersection du plan d'eau et la coque de la maquette | 63 |
| Figure III-6 : Le plan de formes de la coque. | 63 |
| Figure III-7 : Structure du code de calcul CFX-16.0 | 64 |
| Figure III-8 : Vue éclatante entre coque, quille, couples et pont..... | 65 |
| Figure III-9 : Vue éclatante entre l'ossature avec coque et pont | 66 |
| Figure III-10 : Principe de construction de la maquette..... | 66 |
| Figure III-11 : Conception de la coque | 67 |
| Figure III-12 : Le poids total de la maquette..... | 68 |
| Figure III-13 : Déplacement du plan d'eau du bas en haut par 2 cm..... | 70 |
| Figure III-14 : Volume de la carène en fonction du tirant d'eau | 72 |
| Figure III-15 : Projection tirant d'eau pour trouver la surface de flottaison..... | 73 |
| Figure III-16 : Banc d'essai (Bassin de carène)..... | 74 |
| Figure III-17 : La maquette dans le bassin | 74 |

| | |
|---|----|
| Figure III-18 : Confirmation de TPC par méthode expérimental (1 cm) | 75 |
| Figure III-19 : Confirmation du tirant d'eau..... | 75 |
| Figure III-20 :Vérification de la stabilité de la maquette | 76 |
| Figure III-21 : Les masses utilisées dans nos expériences..... | 77 |
| Figure III-22 : Premier essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=5,3^\circ$)..... | 77 |
| Figure III-23 : Deuxième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=4,8^\circ$) | 78 |
| Figure III-24 : Troisième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=4,4^\circ$)..... | 78 |
| Figure III-25 : Quatrième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,8^\circ$) | 79 |
| Figure III-26 : Cinquième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,3^\circ$)..... | 79 |
| Figure III-27 : Sixième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,1^\circ$) | 80 |
| Figure III-28 : Septième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=2.7^\circ$)..... | 80 |
| Figure III-29 : Courbe de la stabilité transversale GM en fonction de déplacement..... | 83 |
| Figure III-30 :Courbe des moments de redressement en fonction de déplacement de la maquette.. | 85 |

Listes des tableaux :

Tableau I-1 : Mouvement du navire14

Tableau II-1 : Lois de calculs (Surface, déplacement, volume)39

Tableau III-1 : Le tableau des demi-ouvertures pour chaque surface de flottaison par centimètre69

Tableau III- 2 : Les résultats des essais expérimentaux81

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de la construction navale couvre l'ensemble de la production de différents types des navires, dans lequel nous choisissons d'étudier le type de yacht Riva Aquarama.

La construction d'un bateau est un processus de conception très similaire à celui utilisé lors de la conception d'autres produits d'ingénierie.

Au début de notre travail, nous avons des données référentielles pour une embarcation du yacht Riva d'une longueur hors tout égale à 2,5 mètres, à partir de cette longueur nous choisissons de réduire la forme globale (longueur, largeur, et le creux) par l'échelle de réduction de 0,28 pour la longueur de 0,7 mètre.

Nous utilisons le logiciel ANSYS module ICEM CFD R16.0 pour relever les dimensions et de les multiplier par l'échelle de réduction, en fin nous arrivons à faire la conception pour la maquette étudiée de 0,7 mètre.

Nous continuons de relever les dimensions géométriques réelles de cette maquette par le logiciel, et les valeurs relevées sont utilisées pour dessiner les trois vues du plan de formes, qui facilite de faire divers calculs qui sont : la surfaces de flottaisons et le volume de la carène et le déplacement de cette maquette.

Nous pesons la maquette et nous déduisons le volume de la carène.

Par le plan de formes nous calculons l'évolution du volume de la carène en fonction du tirant d'eau, et nous projetons la valeur déduite du volume de la carène pour trouver le tirant d'eau réel, la valeur du tirant d'eau est confirmée par essai expérimental.

Comme aussi même principe pour la surface de flottaison en fonction du tirant d'eau.

Le calcul de la surface de flottaison est nécessaire pour le calcul du TPC durant les opérations du chargement ou déchargement du navire afin de gérer la valeur de la marchandise et de préserver le franc bord comme réserve de flottabilité.

Nous calculons le TPC et nous allons vérifier aussi par un essai expérimental.

Nous entamons les travaux expérimentaux pour savoir de plus concernant la stabilité transversale à propos de l'influence du déplacement sur :

- Gîte α

- La stabilité transversale GM
- Moment de redressement
- Bras de levier GZ.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres, nous débuterons par la présentation des généralités sur le domaine de la construction navale, quelques notions de base de la construction des navires ainsi que la construction des charpentes. Dans le second chapitre nous présentons un rappel sur l'hydrostatique d'un flotteur et le principe de flottabilité et stabilité. Le troisième chapitre est consacré à l'étude de cas d'une maquette du yacht type Riva Aquaruma, avec une analyse des résultats.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Généralité sur l'architecture navale

Introduction

L'industrie de la construction navale englobe divers secteurs tels que la réparation navale, une industrie émergente, et elle est en train d'étendre ses activités aux énergies marines. Elle se concentre sur la construction de navires à forte valeur ajoutée et de spécificités très particulières, tels que des paquebots, des navires à grande vitesse, des sous-marins...etc.

Par conséquent, les professionnels de ce domaine présentent un large éventail de compétences, une grande capacité d'adaptation à l'innovation et sont confrontés à des niveaux de responsabilité très variés. Les techniques les plus avancées sont toujours mises en œuvre. Ces professionnels se retrouvent tant dans les chantiers navals eux-mêmes (ensembles) que chez les fournisseurs et les sous-traitants, qui représentent souvent plus la moitié de la valeur du navire. Par la suite, les tâches de l'architecte naval se divisent en deux catégories : la conception proprement dite du navire (carène, pont, voile, etc.) et tous les calculs qui y sont associés. Ce travail nécessite donc de solides connaissances en mathématiques, en physique, en résistance des matériaux, en dessin industriel et en informatique et tous les calculs qui y sont associés.

I-Construction navale

I-1 Définition

La construction navale est le processus de fabrication et d'assemblage des navires. On parle aussi de bâtiments maritimes ou de bâtiments nautiques (pas de bateaux).

La construction est l'un des processus impliqués dans l'acquisition d'un navire et se déroule dans un chantier naval. [1]

I-2 : Élément de la construction navale

La construction navale comporte les éléments suivants :

Charpentier-Fer :

Il est chargé d'assembler d'après les plans les différents éléments de la coque métallique après usinage ; il réalise les opérations de découpage, de réglage et d'agrafage nécessaires au montage de ces éléments.

Chaudronnier-Tôlier : son travail consiste à mettre en forme des tôles, des profilés métalliques d'après les plans qui lui ont été confiés.

Chef de projet : cet ingénieur dirige une équipe pour la réalisation d'une partie d'un grand ensemble au niveau de la conception, de l'étude ou de la réalisation.

Dessinateur en architecture navale : Le dessinateur travaille en étroite collaboration avec l'ingénieur de projet pour créer des dessins détaillés de toutes les pièces et établir la terminologie

Architecte Naval : Ce titre ne correspond pas à un titre officiel, mais à un métier choisi en option. Les rôles de ces ingénieurs sont également très diversifiés et s'articulent autour de deux fonctions principales. Dans le premier cas, l'ingénieur travaille avec toute l'équipe du bureau d'études.

Technicien Calculations Construction Navale : Aussi appelé Technicien Bureau d'Etudes ou Concepteur, il est chargé d'effectuer des calculs et, à partir de ceux-ci, de définir les caractéristiques des pièces utilisées en construction mécanique. Il travaille sous la direction d'un ingénieur de conception ou d'un chef de projet. Il est généralement spécialisé dans un domaine ou un autre : coques, structures de navires, hélices, équipements, etc.

Technicien d'agencement intérieur : il exécute les travaux d'aménagement et de finition qui rendent le bateau habitable.

Traceur de coque : Il reporte les formes sur les tôles à découper.

Peintre en construction navale : Peintres de la construction navale : Les travaux de peinture sont très importants dans la construction navale, et pas seulement pour des raisons esthétiques : la protection d'un navire contre la corrosion (surtout la rouille) dépend de la qualité de la peinture. De même, la propreté de la coque dépend des performances du navire et donc de la consommation de carburant du navire. Cependant, il existe des traitements de surface assez sophistiqués qui sont bien adaptés pour résoudre ces problèmes. A ce titre, c'est un métier très technique qui nécessite également le respect de règles de sécurité du fait de la toxicité de certains des produits utilisés.

Plombier : Il est responsable de tous les raccordements de fluides liés aux ingénieurs hydrauliques, chauffeurs, soudeurs et tuyauteurs.

Hydraulicien : il se charge des circuits des nombreux fluides utilisés à bord en relation avec les motoristes.

Soudeur : Il assemble les tôles et profilés dans la structure, ainsi que toute la tuyauterie du navire.

Manutentionnaire : les éléments à assembler du plus léger au plus lourd (plusieurs dizaines de tonnes) nécessitent des conducteurs d'engins roulants, portiques, grues.

Mécanicien : La motorisation primaire ou secondaire nécessite la présence d'installateurs et de régleurs.

Monteur : (Installateur) de nombreux composants livrés hors site par des sous-traitants et des fabricants d'équipements nécessitent des installateurs, des mécaniciens et des ingénieurs moteurs dédiés.

Oxycoupeurs : Ils pilotent des machines à commandes numériques pour la découpe des tôles et profilés métalliques.

Études : bureau confié à un ingénieur chef de projet.

Frigoriste : il se charge des équipements froids et climatisation.

Autres constructeurs navals : En plus des types de travail mentionnés ci-dessus, l'industrie de la construction navale a également des types de travail communs dans les industries de la métallurgie et des machines qui s'appliquent aux navires : tourneurs, meuniers, etc. [1]

I.3 Présentation du navire

Un navire est avant tout un flotteur, c'est un terme général qui englobe tous les types de bateaux conçus pour naviguer sur l'eau, que ce soit sur les océans, les rivières, les lacs ou autres plans d'eau. Ils varient en taille et en utilisation, allant des petits bateaux de plaisance aux immenses porte-conteneurs et porte-avions. Les navires sont utilisés pour diverses activités, telles que le transport de marchandises, de passagers, de pétrole et d'autres matières premières, la pêche, la recherche scientifique, les opérations militaires et le tourisme. Ils peuvent être propulsés par différentes méthodes, telles que des moteurs à combustion interne, des voiles. [1]

I-4 Définitions relatives au navire

Navire : Un navire est une construction humaine capable de flotter sur l'eau et de s'y déplacer, dirigé ou non par ses occupants. [2]

I-5 Activités de la construction navale

La construction navale est devenue progressivement une véritable industrie. Son activité principale consiste à répondre aux besoins de la flotte de commerce et de pêche, ainsi qu'à servir les marines militaires. Certains chantiers se lancent également dans l'activité de réparation navale.

Malgré des fluctuations conjoncturelles importantes, le marché de la construction navale présente une tendance expansionniste à long terme. Cette croissance est attribuable à l'augmentation continue de la population, à l'amélioration du niveau de vie et au développement de la démondialisation.

Parallèlement, l'industrie de la construction navale voit ses produits se diversifier, notamment dans le secteur offshore pour l'exploitation des hydrocarbures et des énergies marines renouvelables, telles que les éoliennes offshore. Ces nouvelles opportunités amènent l'intégration de technologies de pointe, ce qui modifie considérablement le travail des chantiers. Les méthodes de conception et les procédés de fabrication des navires font désormais appel aux technologies les plus avancées.

En somme, le métier de la construction navale consiste essentiellement à concevoir et à intégrer une multitude d'éléments techniques pour réaliser le système complexe que constitue tout navire moderne.

I.6 Les matériaux de construction d'un navire

La construction navale est un processus complexe et hautement technique. Cela nécessite la collaboration étroite de nombreux personnels qualifiés et d'une main-d'œuvre contractuelle qui travaille en général sous la direction d'un entrepreneur principal. Les navires sont construits à des fins commerciales ou militaires. Il s'agit d'un événement international où plusieurs grands chantiers navals se disputent des parts de marché relativement faibles. La coque est l'enveloppe extérieure du bateau, constituée de panneaux, la partie immergée est étanche et généralement conformée pour permettre au bateau de se déplacer facilement dans l'eau. Jusqu'à récemment, les coques des navires étaient entièrement en bois. En raison du développement de la science et de la technologie, les coques des navires sont désormais constituées de différents matériaux, chacun étant plus ou moins adapté à un type de construction spécifique. Il y en a beaucoup, y compris l'acier marin, qui a une haute résistance à la corrosion, généralement pour les remorqueurs et les grands navires marchands ou à passagers. Il existe aussi de l'aluminium, du bois et des composites (résine de fibre de verre laminée) pour les yachts ou les voiliers et tous les bateaux, donc leur utilisation n'est pas comme dans les grands navires en acier. [1]

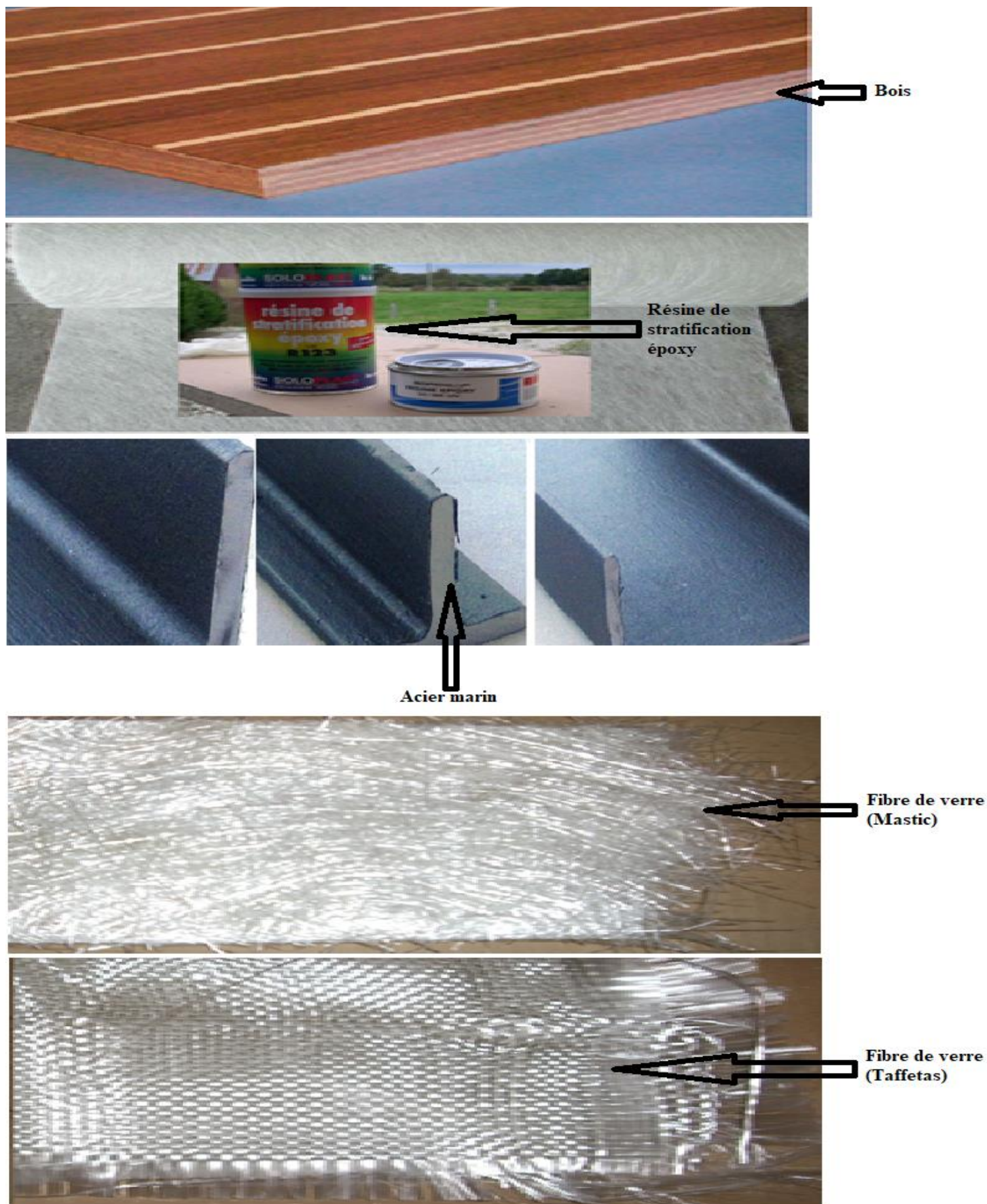


Figure I-1 : Différent type de matériaux utilisés dans la construction navale. [1]

I.7 Architecture navale

La conception navale est l'art de concevoir des navires en fonction d'un programme donné, et elle implique la collaboration entre les armateurs marchands, le personnel naval et les concepteurs de la construction navale. Les navires modernes représentent des défis techniques complexes et exigent une gestion de projets diversifiés. Les constructeurs navals sont chargés de superviser les aspects essentiels tels que la forme, la structure de résistance, l'aménagement intérieur et le logement.

La construction navale se concentre principalement sur les éléments de base du navire, tels que la coque, qui détermine la flottabilité, la stabilité, la propulsion, la navigabilité, la maniabilité et d'autres caractéristiques du navire. La théorie de la construction navale étudie systématiquement ces propriétés à travers la forme de la coque et est essentielle pour les concepteurs de navires.

La théorie de la construction navale est divisée en deux parties : la statique, qui suppose que le navire est stationnaire dans des eaux calmes, et le dynamisme, qui prend en compte le navire en mouvement.

La coque du navire est composée d'une série de structures généralement en métal, qui remplissent quatre fonctions principales : résister aux forces pendant le fonctionnement, assurer la sécurité contre les inondations et les incendies, contenir les dispositifs, l'équipement et les installations nécessaires, et enfin, fournir des subdivisions de confinement. Ces structures sont souvent liées et interdépendantes, avec le cadre comme la structure de base à laquelle d'autres éléments sont attachés.

La résistance structurelle est une autre science fondamentale pour les concepteurs de la construction navale, car elle garantit que le navire peut résister aux forces auxquelles il est soumis pendant son fonctionnement.

En fin de compte, la construction navale reste un art qui nécessite des choix difficiles à chaque étape du projet, afin de préserver l'harmonie des formes tout en atteignant un équilibre économique et technique dans l'ouvrage final. [3]

I-8 Déplacement du Navire

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 I-2). [4]

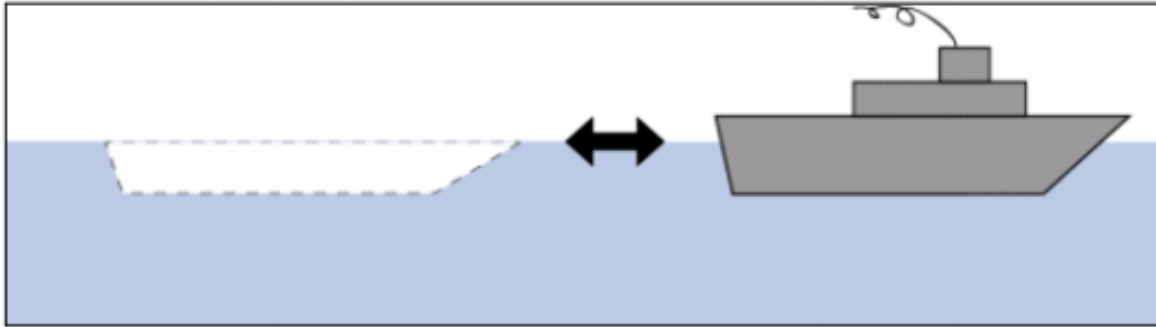


Figure I-2 : Déplacement du navire [5]

Le déplacement peut être défini par la formule suivante :

$$\Delta = \rho \cdot g \cdot \nabla [N] \text{ (1)}$$

$$\Delta = \rho \cdot \nabla [t] \text{ (2)}$$

ρ : La masse volumique d'eau.

g : L'accélération due à la gravité.

∇ : Le volume sous l'eau.

C'est le poids du volume d'eau déplacé par le navire et puisque la poussée d'Archimède est équilibrée par le poids du navire ; il est donc exprimé en tonne si non multiplier par la gravité (g), et dans ce cas il est exprimé en Newton (N). [4]

Un mouvement du flotteur peut être décomposé en deux mouvements simples : un **déplacement isocline** ; un **déplacement isocarène**. [5]

I-8-1 Déplacement Isocline

Déplacement vertical sans variation de gîte et d'assiette. Dans ce cas le volume final est différent du volume initial $\nabla_f \neq \nabla_i$. [6]

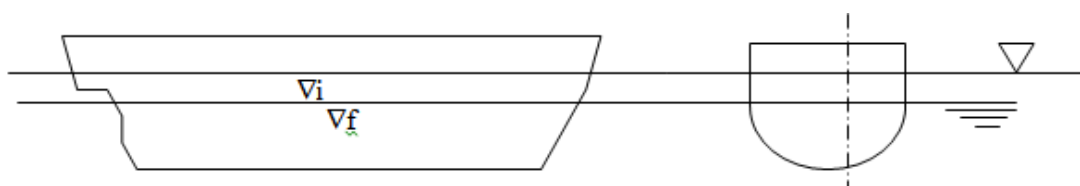


Figure I-3 : Déplacement Isocline. [11]

I-8-2 Déplacement isocarène

Inclinaison du flotteur en conservant le volume ($\nabla_f = \nabla_i$), donc avec variation de la gîte ou de l'assiette.[6]

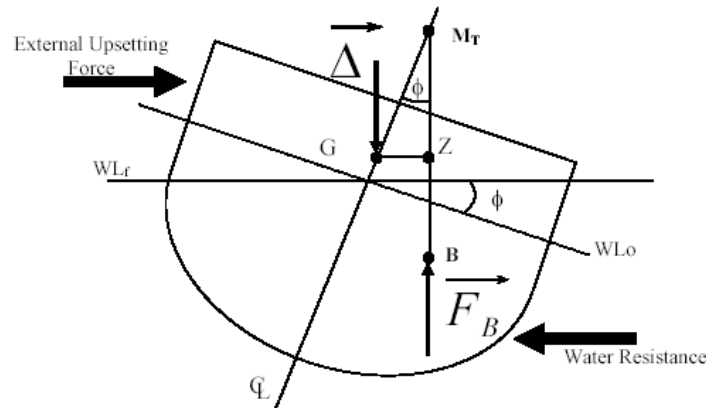


Figure I-4 : Déplacement Isocarène. [6]

Lors d'une inclinaison isocarène d'un flotteur on remarque que : Déplacement isocarène : ($\nabla_f = \nabla_i$),

- L'angle Θ est appelé la gîte, mesuré en degré ($^{\circ}$).

I-8-3 Déplacement lège (Tirant d'eau lège) : qui caractérise le navire éventuellement lesté dont la construction est achevée, équipé de tout le matériel nécessaire à la navigation, la propulsion et l'exploitation, à l'exécution de tous les liquides autres que ceux en circuit.

I-8-4 Déplacement en charge (Tirant d'eau en charge) : qui caractérise le navire chargé au maximum autorisé.

La différence entre le déplacement lège et le déplacement en charge est le port en lourd, c'est donc le poids maximum que peut transporter le navire. [1]

I-9 Plan de formes

Le rôle principal du plan de formes est de présenter la forme de la coque du Navire à une échelle réduite. [7]

Il contient trois vues, sur chaque vue on trouve divers courbes, ces courbes représentent les formes externes de la coque du navire selon les coupes, il a :

- 1- **Vue transversale** : présente les coupes transversales, ces coupes sont présentées par des **demis couples avant** (côté droit à la vue), et **demis couples arrières** (coté gauche à la vue), cette présentation de demis couples a pour objet d'être la vue claire.
- 2- **Vue longitudinale** : présente les coupes longitudinales, elles s'appellent **les longitudinaux**.
- 3- **Vue de dessus** : présente les coupes horizontales, ces coupes sont obtenues par l'intersection des plans d'eau avec la coque du navire, elles s'appellent **les lignes d'eau**, leurs présentations en demi puisque y a la symétrie.

Le plan de formes peut être dessiné par le logiciel approprié à l'architecture navale exemple comme Rhinocéros, ou tableau des demi-ouvertures. [7]

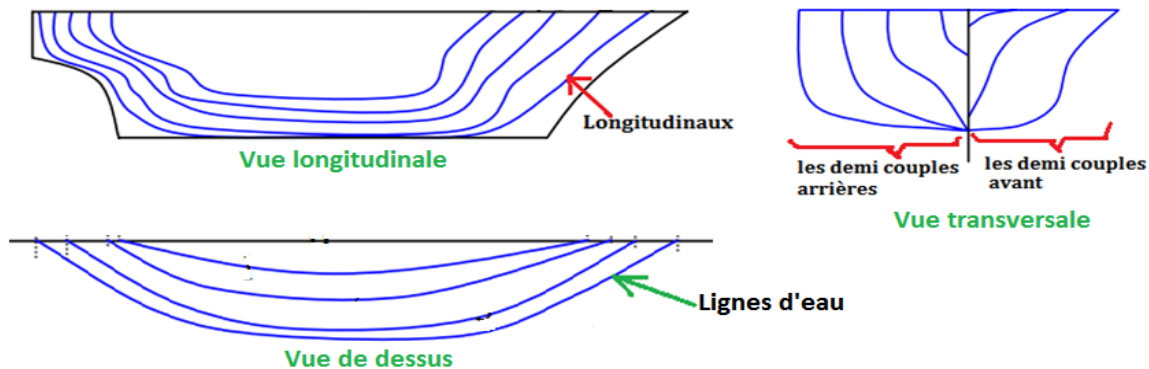


Figure I-5 : Plan de formes. [7]

I-10 Le navire dans son repère

I-10-1 Perpendiculaires

Les perpendiculaires avant et arrière : (respectivement forward et aft perpendicular en anglais) sont des droites verticales positionnées de manière arbitraire par l'architecte naval dès la première esquisse du navire. Il existe plusieurs usages pour définir leur position. Nous n'en citerons que deux :

- ✓ Les perpendiculaires sont placées à l'extrême avant et à l'extrême arrière d'une surface de flottaison (figure I – 6) ;
- ✓ L'axe de la mèche du safran est pris pour perpendiculaire arrière ;

La perpendiculaire avant est placée au point le plus arrière de la ligne d'étrave lorsque le navire est équipé d'un bulbe d'étrave (figure I – 7).

- Les perpendiculaires avant et arrière sont respectivement notées PPAV et PPAR.
- La perpendiculaire milieu, notée PPM (midship section), est une droite verticale située à mi-distance des perpendiculaires avant et arrière.

La distance séparant les perpendiculaires avant et arrière est appelée longueur entre perpendiculaires et notée L_{pp} (length between perpendiculars).

Elle correspond à la longueur de la surface de flottaison de référence lorsque les perpendiculaires sont définies ainsi. [8]

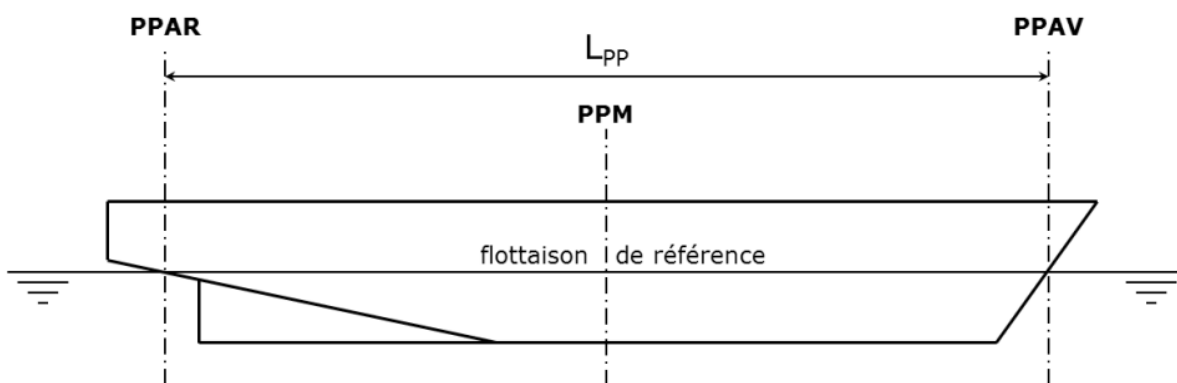


Figure I-6 : Perpendiculaires définies par une flottaison de référence. [8]

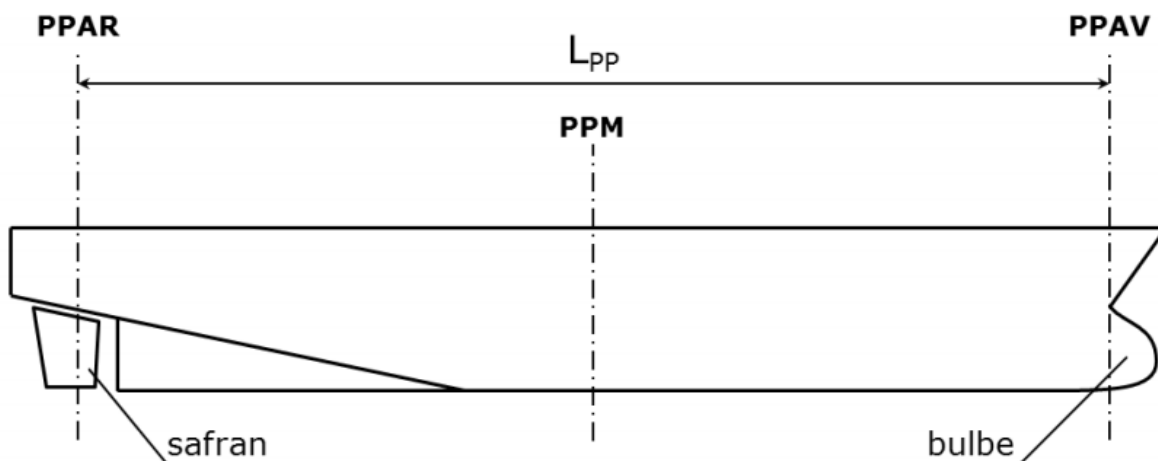


Figure I-7 : Perpendiculaires définies par le safran et le bulbe d'étrave. [8]

I-10-2 Ligne de base

La **ligne de base** est une droite horizontale, orthogonale aux perpendiculaires précédemment définies et située en partie basse du navire. Elle est notée BL (base line) sur les navires de commerce ou OH sur les navires de combat. Elle est parallèle à la surface de flottaison de référence lorsque celle-ci est définie. Cette dernière est alors notée 10H, découpant ainsi les formes immergées du navire en dix tranches horizontales. Si la quille du navire est orthogonale aux perpendiculaires, la ligne de base est généralement définie comme étant le dessus de la tôle de quille figure (I-8). [8]

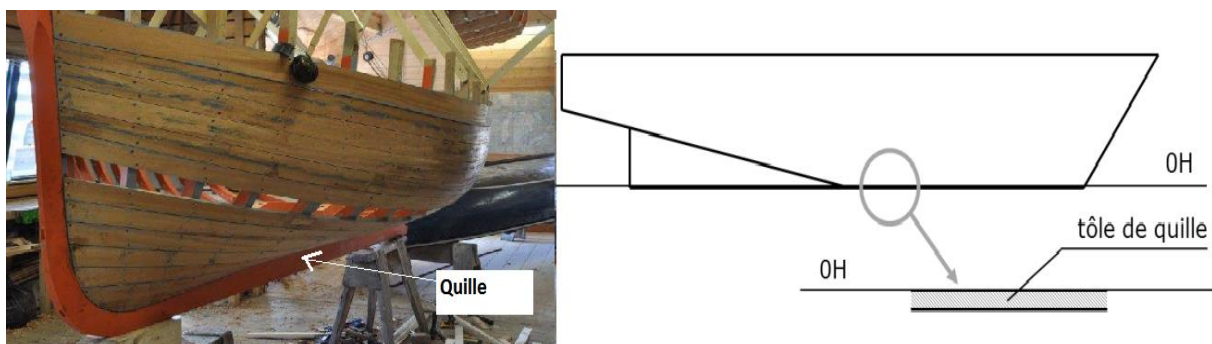


Figure I-8 : Ligne de base d'un navire à quille horizontale. [8]

I-10-3-Repère

La perpendiculaire arrière et la ligne de base sont utilisées pour définir un repère orthonormé lié au navire ; figure (I-9) :

- **L'axe X** est la ligne de base (OH) ; les coordonnées longitudinales sont croissantes vers l'avant ;
- **L'axe Y** est l'axe transversal du navire, normal aux deux autres axes ; les coordonnées transversales sont positives à bâbord.
- **L'axe Z** est la perpendiculaire arrière (PPAR) ; les coordonnées verticales sont croissantes vers le haut. [8]

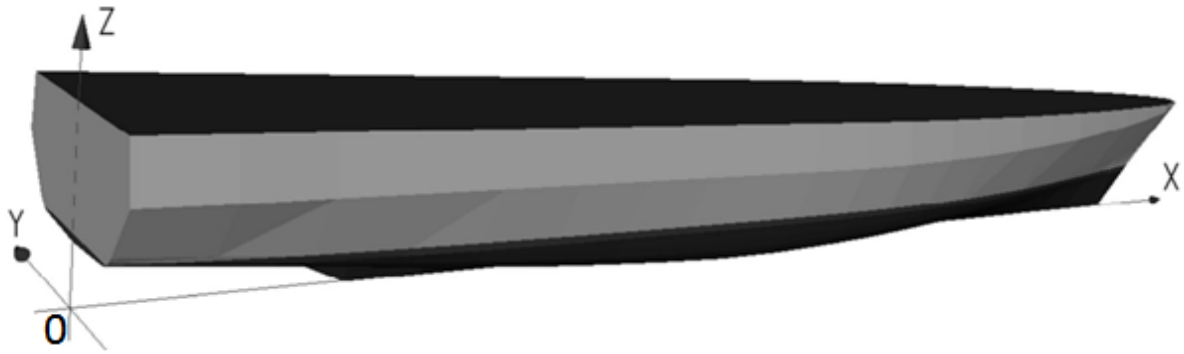


Figure I-9 : Repère (vue perspective). [9]

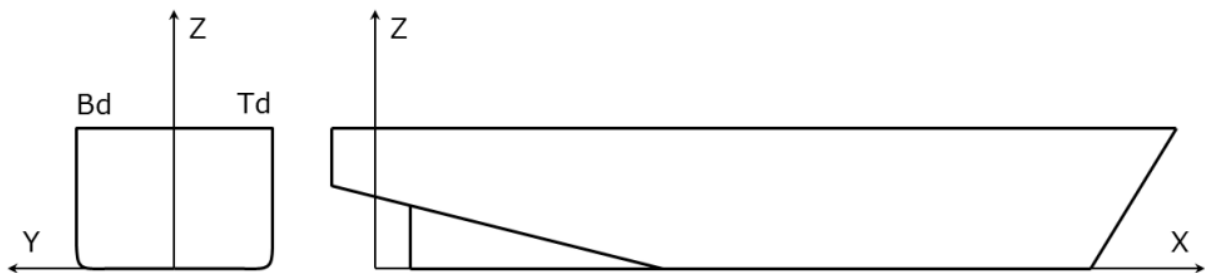


Figure I-10 : Repère (vue transversale et élévation longitudinale).

I-11 Les six (06) Mouvement du navire

Le navire connaît 6 mouvements ou degrés de liberté suivant les 3 axes :
Longitudinal, transversal et vertical.

Tableau I-1 : Mouvement du navire : [9]

| Translation suivant : | Rotation autour de |
|---------------------------|-----------------------|
| (OX) : Cavalement | (OX) : Roulis |
| (OY) : Embarquée | (OY) : Tangage |
| (OZ) : Pilonnement | (OZ) : Lacet |

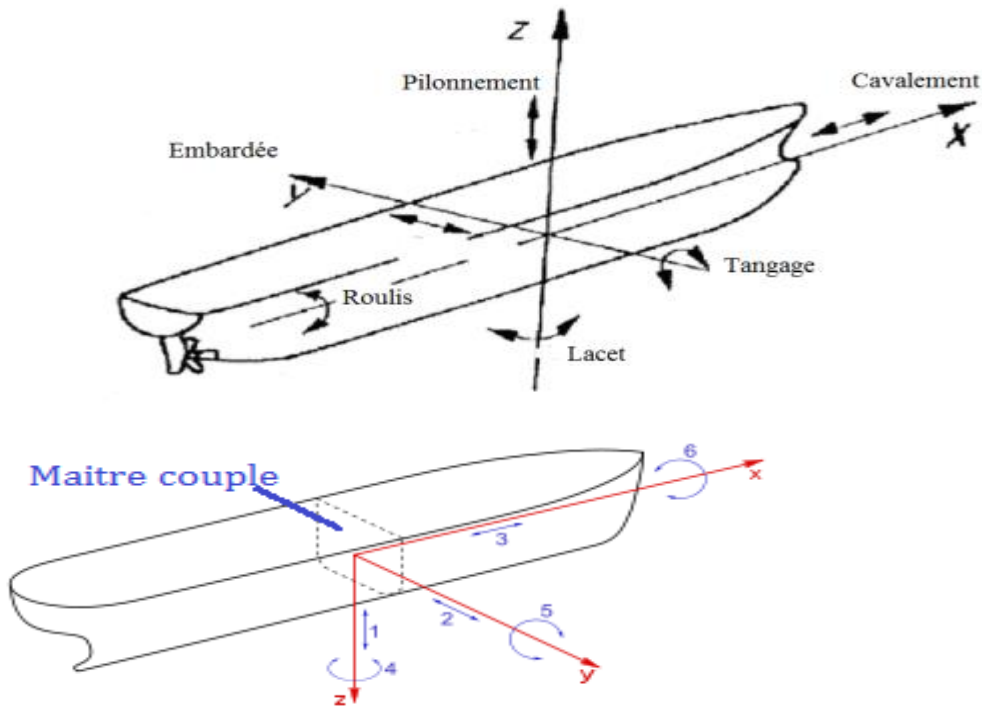


Figure I-11 : Les six mouvements du navire. [9]

Le cavalement :(surging) est un mouvement de translation suivant l'axe (OX).

L'embarquée :(swaying) est un mouvement de translation le long de l'axe (OY).

Le pilonnement :(heaving) est un mouvement de translation verticale du navire suivant l'axe (OZ).

Le roulis :(rolling) est un mouvement alternatif de rotation autour de l'axe longitudinal (OX) du navire. Il est généralement dû à une houle ou une mer qui prend le navire par le travers. Si le navire ne s'incline que d'un côté, on dit qu'il gîte.

Le lacet :(yawing)est un mouvement de rotation autour de l'axe (OZ) : il correspond à un changement de cap.

Le tangage :(pitching) est un mouvement de rotation autour de l'axe (OY) du navire, c'est en général un mouvement périodique autour d'une position médiane (l'assiette) causé par le passage du navire dans une houle venant de l'avant ou de l'arrière.

Remarque :

- Le mouvement roulis fait l'angle appelé la gîte, cet angle pris en considération dans la stabilité transversale ;
- Le mouvement tangage fait l'angle d'assiette, cet angle pris en considération dans la stabilité longitudinale. [10]

I-12 Cotés du navire

L'arrière : partie du navire ; vers la PPAR

Milieu : milieu du navire

L'avant : partie du navire ; vers la pointe d'étrave (b)

Bâbord : toute orientation du même sens que l'axe (OY)

Tribord : toute orientation négative sur l'axe (OY)

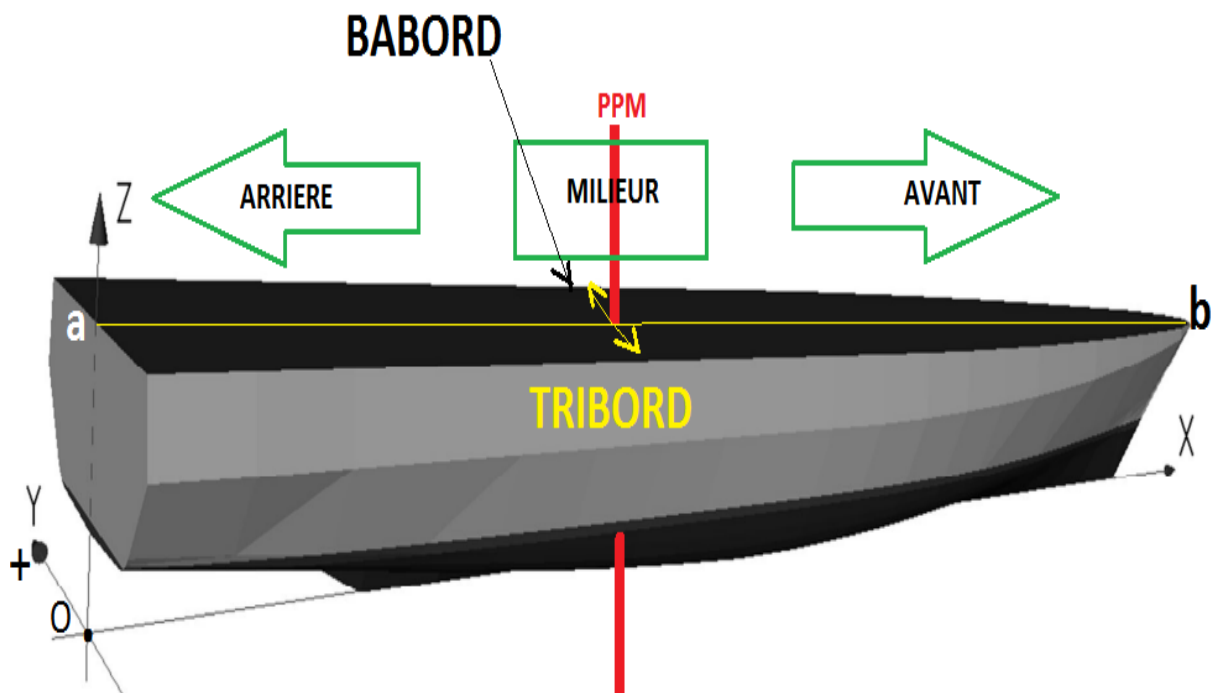


Figure I-12 : Cotés du navire

I-13 Dimensions caractéristiques du navire

I-13-1 Longitudinal du navire

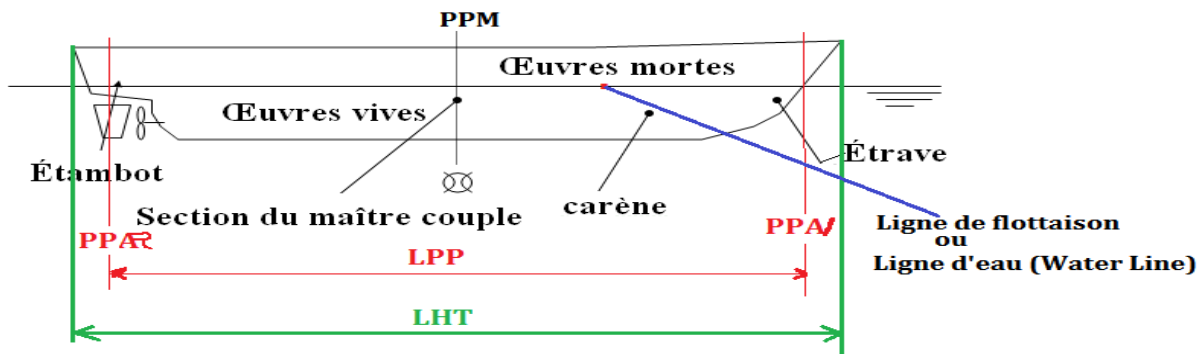


Figure I-13 : Vue Longitudinal de la section Longitudinale du navire.

LHT (length over all) : longueur hors tout du navire.

LPP : longueur entre perpendiculaire du navire.

Tonture : courbure longitudinale donnée au pont. [1]

Le bouge : Le bouge d'un bateau désigne la courbure transversale du pont ; la courbure longitudinale est appelée tonture. Il se mesure par la différence de hauteur entre le point le plus haut du pont et le point le plus bas au niveau du maître-bau. On parle parfois de cambrure, bien qu'il s'agisse d'un anglicisme formé à partir de camber.

La plupart des navires possède un bouge positif, ce qui signifie que les flancs du navire sont situés plus bas que le centre, afin que l'eau puisse s'évacuer facilement.

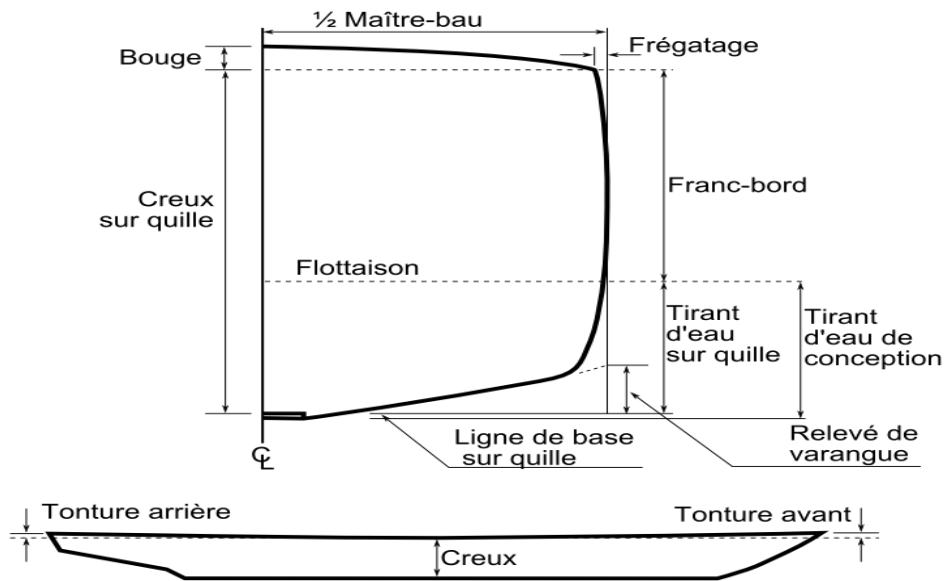


Figure I-14: Mesure du bouge sur une coupe au maître.

I-13-2 Transversal du navire

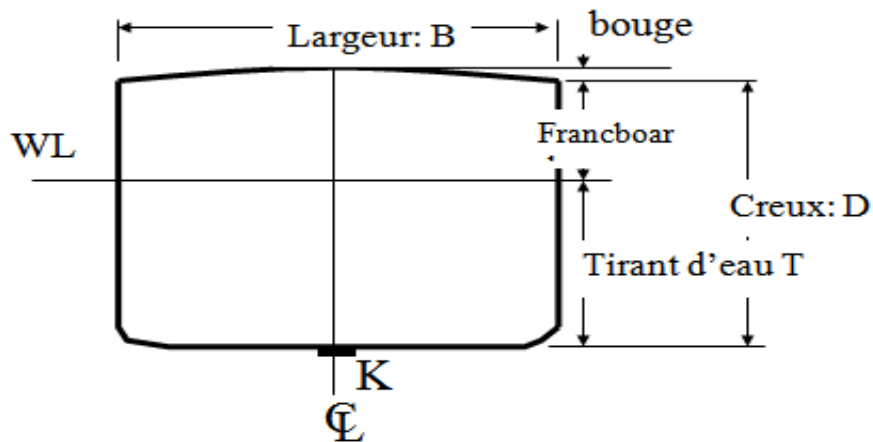


Figure I-15 : Vue de la section transversale du navire.

Creux (Depth)(D) : distance verticale mesurée de la quille au pont, prise au milieu.

Tirant d'eau (Draft)(T) : distance vertical de la quille à la ligne de flottaison.

Largeur (Breadth)(B) : largeur maximale du navire.

Franc-bord (Freeboard) : (réserve de flottaison) distance entre le pont et WL.

Bouge (Camber) : légère courbure transversal donnée au pont.

Bouge (Camber) : légère courbure transversale donnée au pont, pour empêcher la présence permanente d'eau sur le pont. [1]

I-14 Tirants d'eau

I-14-1 Définition

Le Tirant d'eau 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 de flottaison et le point le plus bas de la coque, usuellement la quille. [1]

Les échelles de tirant d'eau devraient être gravées sur les perpendiculaires, mais cela n'est pas toujours possible en raison des formes du navire. Les échelles avant, arrière et milieu (lorsqu'elle existe) se trouvent parfois à quelque mètre des perpendiculaires correspondantes. Ces distances sont connues et l'on tiendra compte pour déterminer les tirants d'eau réels. [1]

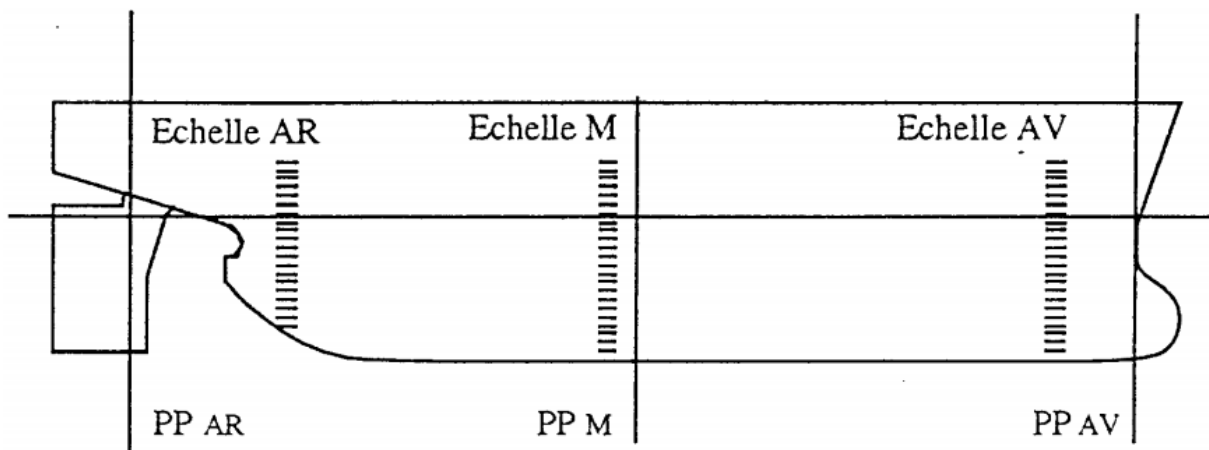


Figure I-16 : Echelles des tirants d'eau

On définit par les échelles ci-dessus ; les tirants d'eau suivant :

TAR : tirant d'eau arrière –valeur lue sur l'échelle arrière.

TAV : tirant d'eau avant –valeur lue sur l'échelle avant.

TM : tirant d'eau milieu–valeur lue sur l'échelle milieu.

Tm : tirant d'eau moyen
$$Tm = \frac{TAR+TAV}{2} \text{ -----(3)}$$

Différence : D, **D= TAR-TAV**

TM : est différent de *Tm*, si le navire présente à l'arc ou contre arc

Le navire présente de l'arc, si **Tm** > *TM*

Tm Le navire présente du contre-arc, **Tm** < *TM* [11]

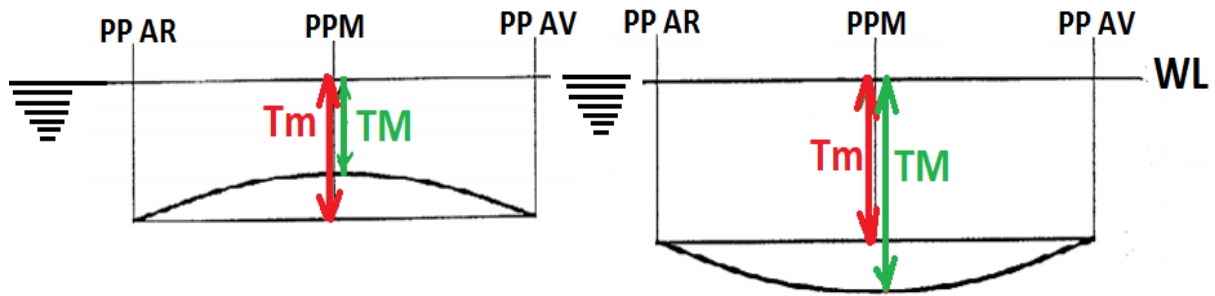


Figure I-17 : L'arc et contre arc du navire

Note : les causes de ces sollicitations sont diverses : la longueur du navire, sa charge, et la position de la houle le long du navire ; subit la fatigue de la coque. [11]

I-15 L'assiette du navire

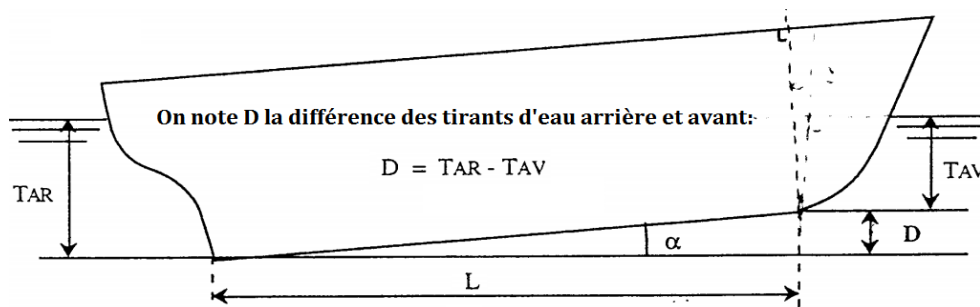


Figure I-18 : Assiette d'un navire

C'est l'inclinaison longitudinale du navire par rapport l'horizontal, elle se mesure par degré [°], par la relation suivante :

$$\tan \alpha = \frac{(TE_{AR} - TE_{AV})}{L_{pp}} \quad \text{_____} (4) \quad (\text{Angle caractérisé ici par tangente}) [12]$$

I-16 Dock flottant

Un quai (dock) flottant d'un navire est une structure maritime spécialement conçue pour permettre la mise à sec des navires afin d'effectuer des réparations, des inspections, des travaux d'entretien ou des modifications structurelles. Il s'agit d'une forme de cale sèche mobile et temporaire qui peut être partiellement ou totalement submergée pour accueillir le navire.

I-16-1 Composition

Le dock flottant se compose généralement de caissons ou de sections étanches en acier ou en béton, qui peuvent être remplis d'eau ou d'air pour réguler leur flottabilité. Lorsqu'il est utilisé, le dock flottant est positionné de manière à ce que le navire puisse être manœuvré à l'intérieur. Une fois que le navire est positionné avec précision, le dock flottant est partiellement vidé de son eau ou de son air, ce qui permet au navire d'être soulevé au-dessus de la ligne de flottaison et de reposer sur des supports solides à l'intérieur de la structure.

1-16-2 Principes

Contrairement à une cale sèche (ou forme convertie) qui est remplie et vidée, il s'agit d'une superstructure flottante qui est presque complètement submergée pour amener le bâtiment, puis élevée au-dessus de l'eau pour amener le navire à terre. Le système est basé sur le principe du ballast. Les quais flottants n'ont pas de système de propulsion et peuvent être déplacés d'un endroit à un autre à l'aide de remorqueurs. Les sociétés de classification contrôlent sa construction ainsi que le suivi et l'entretien réguliers.

1-16-3 Ballast

Un ballast est une capacité équipant certains navires destinés par remplissage ou vidange à en modifier la flottabilité ou l'assiette.

Le ballast est un lest permettant de gérer la stabilité et/ou l'assiette d'un navire. Il s'agit le plus couramment de plusieurs capacités pouvant être remplies d'eau de mer ou vidées au gré des nécessités, ce par un circuit de ballastage et à l'aide de pompe(s).

Lors de passage en forme de radoub les ballasts peuvent être vidangés par gravité en dévissant le(s) nable(s).

On appelle aussi communément ballast à combustible les capacités qui contiennent du combustible liquide. [13]

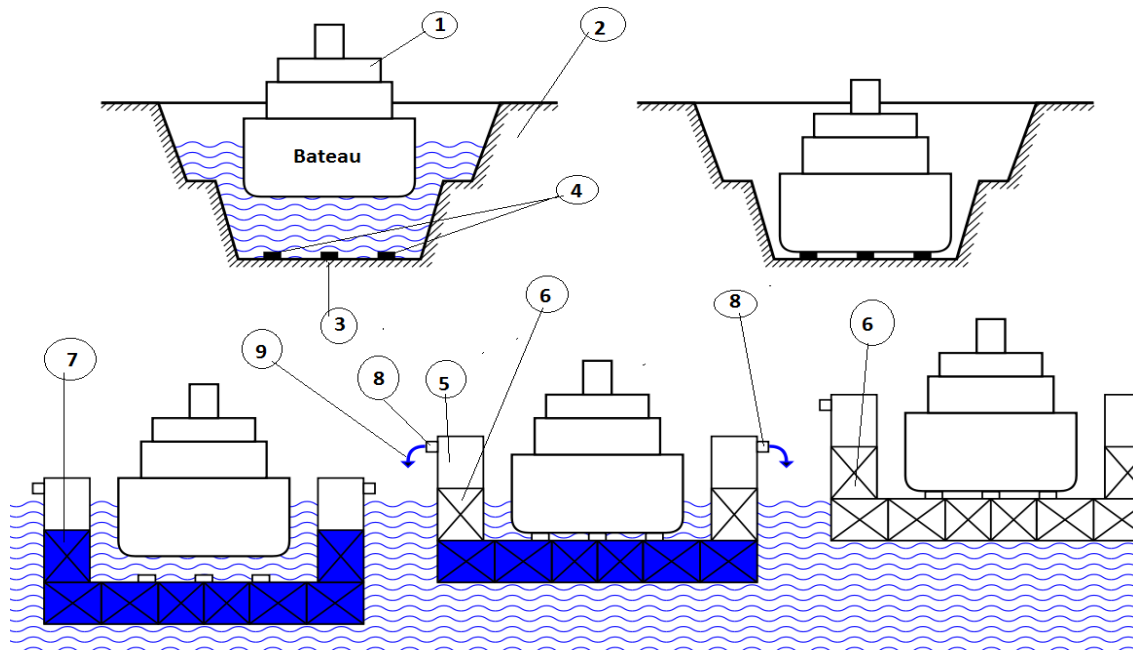


Figure I-19 : Fonctionnement comparé d'une forme de radoub et d'un dock flottant. [13]

- 1 : bateau (engin maritime flottant).
- 2 : dock flottant.
- 3 : tins.
- 4 : berceaux.
- 5 : salle machines.
- 6 : Ballastes.
- 7 : l'eau de mer.
- 8 : pompes d'eau de mer.
- 9 : sortie d'eau de mer.

Lorsqu'un navire entre dans le Dock flottant, il est positionné entre les sections flottantes qui se déplacent pour s'adapter à la taille du navire. Une fois que le navire est correctement positionné, les sections du Dock flottant sont abaissées, ce qui permet au navire de reposer sur la surface de travail. Cela crée une plateforme stable pour effectuer les opérations de chargement, déchargement, réparation ou construction.

1-16-4 Avantages

Le Dock flottant présente plusieurs avantages. Il permet d'effectuer des réparations et des travaux d'entretien sur les navires sans avoir à les mettre hors de l'eau, ce qui peut être plus rapide et économique. De plus, il offre une plus grande flexibilité pour l'accueil de navires de différentes tailles, car les sections du Dock peuvent être ajustées en conséquence.

Il peut être déplacé vers différents endroits, ce qui en fait une solution pratique pour les ports qui ne disposent pas de cales sèches permanentes ou pour les opérations de réparation en mer.

De plus, sa capacité à être partiellement submergé facilite l'entrée et la sortie des navires. [7]

I-17 Charpente du navire

Le navire a une forme similaire à celle d'une poutre, la figure (I-24) représente la similitude entre une section transversale de navire et la poutre en « I », ce type de poutre est la mieux adaptée au chargement de flexion à cause de son moment d'inertie élevé par rapport à la ligne neutre, Les semelles et l'âme sont constituées :

- En premier lieu par des plans de tôles assemblées entre elles appelés bordés ; cette appellation s'applique à tout plan de tôle.
- En second lieu par des réseaux de renforts, raidissant les bordés, appelés membrures.

La structure du navire est composée en 3 parties par principe sont :

- La charpente du fond ;
- Les murailles ;
- Le pont principal ;

Ces éléments constituent le bloc et ce bloc assemblé par d'autres blocs par les joints de soudure. [1]



Figure I-20 : construction de la coque du navire. [1]

I-17-1 Construction de la coque du navire

La coque du navire est l'élément constitué l'enveloppe extérieure du navire. C'est la partie la plus importante de la structure du navire, car elle assure à la fois : la flottabilité, l'étanchéité, et la solidité longitudinale.

Les parties de la coque qu'elle recouvrait, sont :

- Bordé de fond ;
- Muraille ;
- Bordé de pont ;

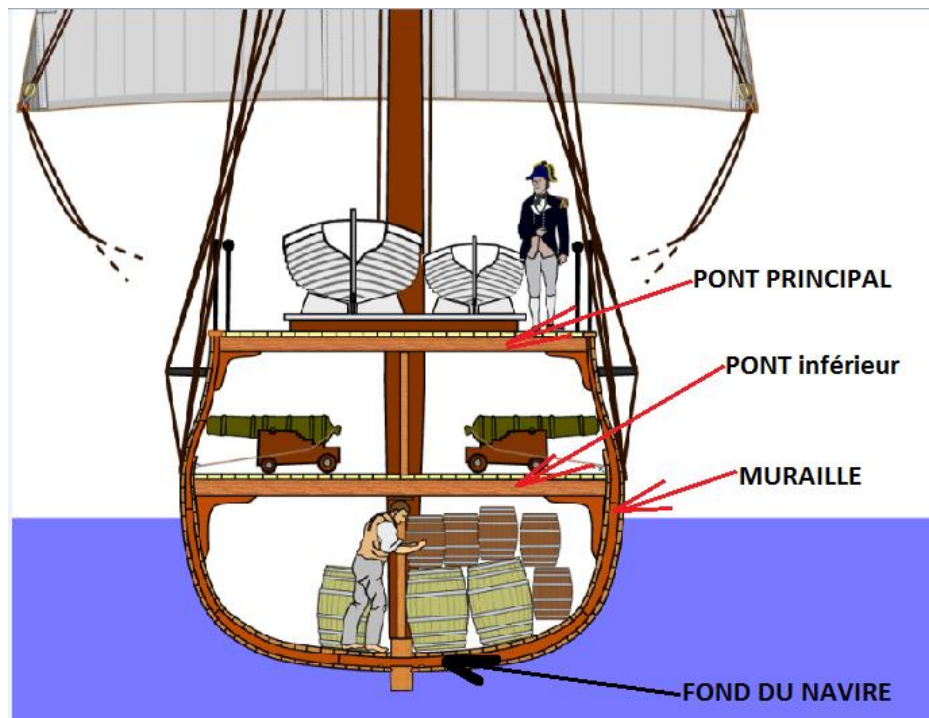


Figure I-21 : les trois parties de la coque [1]

Le bordé est constitué par des **Virures** qui sont des assemblages successifs de tôles soudées bout à bout de l'avant à l'arrière, et ces virures sont soudées à l'ossature du navire dans chaque une des trois parties du navire.

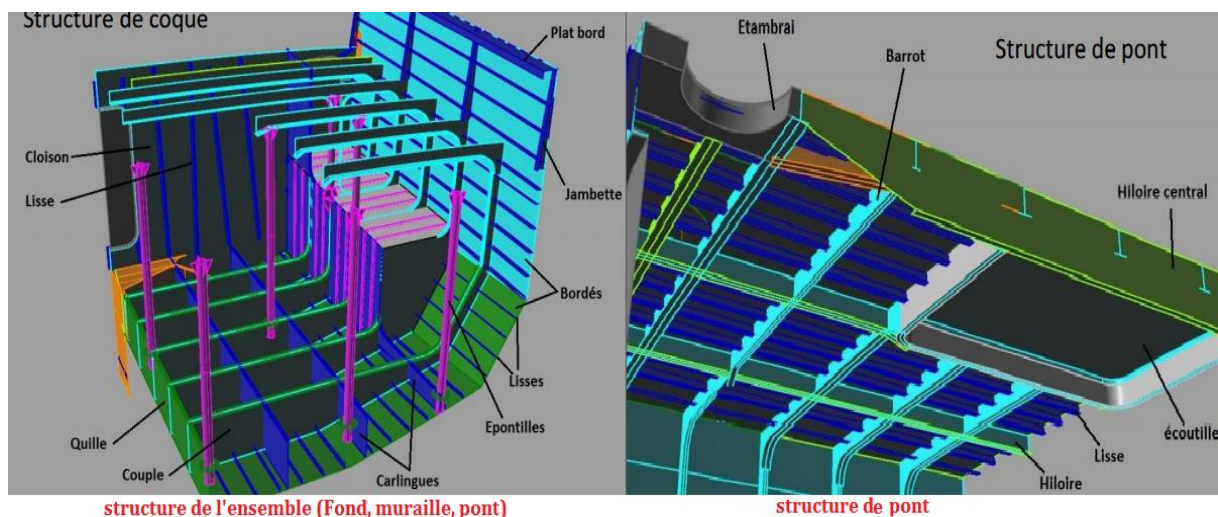


Figure I-22 : Exemple type de coque échantillonnée.

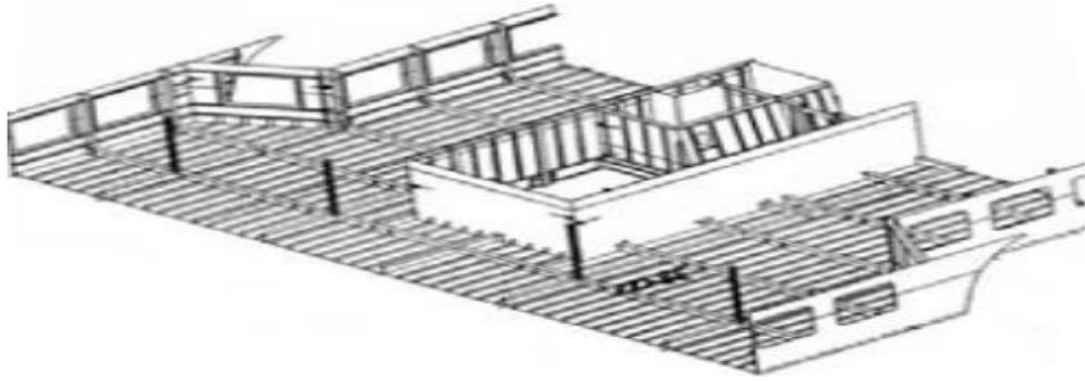


Figure I-23 : Panneau d'un navire.

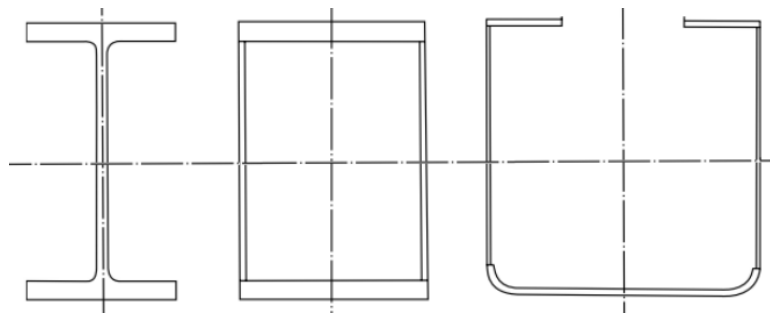
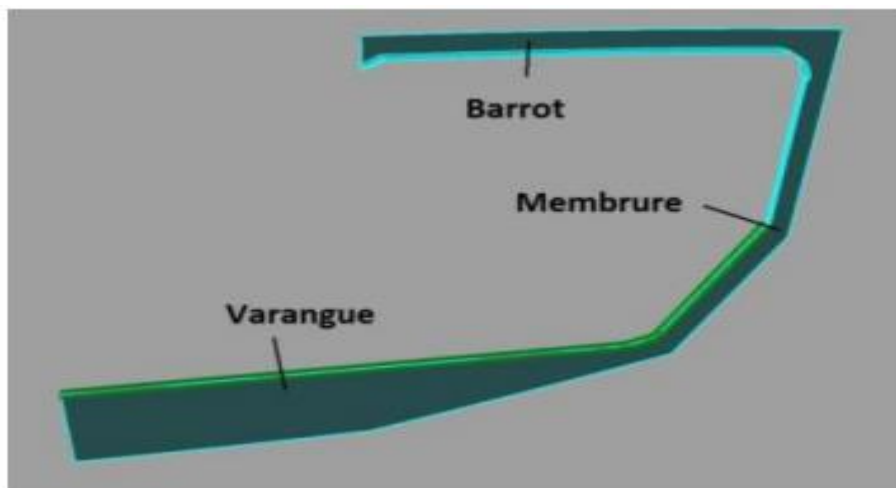


Figure I-24 : La similitude entre le navire et une poutre I.



FigureI-25 : Exemple type de couple

Pont : Partie du flotteur qui le ferme par le dessus.

Bordé : Partie de la peau extérieure (murailles) de la coque (généralement des tôles ou des lames de bois).

Fond : Partie du fond du navire, qui le ferme par-dessous de l'ensemble.

Dans la construction navale l'assemblage successif des tôles entre elles par un joint de soudure forme une bande continue on l'appelle une virure, ces bandes sont renforcés par des raidisseurs longitudinaux ou transversaux qui serviront comme appuis intermédiaires.

I-17-2 Structure du navire

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la structure se compose de :

I-17-2-1 Charpente du Pont

La structure du pont est renforcée par des profilés qui forment l'ossature qui serve à la fixation des virures (successions de tôles), ces profilés sont placés longitudinalement et transversalement sont :

- Barrots :

Ce sont des profilés transversaux qui relient les extrémités supérieures des membrures et formeront ainsi l'ossature transversale du pont, figure (I-26).

- Hiloires :

Ce sont des profilés longitudinaux qui, combinés aux barrots, formeront l'ossature longitudinale du pont.

- Lisses :

C'est un terme très général pour identifier tout profilé longitudinal de faible dimension qui peut servir à plusieurs usages. On emploie ce terme plus spécifiquement dans la construction longitudinale.

- Gousset de pont :

Gousset situé à l'extrémité des barrots qui relie le barrot et la membrure au bordé de coque.

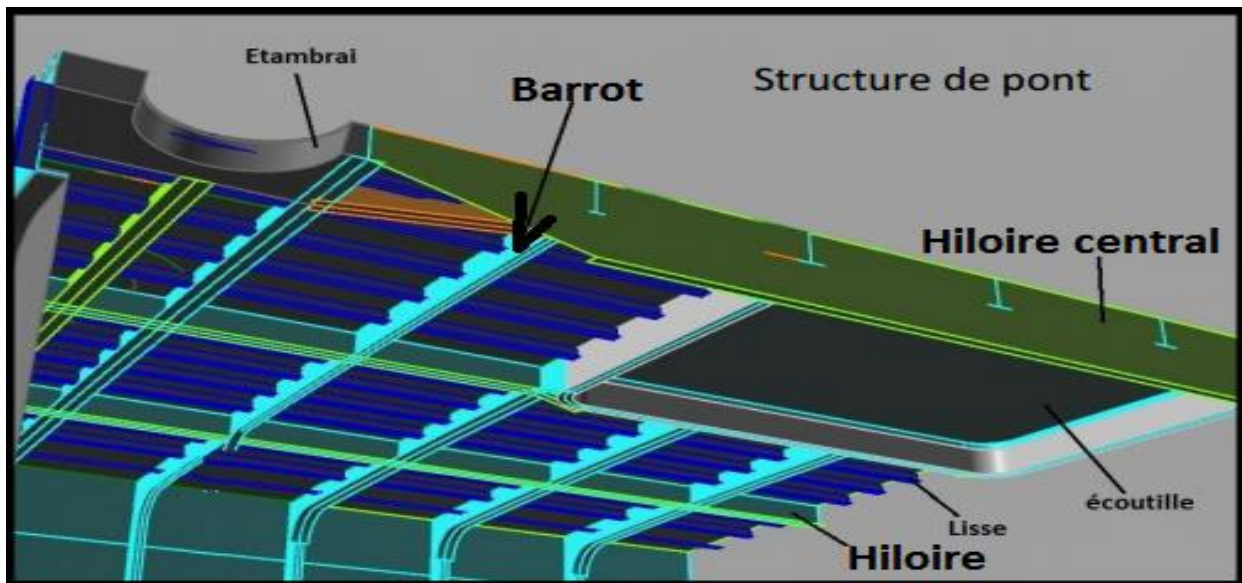


Figure I-26 : Structure du pont.



Figure I-27 : structure de Gousset.

I-17-2-2 Charpente Muraille et Cloison

Les murailles : elles représentent l'âme de la poutre navire en assurant une enveloppe étanche, ce sont des profilés verticaux, qui forment l'ossature de la partie verticale de la coque. Le type et l'espacement des membrures varient beaucoup selon le type de construction du navire.

Elles se composent de :

Poutres de renforcement longitudinal

Serre des murailles : sont des poutres de différents profilés, et qui sont soudées le long des murailles, pour fixer les membrures.

Poutres de renforcement transversal**- Membrures :**

Ce sont des profilés verticaux, qui forment l'ossature de la partie verticale de la coque. Le type et l'espacement des membrures varient beaucoup selon le type de construction du navire (figure I-28).

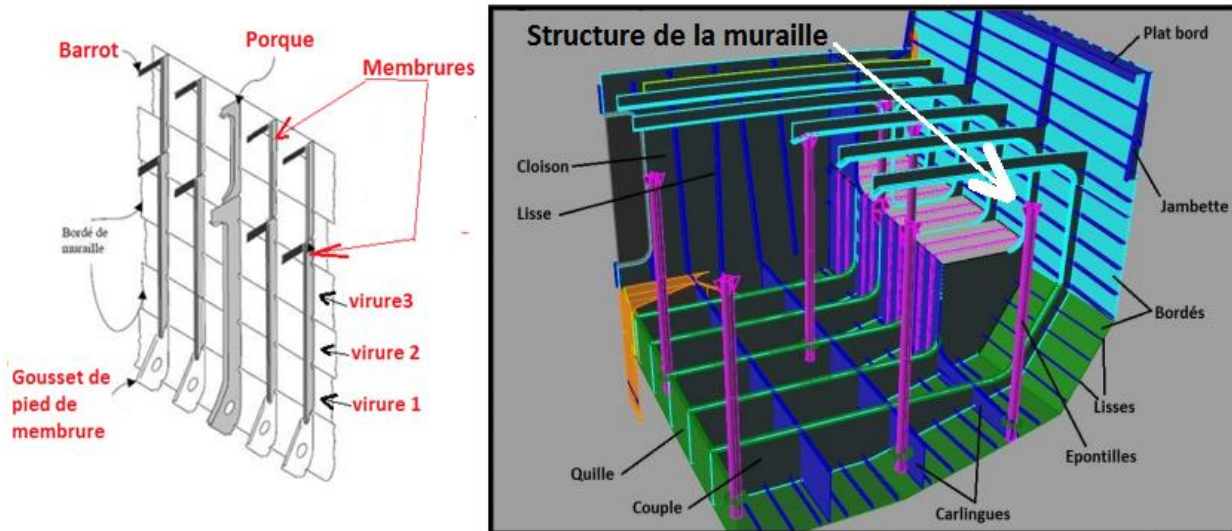


Figure I-28 : structure de la muraille

- Porques :

Ce sont des profilés surdimensionnés qui peuvent remplacer les membrures à certains endroits du navire.

- Les cloisons :

Le rôle principal des cloisons est d'assurer la flottabilité du navire si un compartiment est inondé. Ces cloisons transversales sont étanches par les joints de soudure continus aux ponts, afin d'empêcher l'eau qui remplit le compartiment qui subit une brèche. Comme le cas du navire de la figure (1 – 29), ses cloisons n'ont pas d'étanchéité avec les ponts c'est pour ça l'eau du compartiment inondé suit son trajet jusqu'à l'inondation total du navire.

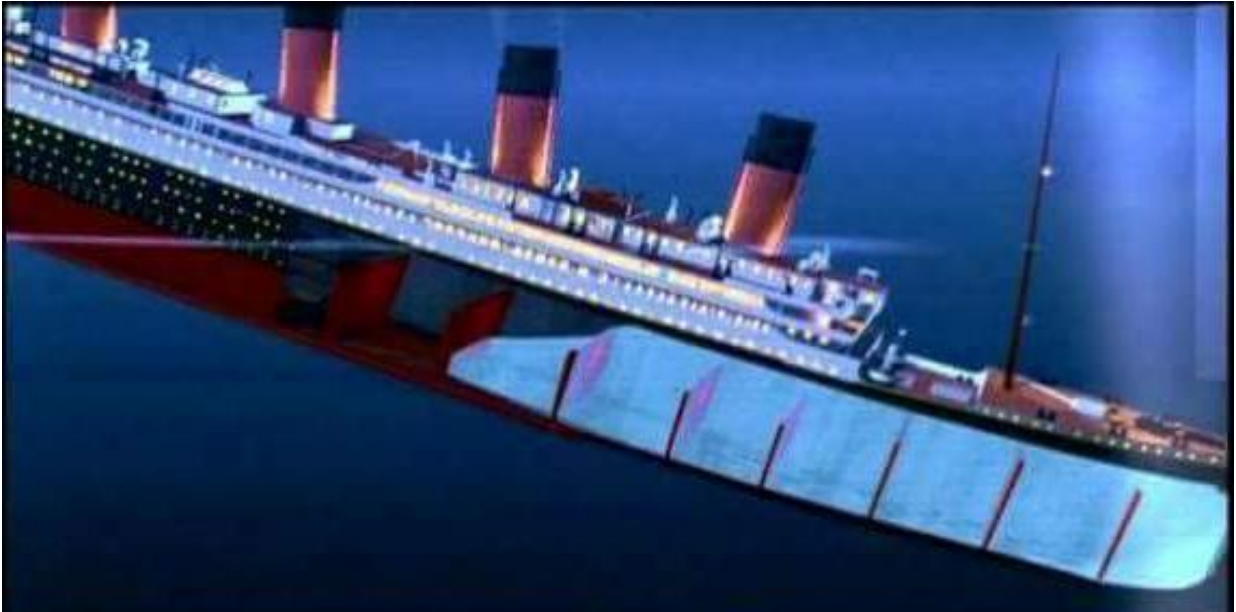


Figure I-29 : Cloisons transversales du navire.

Les cloisons sont des éléments intérieurement raidis est qui entre dans la construction intérieure de la coque navire, le but de ces éléments est défini selon leurs emplacement et de leurs dimensions. Selon l'orientations des renforts les cloisons transversales, ce devisent en deux types, cloison raidis avec des membrures primaires verticale, figure(A) et des membrures primaires horizontales, figure (B), sont les solutions les plus employée, elles assurent le compartimentage de la coque dans le sens transversale et la résistance à la tension intérieurs dans leurs plan dû au chargement et déchargement de la cargaison, par contre les cloisons longitudinales, assurent la résistance longitudinale et elle diminue l'effet de surface libre dans le cas des navires qui transporte les produits liquide comme les pétroliers.

Les cloisons garanties d'une façon générale le support du poids des ponts et des équipements sur les ponts, augmenter la rigidité pour résister à toutes les conditions d'exploitation du navire, la prévention contre l'envahissement et elles réduisent la vibration de la structure.

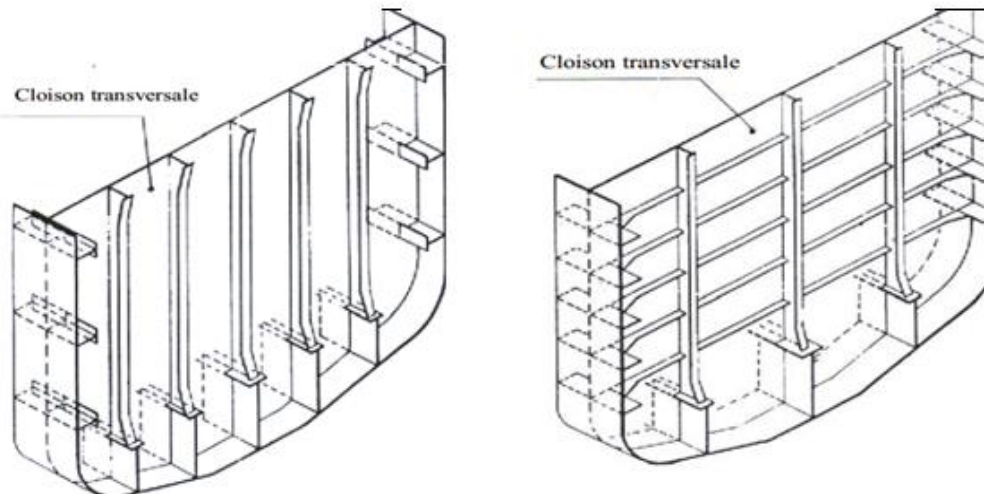


Figure (A) : Cloison transversale membrure primaires verticale.

Figure (B) : Cloison transversale-membrure primaires horizontales.

Figure I-30 : Types de Cloisons transversale-membrure

I-17-2-3 Charpente Fond

- Quille :

La quille est un profilé, ou un montage de profilés, installé longitudinalement, qui forme la base de la structure du navire. La quille correspond toujours à la ligne d'axe du navire.

Elle contribue fortement à la résistance longitudinale et distribue efficacement les efforts localisés lors de la mise en cale sèche du navire. Il existe deux types de quilles dans la construction de navires d'une certaine taille, soit la quille plate et la quille en caisson, (figure I-31).

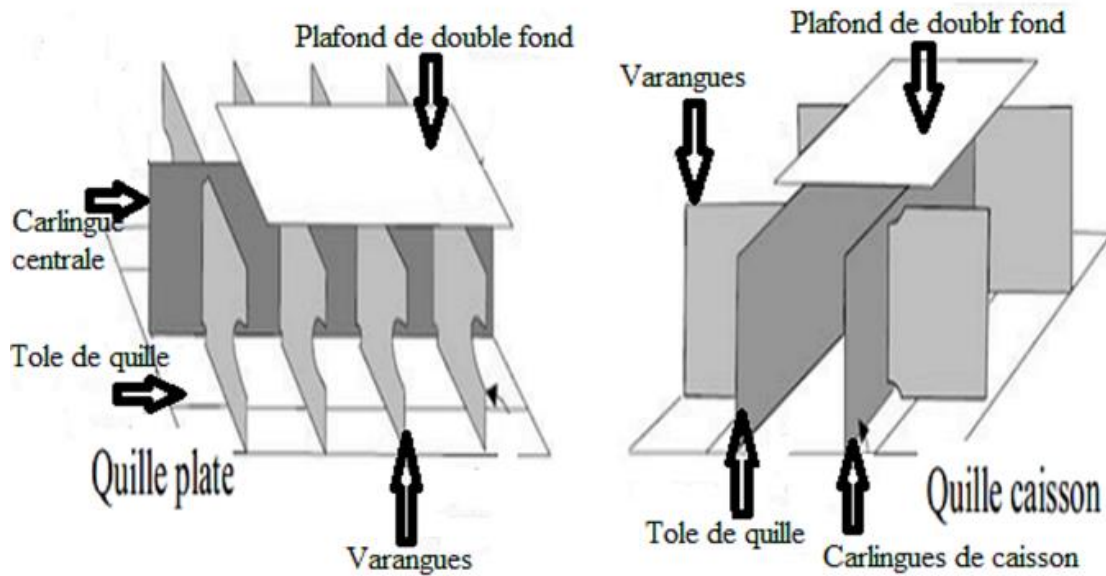


Figure I-31 : Différents types de quilles.

- Carlingues :

Une carlingue est un profilé longitudinal qu'on retrouve dans la construction du fond du navire.

Elles peuvent être étanches ou non et elles peuvent se retrouver au-dessus de la quille (carlingue centrale) ou à distances égales de celle-ci (carlingues latérales). Elles peuvent être continues ou peuvent être coupées par les varangues (carlingues intercostales).

La carlingue centrale sera toujours continue et doit être reliée à la quille par une soudure continue.

Les carlingues doivent se prolonger le plus loin possible de l'avant vers l'arrière du navire, (figure I-32).

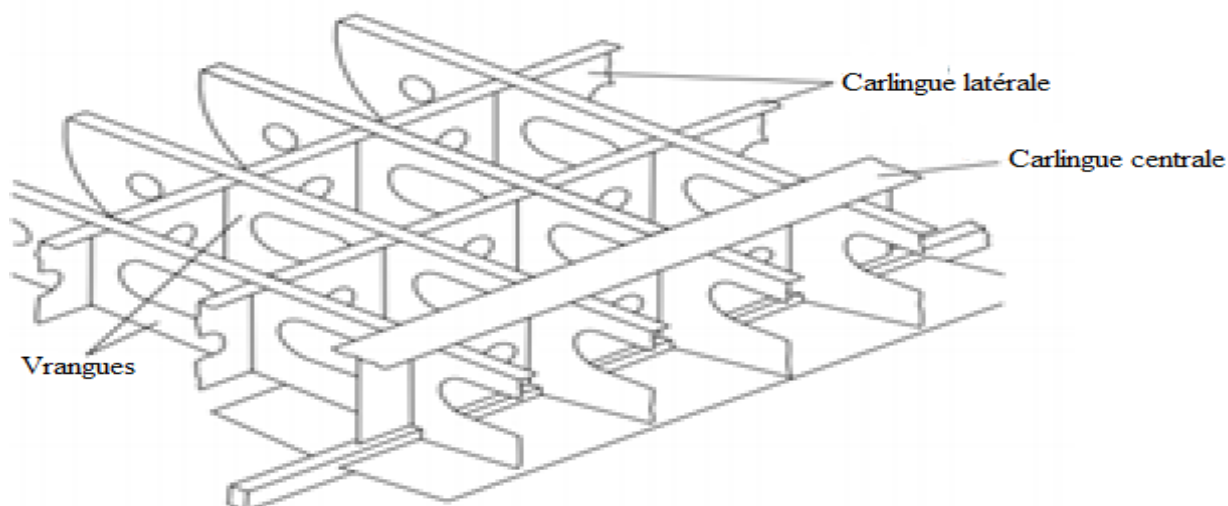


Figure I-32 : Carlingue centrale et latérale.

- Varangues :

Ce sont des profilés transversaux qui seront donc montés perpendiculairement à la quille et aux carlingues. On retrouve trois types principaux de varangues, la varangue étanche, la varangue pleine et la varangue cadre, (figure I-33).

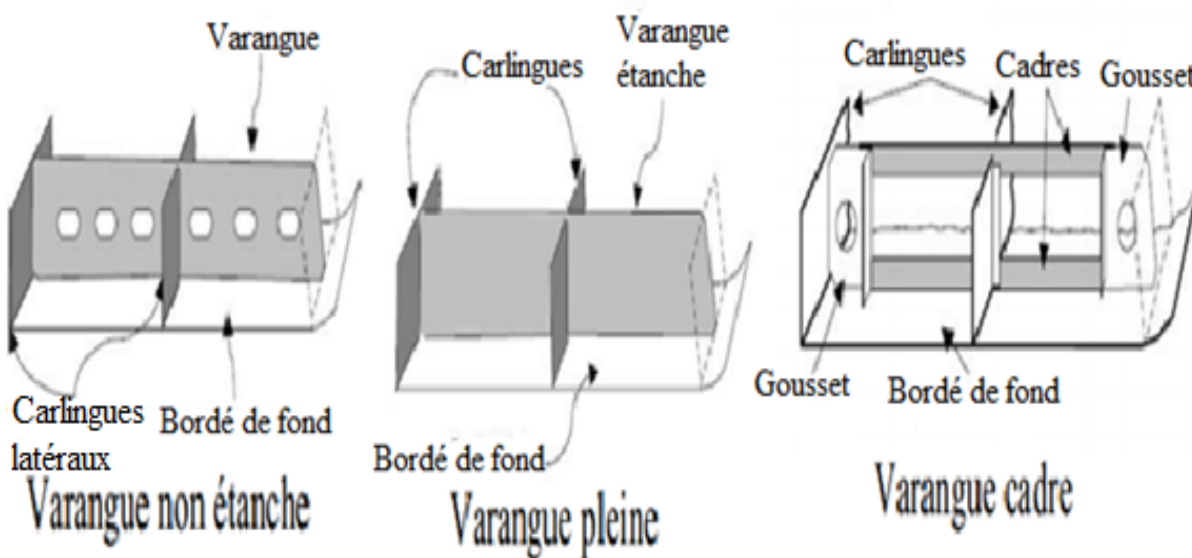


Figure I-33 : Différents type de varangues.

- Double fond :

Le double fond est l'espace étanche compris entre le bordé de fond et le plafond de double fond. Sa hauteur est variable, selon la grosseur et le type de navire mais, elle se situe généralement entre 0,75 et 1,5 mètres.

Le double fond est divisé en plusieurs compartiments étanches par des varangues et carlingues étanches. Ces compartiments peuvent être utilisés pour l'entreposage de carburant, d'huile et d'eau de ballast.

On utilise souvent ces compartiments pour corriger la gîte et l'assiette du navire.

Le double fond préserve l'étanchéité du navire lorsque le bordé de fond est endommagé. Le plafond de double fond augmente considérablement la résistance longitudinale du navire et forme une plate-forme qui supportera la cargaison et la machinerie du navire.



Figure I-34 : Double fond

- Bordé de bouchain

Tôle longitudinale qui relie le bordé de muraille au bordé de fond.

La construction avec double fond offre plusieurs avantages par rapport à celle du fond simple. Cette structure est bien adaptée pour résister aux pressions exercées par la mer et pour reprendre les tensions de flexion de navire en arc. Elle loge des réservoirs pour fluides tels que le combustible, l'eau non salée et l'eau salée de ballastage. Cette structure est également résistante aux efforts d'échouage et en cas d'accidents. Enfin, elle offre un fond intérieur libre de raidisseurs, ce qui facilite le nettoyage des cales.

Différents types de fond :

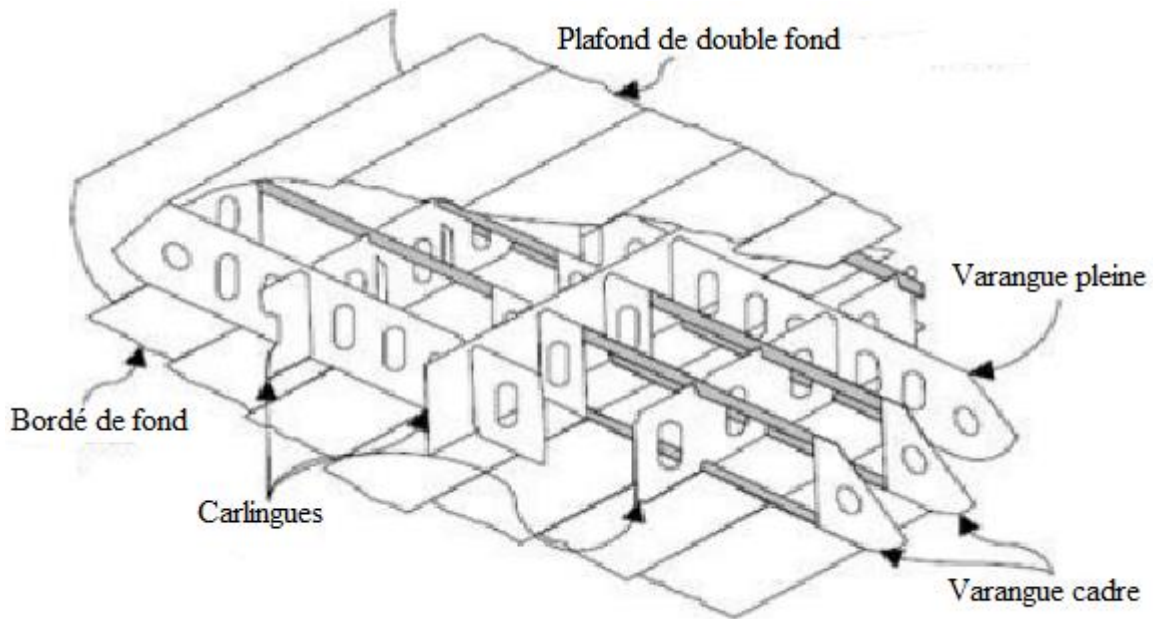


Figure (A) : Double fond dans le système transversal.

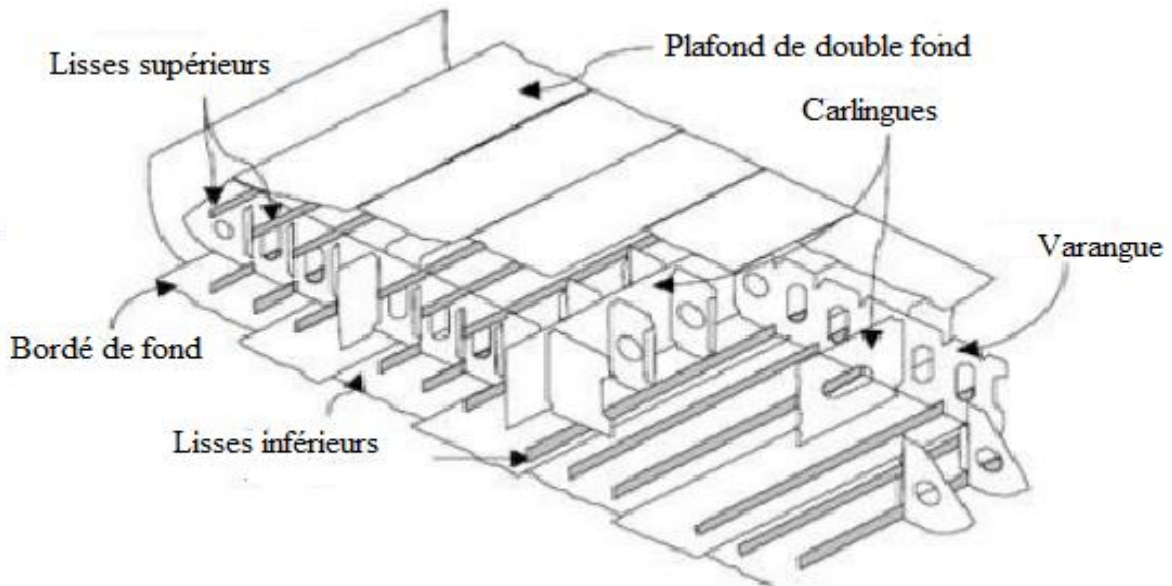


Figure (B) : Double fond dans le système longitudinal.

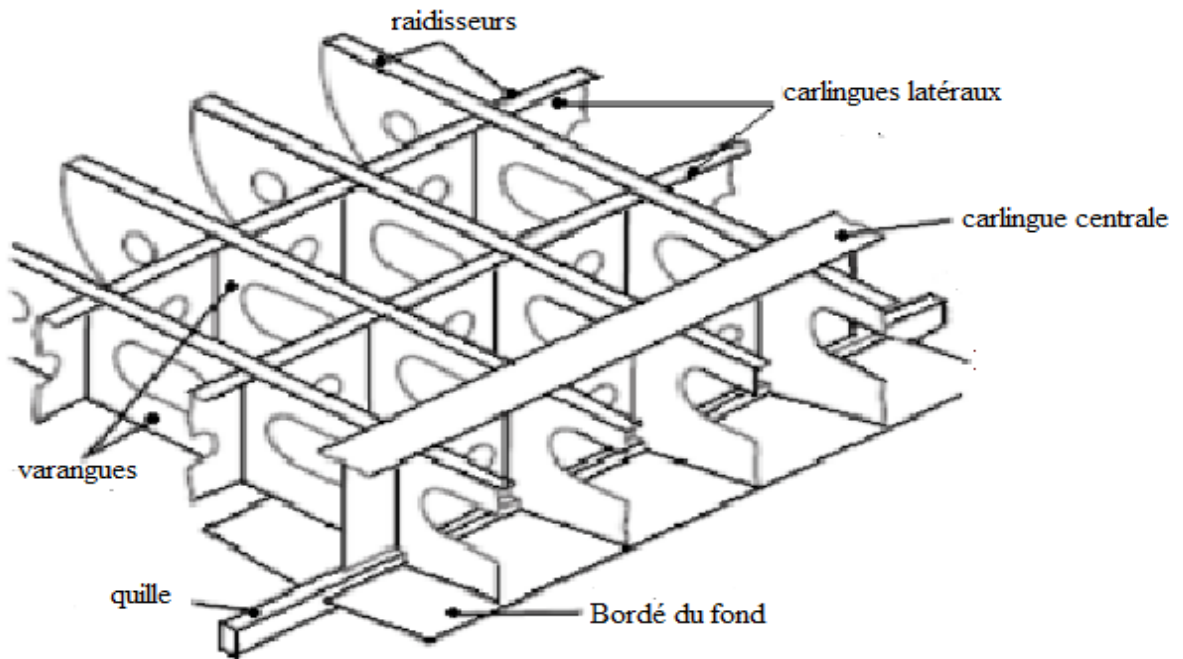


Figure (C) : Fond simple.

Figure I-35 : Types des fond

I-18 TYPES DE PROFILS UTILISES EN CONSTRUCTION NAVALE

- Profils usuels :

La (figure I-36) illustre un certain nombre de profilés généralement utilisés dans la construction navale moderne.

La section la plus efficace est celle en « T » mais elle offre des désavantages pratiques :

- Elle assure un drainage difficile dans les réservoirs ;
- Elle difficile à souder lorsqu'elle est petite dimension ;
- Elle nécessite des découpes plus importantes lorsqu'elle traverse une autre structure et un travail de solidarisation plus important lorsqu'elle supporte une autre membrure.

Les tests de rupture montrent qu'elle résiste mieux à la flexion que les autres profilés grâce à sa forme symétrique.

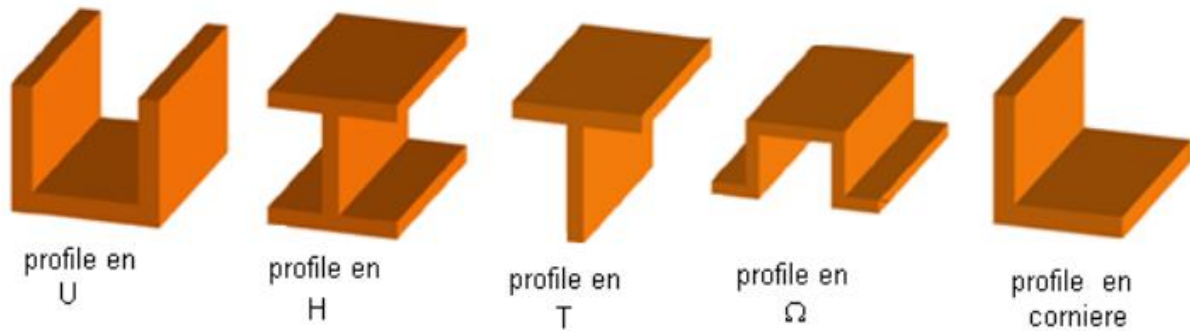


Figure I-36 : Types usuels de profilés en construction navale.

- Les sections en T dentelées :

Une modification d'un profilé en T obtenu par découpage d'un profilé en H. Ces membrures dentelées sont particulièrement intéressantes dans les pétroliers. L'expérience montre qu'il ne faut pas utiliser de tels profilés pour les ponts ou les fonds intérieurs sujets à des charges telles que grues ou charges dynamiques importantes ou dans le fond des bateaux d'intérieur qui peuvent subir des chocs d'échouage car ces charges locales peuvent y engendrer des concentrations de tensions importantes. [1]

Conclusion

Le premier chapitre nous aidera à avoir la capacité de comprendre les notions fondamentales à propos de l'architecture navale et de bien savoir les différentes caractéristiques concerne la flottabilité, la stabilité, et de savoir lire le plan de formes et de connaître un bateau pour son exploitation dans le chantier naval, ou dans le modélisme naval.

CHAPITRE II :

Rappel sur l'hydrostatique
d'un flotteur

Introduction

Le calcul de coque commence par déterminer le volume ∇ de la partie immergée du navire, c'est-à-dire le volume situé sous la ligne de flottaison.

Selon les choix et les décisions des concepteurs, la forme de la coque évolue d'avant en arrière. Le volume d'une carène peut être comparé à la surface d'un couple moyen (fictif), multipliée par la longueur de la flottaison.

Par conséquent, le calcul du volume inclura une valeur définissant ce couple moyen. Pour ce faire, il faut d'abord déterminer les valeurs des surfaces pour chaque couple tel que défini ci-dessous :

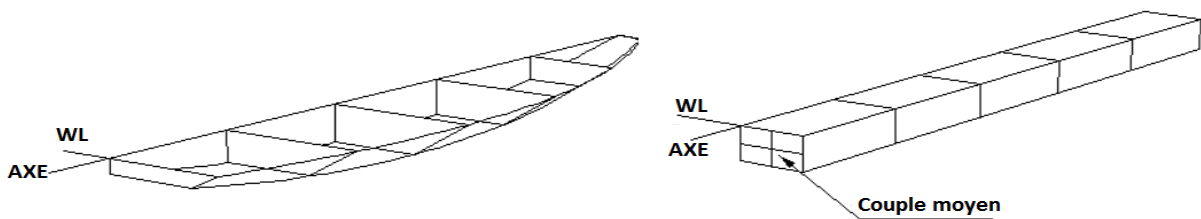


Figure II-1 : Aperçu des surfaces et couple moyen. [14]

Un peu de théorie pour commencer :

- Savoir lire un plan a bien entendu une importance capitale que nous allons détailler. Il faut savoir qu'un plan de modèle réduit n'est pas forcément un plan de bateau réel que l'on a réduit.
- Les matériaux utilisés en construction réduite sont les mêmes, mais leur densité relative face à leur environnement (l'eau) est différente.
- Les plans de modélisme de qualité ont été corrigés éventuellement par leur concepteur, car c'est bien de concevoir et pas seulement de réduire qu'il s'agit.
- Le nombre des couples aura été adapté, le tirant d'eau aura peut-être été légèrement augmenté et parfois le centre de gravité revu en fonction de l'implantation des différents éléments techniques. [14]

Echelle

- La notion d'échelle est facile à comprendre, on la note $\left(\phi = \frac{1}{n}\right)$, (exemple un bateau de 20 mètres à l'échelle $\left(\frac{1}{20}\right)$ ème mesurera 1 mètre) et il est facile d'admettre que tous les éléments de la maquette doivent être à la même échelle.

Donc le dimensionnement du modèle réduit pour l'étude doit respecter les lois suivantes :

Tableau II-1 : Lois de calculs (Surface, déplacement, volume) :

| Variables | Lois de calculs |
|---------------------------|--|
| Dimension (m) | $L_m = L_N \times \varphi$ |
| Surface (m ²) | $S_m = S_N \times \varphi^2$ |
| Déplacement (t) | $\Delta_m = \Delta_N \times \varphi^3$ |
| Volume (m ³) | $\nabla_m = \nabla_N \times \varphi^3$ |

Prenons l'exemple :

Un bateau de 56 tonnes au $\left(\frac{1}{20}\right)^{\text{ème}}$, on devra avoir :

$$\Delta_m = 56000 \times \frac{1}{20^3} = \frac{56000}{8000} = 7 \text{ Kg} \quad \text{_____} (5)$$

II-Théorie de la Stabilité du Navire

II-1 Définitions

- **Flotteurs** : corps rigide délimité par une surface externe continue qui, en équilibre, se trouve en partie immergée et émergée.
 - Toutes les parties du navire en contact avec l'eau (partie immergée) sont les œuvres vives fastidieuses
 - Toutes les parties du navire en contact avec l'air (partie émergée) sont les œuvres mortes.
- **La carène** : c'est le volume immergé de la coque du navire, mesuré en [m³].
- **B** : centre du volume de la carène
- **K** : le point le plus bas pris au milieu de la quille
- **G** : le centre de gravité de navire entier.
- **KG** : la hauteur du centre de gravité du navire par rapport à la quille : cette distance ne dépend que de chargement/déchargement, ou l'aménagement de poids à bord du navire.
- **KM** : hauteur du Métacentre par rapport à la quille : cette distance ne dépend que de la forme géométrique du navire.
- **GM** : hauteur Métacentrique : elle est calculée par soustraction de KG par KM

$$(GM = KM - KG).$$

- GM est une mesure de la stabilité initiale du navire.
- BM : rayon Métacentrique : cette distance ne dépend que de la forme géométrique du navire.
Le point M étant le centre de l'arc formé par le point B. [15]

II-2 La poussée d'Archimède

Principe :

"Un corps plongé dans un liquide au repos, subit de la part de celui-ci une poussée

Verticale, dirigée vers le haut, égale au poids du volume du liquide déplacé".

Cette force passe par le centre de gravité du liquide déplacé, lequel est appelé, dans le cas d'un navire, le centre de carène B (Figure II-2). W L est la ligne de flottaison ou la surface de la mer.

Un corps flottant au repos est soumis à deux forces :

- son poids P passant par son centre de gravité G .
- la résultante des poussées hydrostatiques Δ passant par son centre de carène B .

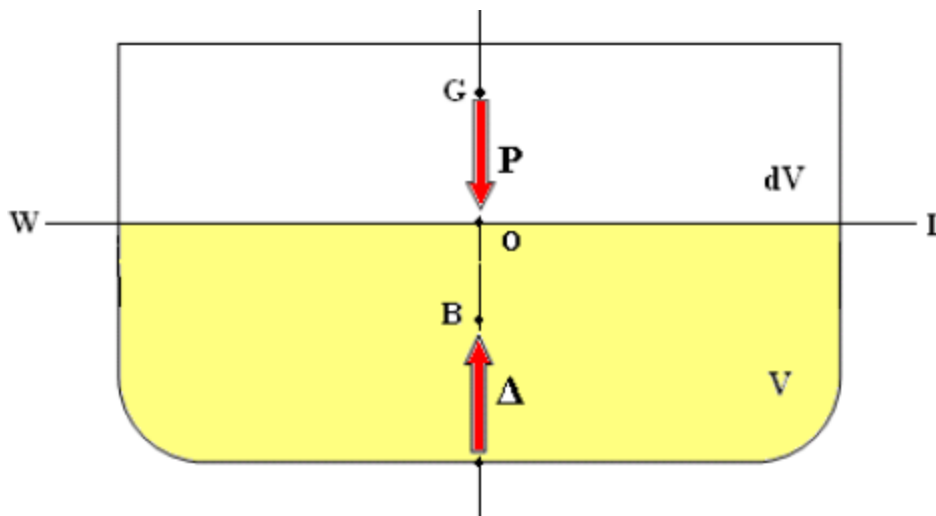


Figure : II-2 Équilibre d'un navire

Les conditions d'équilibre nécessitent que :

- le centre de carène B et celui de gravité G soient sur une même verticale.
- le poids P du corps soit égal à la résultante des poussées hydrostatiques Δ .

Pour un navire elle se traduit par la relation :

$$P = \rho \times \nabla \times g \text{ [N]}$$

Avec :

P : le poids en tonne du navire.

ρ : [1,026 t/m³] le poids volumique de l'eau de mer à 10°C.

g : la gravité [9,81 m/sec²].

∇ : le volume de la carène en [m³].

Remarque : La poussée d'Archimède dépend donc du volume de fluide déplacé (∇) et de la masse volumique de ce fluide (ρ). [16]

II-3 Stabilité de l'équilibre d'un corps flottant

Le mouvement d'un corps flottant peut se décomposer en deux mouvements :

- Un déplacement vertical (translation) sans variation angulaire (**déplacement isocline**).
- Une inclinaison sans variation de déplacement (**déplacement isocarène**).

II-3-1 Inclinaison isocarène

En l'absence de forces extérieures, un objet flottant soumis à une légère inclinaison isocarène retrouve sa position initiale grâce à un couple de rappel, ce qui lui confère un équilibre stable.

Par contre, Un corps flottant de révolution maintient une même inclinaison dans toutes les positions, à condition que son centre de gravité coïncide avec son axe de révolution. Cela est dû à l'absence de tout couple, le rendant en équilibre indifférent (neutre).

Dans le cas d'un corps entièrement immergé, la position du centre de gravité G par rapport le centre de carène B, détermine la stabilité du corps. Ainsi : L'équilibre est dit :

- **stable** si G est situé au-dessus de B
- **neutre** si G coïncide avec B
- **instable** si G est situé en dessous de B. ... [6]

II-4 Condition d'équilibre :

Conditions d'équilibre d'un corps flottant :

a- Le centre de poussée C est au-dessus du centre de gravité G :

Si les points ne sont pas alignés, le couple de forces formé tend à ramener le bateau dans la position verticale : l'équilibre est stable.

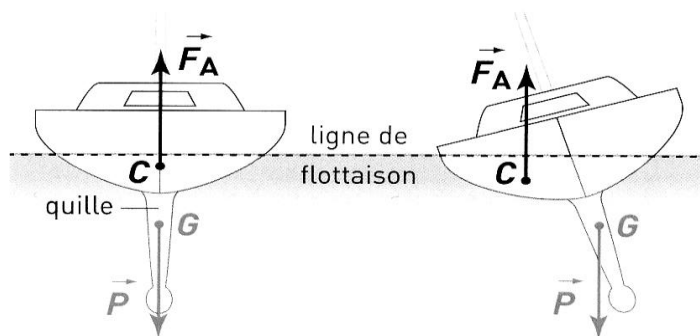


Figure II-3 : Cas d'un équilibre stable

NB : L'équilibre est stable même si les 2 points ne sont pas alignés verticalement.

b- Le centre de gravité G est au-dessus du centre de poussée C :

Dès que les deux points ne sont plus alignés verticalement, l'effet du couple peut faire chavirer le bateau : l'équilibre est instable.

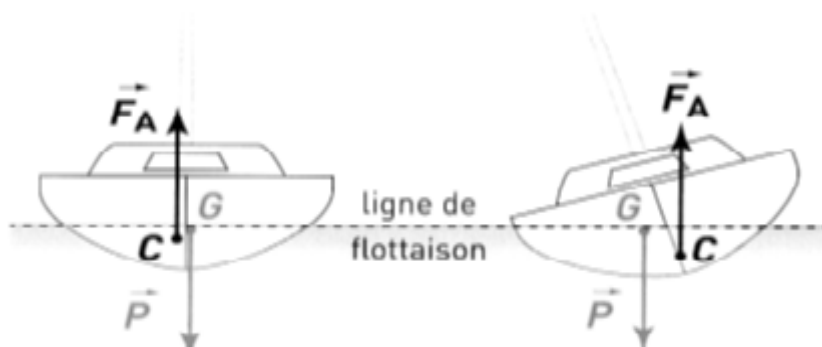


Figure II-4 : Cas d'un équilibre instable

II-5 La flottaison**II-5-1 La flottabilité**

La qualité élémentaire d'un bateau est de flotter. Pour réaliser cette condition il faut que la masse volumique du navire soit inférieure à celle de l'eau de mer.

$$\rho_n < \rho_e$$

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 (B) centre de gravité du volume immergé et égale au poids du volume de liquide déplacé » Aussi ce poids du volume déplacé égale au poids total du bateau.

Donc le flotteur (navire) est soumis à deux forces :

- L'une c'est la poussée d'Archimède s'applique « P » au centre de carène « B »
- L'autre c'est le poids total du flotteur (**déplacement du navire**) « Δ » s'applique à son centre de gravité « G ». [17]

On prendra en compte les éléments suivants correspond au volume immergé de la carène, exprimé en :

P : désigne le poids du volume d'eau en tonnes, on parle du « **Déplacement** » d'un navire.

Δ : C'est le déplacement du bateau en tonnes.

Remarque : Langage maritime on dit déplacement du navire, au lieu du poids, car lorsqu'il flotte ; il déplace un volume d'eau qui égal à son poids total.

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

$$P = \nabla \times \rho_{em} \quad \text{_____ (6)}$$

$$\rho_{em} = \frac{\Delta}{\nabla} = \frac{P}{\nabla} \quad \text{_____ (7)}$$

Remarque :

$$P = \Delta = \text{pois du volume d'eau déplacé par la carène.}$$

II-5-2 Conditions de flottabilité

Un corps flotte si la valeur de son poids est égale ou inférieure à la valeur de la force de la poussé d'Archimède. Un corps coule si la valeur de son poids est supérieure à la valeur de la poussée d'Archimède.

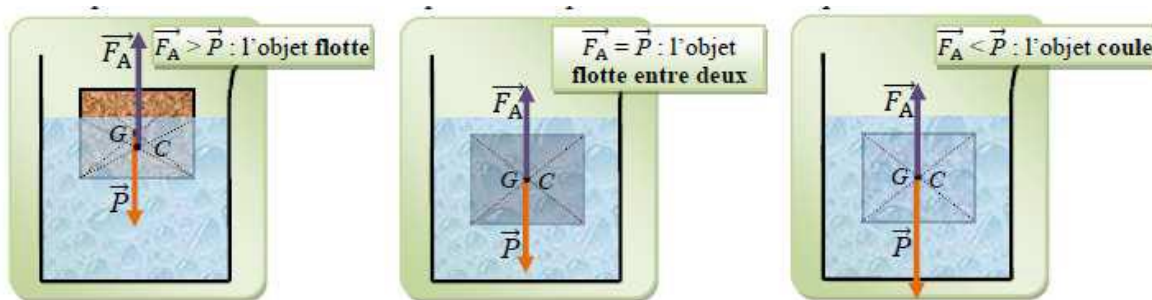


Figure II-5 : Conditions de flottabilité du navire.

II-6 Stabilité initiale d'un bateau

L'étude de la stabilité des navires en général 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 comme le Rhinocéros pour la conception et Maxurf pour les calculs hydrostatiques.

Dans notre cas on va approuver diverses variables analytiquement et expérimentalement. [12]

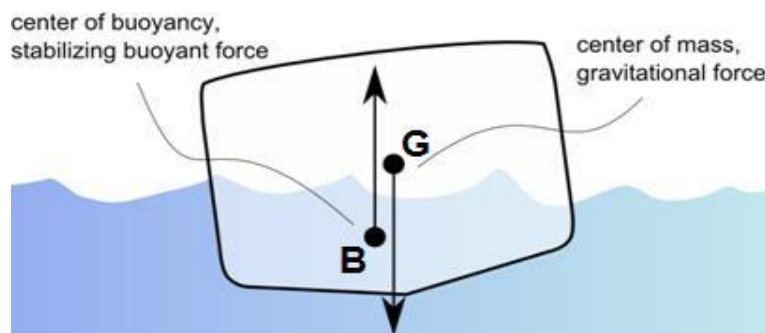


Figure II-6 : Stabilité d'un bateau, centre de carène et gravité.

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, 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 II-6).

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. [12]

II-7 Stabilité transversale

Petites inclinaisons ($\sin \theta \approx \theta$) (déplacements isocarènes)

Une faible inclinaison isocarène (**volume immergé = volume émergé**) du navire autour des ses axes de symétrie horizontal et transversal perturbent l'équilibre du navire. On étudie des lors les stabilités transversale (inclinaisons autour de l'axe longitudinal) et longitudinale (inclinaisons autour de l'axe transversal) (Figure II-7). Cette dernière étant toujours bonne on ne considère que la stabilité transversale.

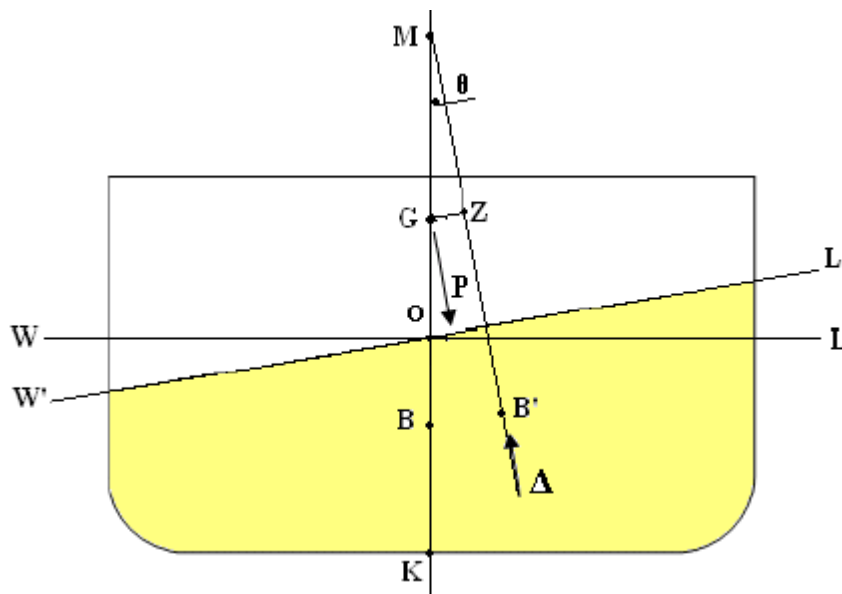


Figure II-7. Moment de redressement pour les petits angles de gîtes. [8]

On parlera dès lors d'équilibre :

- **stable** si $GM > 0$ donc $KM > KG$ (G situé en dessous de M).
- **neutre** si $GM = 0$ donc $KM = KG$ (G et M sont confondus).
- **instable** si $GM < 0$ donc $KM < KG$ (G situé au-dessus de M).

Où M est le métacentre correspondant à l'inertie IOX de la surface de flottaison par rapport à l'axe de symétrie longitudinal du navire, GM la hauteur métacentrique et KM sa distance à la ligne de base ; G le centre de gravité du navire et KG sa distance à la ligne de base. La ligne de base étant la ligne de quille du navire le point K est son intersection avec l'axe vertical.

Les angles d'inclinaisons considérés sont faibles tels que $\sin \theta \approx \theta$ (θ en radian).

II-7-1 Rayon métacentrique BM

Pour un petit angle d'inclinaison le rayon métacentrique BM est calculé en fonction du volume de carène ∇ du navire et l'inertie I_{xx} de la surface de flottaison. Il est donné par l'expression :

$$BM = IOX / \nabla \quad \text{_____} \quad (8)$$

II-7-2 Module de stabilité GM

En fonction des variables connues KB , KG , KM et BM on détermine la hauteur Métacentrique GM qui est donnée par l'expression :

$$GM = KM - KG \quad \text{_____} \quad (9)$$

II-8 Couple de redressement

Le couple de redressement d'un navire, également appelé moment de redressement, est une mesure de la stabilité transversale du navire. Il représente la capacité du navire à résister à un basculement latéral. [18]

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°). Le moment de redressement se calcule par la formule mathématique, pour de petits angles, est la suivante :

$GZ = \text{hauteur métacentrique} \times \sin$ de l'angle de gîte Soit :

$$\mathbf{GZ = GM \times \sin \alpha \quad \text{_____} \quad (10)}$$

Cette notion de GZ est aujourd'hui le plus souvent utilisée comme représentation de la stabilité d'un bateau. [17]

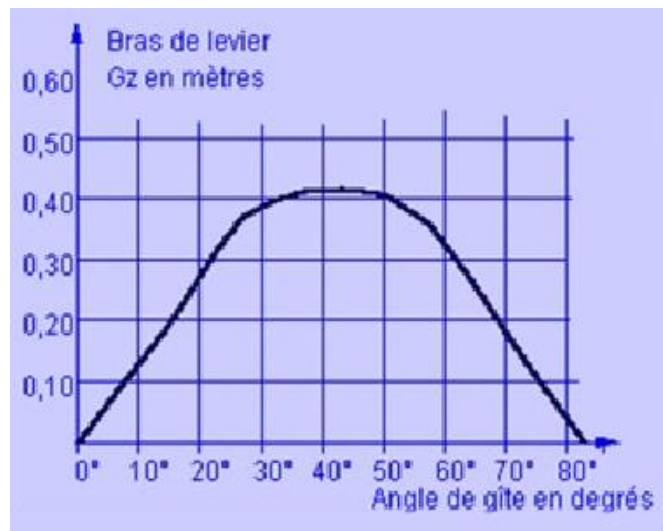


Figure II- 8 : Courbe GZ

Donc le moment de redressement on peut le calculer par l'équation suivante :

$$\mathbf{Mr = P \times GZ = \Delta \times GM \times \sin \alpha \quad \text{_____} \quad (11)}$$

La courbe GZ montre la gîte critique de chavirement, ainsi toutes les valeurs de bras de levier (GZ) en fonction de la gîte. Elle est obtenue par des essais expérimentaux sur un modèle réduit. [7]

II-9 Calcul du volume

Les calculs de coque commencent logiquement par déterminer le volume V la partie immergée du navire, c'est-à-dire le volume qui se trouve sous la ligne de flottaison peinte.

Selon le choix, la forme de la coque évolue d'avant en arrière et la décision du concepteur.

Le volume de la coque peut être comparé à la surface d'un couple ordinaire (fictif), multipliez par la longueur de la ligne de flottaison.

Par conséquent, le calcul du volume inclura une valeur définissant ce couple moyen.

Pour ce faire, il faut d'abord déterminer la valeur de chaque surface les paires sont définies comme suit : [19]

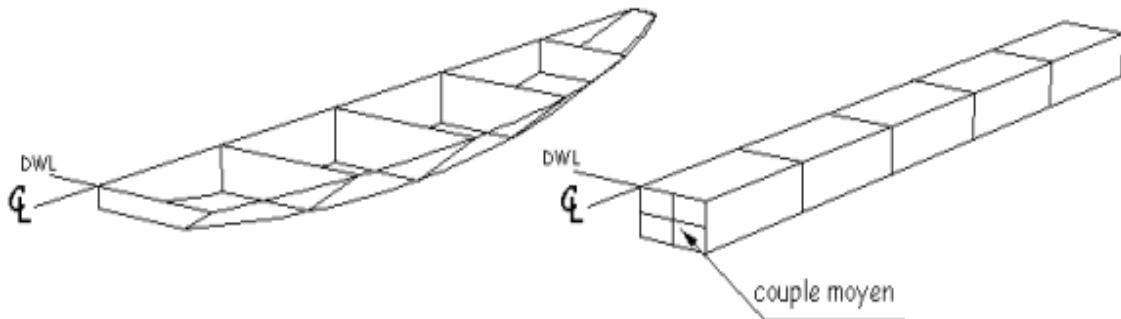


Figure II-9 : Coupe moyen du navire

II-10 Choix des couples

Dans toutes les méthodes, il est nécessaire de diviser la longueur de la carène du bateau en un certain nombre de couples, tous équidistants.

Pour appliquer une formule simple, on choisira des paires impaires, donc un nombre pair de cases. Mettre un couple à chaque extrémité de la ligne de flottaison.

Plus nous avons de couples, Le calcul sera précis.

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

II-11 Surface des couples

La surface d'un couple peut être déterminée avec un mètre de surface, un calcul ou un programme de dessin informatique. Il existe des moyens plus simples, mais fondamentalement une approche globale qui suffit pour les chantiers navals.

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

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.

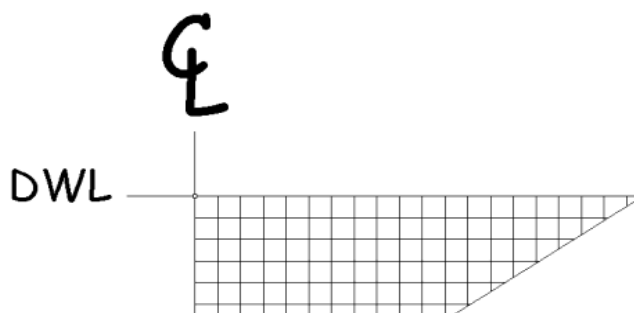


Figure : II-10 : Surface d'un couple

II-12 Courbe des aires des couples

Les valeurs des surfaces de tous les couples étant ainsi, 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 a 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.

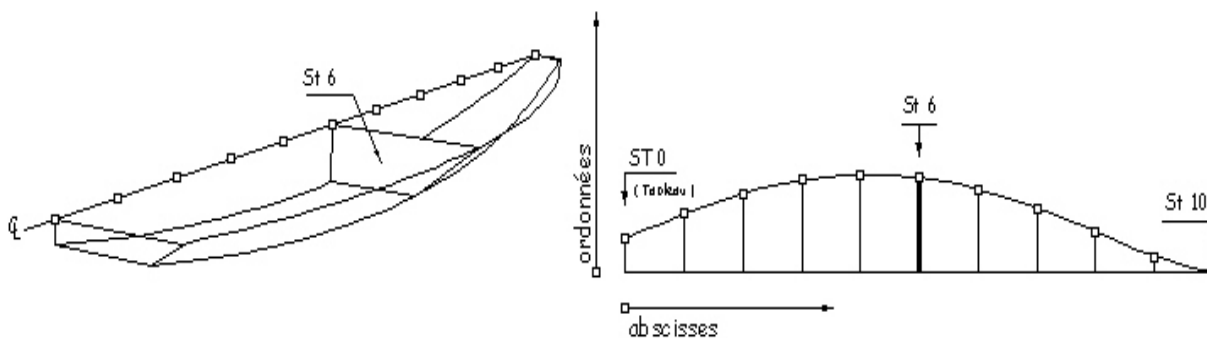


Figure II-11 : Reproduction graphique sous forme de courbe des aires pour les valeurs des couples.

La courbe des aires des couples permet également de déterminer le volume de la carène, ainsi que le centre longitudinal de poussée (LCB). Pour la surface de chaque couple, on prendra une valeur linéaire correspondante, reflétant l'importance de la surface considérée.

Bien entendu, plus l'échelle est grande, plus la précision est améliorée.

II-13 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

$$\text{Le volume} = \text{Aire} \times \text{Dimension}$$

Donc c'est nécessaire de connaître les méthodes de calculs d'approximation pour les aires par des lois d'intégration numérique :

II-14 Les lois d'intégration numérique pour le calcul des aires**II-14-1 Méthode des trapèzes :**

La méthode consiste à prendre comme valeur de volume la moyenne des surfaces des coupes, 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.

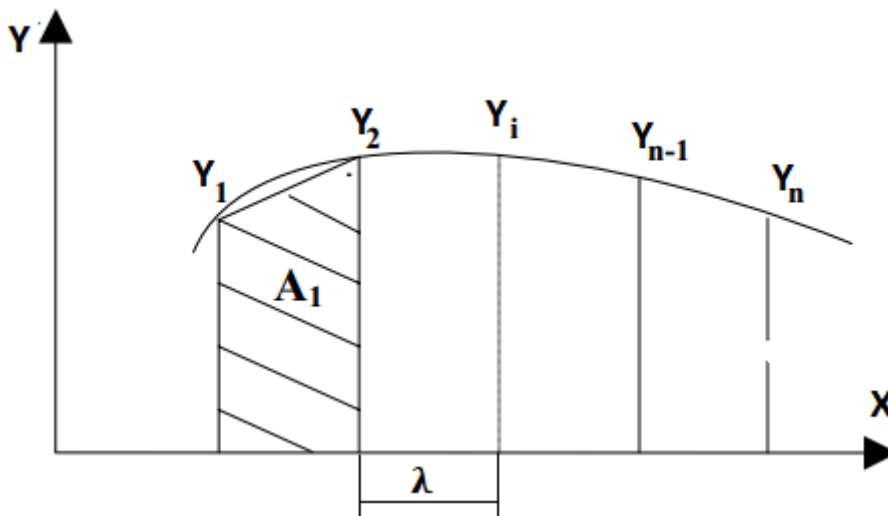


Figure II-12 : Principe de la méthode de Trapèze

On relie les points (X_i, Y_{i-1}) et (X_i, Y_i) par un segment de droite (courbes de premier degré $y = a_0 + a_1 \cdot x$)

L'intégrale $A = \int_{X_i}^{X_n} Y \cdot dX$ est représentée par la somme des aires des trapèzes partielles:

$$A = \lambda \left(\frac{Y_1}{2} + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_{n-1} + \frac{Y_n}{2} \right) \quad \text{----- (12)}$$

Remarque :

Dans toutes les lois d'intégration numérique pour les calculs des aires ; si on change les variables (Y_i), par des surfaces on obtient que le volume, sachant que λ est l'équidistance entre les surfaces de flottaisons ou les couples.

II-14-2 Méthode des paraboles (ou première règle 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.

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.

On relie 3 points adjacents (X_{i-1}, Y_{i-1}), (X_i, Y_i), (X_{i+1}, Y_{i+1}) par un segment de paraboles (courbes de premier degré)

$$Y = (A_0 + A_1.X + A_2.X^2) \text{ (1}^{\text{ère}} \text{ règle de Simpson)}$$

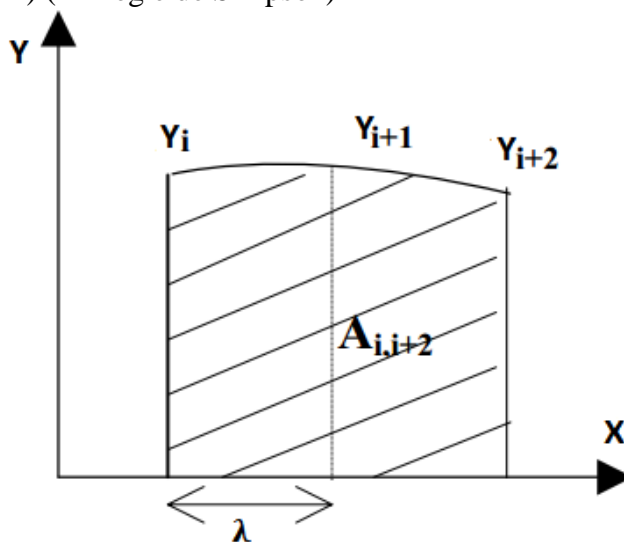


Figure II-13 : Principe de la méthode des paraboles (1^{ère} règle de Simpson).

L'aire de la surface (hachurée) délimitée par la parabole est donnée, l'axe des x et les bornes X_{i-1} et X_{i+1} l'intégrale $A_i = \int_{X_i}^{X_{i+2}} Y. dX$ soit:

$$A_{1,3} = \frac{\lambda}{3} (Y_1 + 4Y_2 + Y_3) \text{ _____ (13)}$$

$$A_{3,5} = \frac{\lambda}{3} (Y_3 + 4Y_4 + Y_5)$$

Donc :

$$A = \sum A_{i,i+2} = \frac{\lambda}{3} (Y_1 + 4Y_2 + 2Y_3 + 4Y_4 + 2Y_5 + \dots + 4Y_{n-1} + Y_n)$$

Cette règle est valable lorsque le nombre d'intervalle est un nombre pair c.-à-d. pour $n = 3, 5, 7, \dots, n = (2k - 1)$

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%).

II 14-3 Deuxièmes règles de Simpson :

On relie 4 points adjacents $(X_i, Y_i), (X_{i+1}, Y_{i+1}), (X_{i+2}, Y_{i+2})$ et (X_{i+3}, Y_{i+3}) par un segment de paraboles d'équation :

$$Y = A_0 + A_1.X + A_2.X^2 + A_3.X^3$$

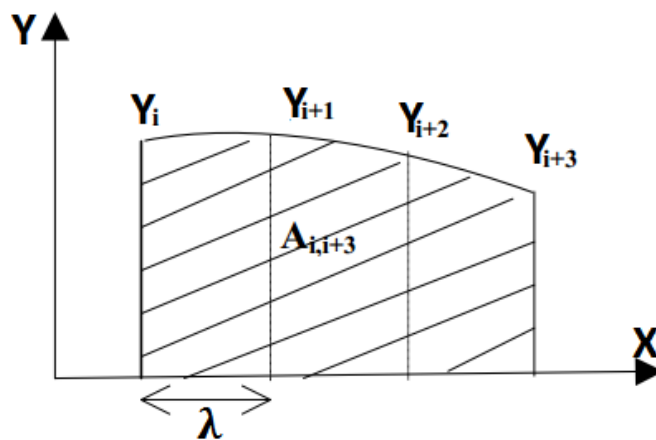


Figure II-14 : Principe de la deuxième méthode de Simpson

L'aire de la surface (hachurée) délimitée par la parabole est donnée, l'axe des x et les bornes

X_i et X_{i+4} L'intégration $A_i = \int_{X_i}^{X_{i+4}} Y \cdot dX$ soit :

$$A_i = \frac{3}{8} \lambda (Y_i + 3Y_{i+1} + 3Y_{i+2} + Y_{i+3}) \quad \text{----- (14)}$$

Où $\lambda = (X_i - Y_{i-1})$ et $i = 2, 3, \dots, n$

A : représente est représentée par la somme des aires des paraboles partielles $A_i, A_{i+3} \dots$ etc

$$A_{1,4} = A_1 = \frac{3}{8}\lambda(Y_1 + 3Y_2 + 3Y_3 + Y_4)$$

$$A_{4,7} = A_4 = \frac{3}{8}\lambda(Y_4 + 3Y_5 + 3Y_6 + Y_7) \dots \text{etc}$$

$$A = \sum A_{i,i+3} = \frac{3\lambda}{8} (Y_1 + 3Y_2 + 3Y_3 + 2Y_4 + 3Y_5 + 3Y_6 + 2Y_7 + \dots + 3Y_{n-1} + Y_n)$$

Cette règle est valable lorsque le nombre d'intervalle est un multiple de 3, c'est-à-dire pour $n = 4, 7, 10, 13, n = (3k - 1)$.

II-15 Stabilité du navire :

Pour qu'un navire soit stable, il faut que la hauteur métacentrique (**GM**) soit positive. C'est-à-dire le métacentre (**M**) soit au-dessus de centre de gravité (**G**) du navire.

II-15-1 L'équation de stabilité transversale :

$$\mathbf{GM} = \mathbf{KM} - \mathbf{KG} = (\mathbf{KB} + \mathbf{BM}) - \mathbf{KG} \quad \text{_____} \quad (15)$$

II-15-2 L'équation de stabilité longitudinale :

$$\mathbf{GM}_L = \mathbf{KM} - \mathbf{KG} = (\mathbf{KB} + \mathbf{BM}_L) - \mathbf{KG} \quad \text{_____} \quad (16)$$

Remarque :

Les termes de stabilité (**KB** et **KG**) soit transversale ou longitudinale sont les mêmes, sauf pour le rayon métacentrique non, donc (**BM**) se calcule différemment, et la figure ci-dessous montre pourquoi le rayon métacentrique n'est pas le même en transversalement et longitudinalement :

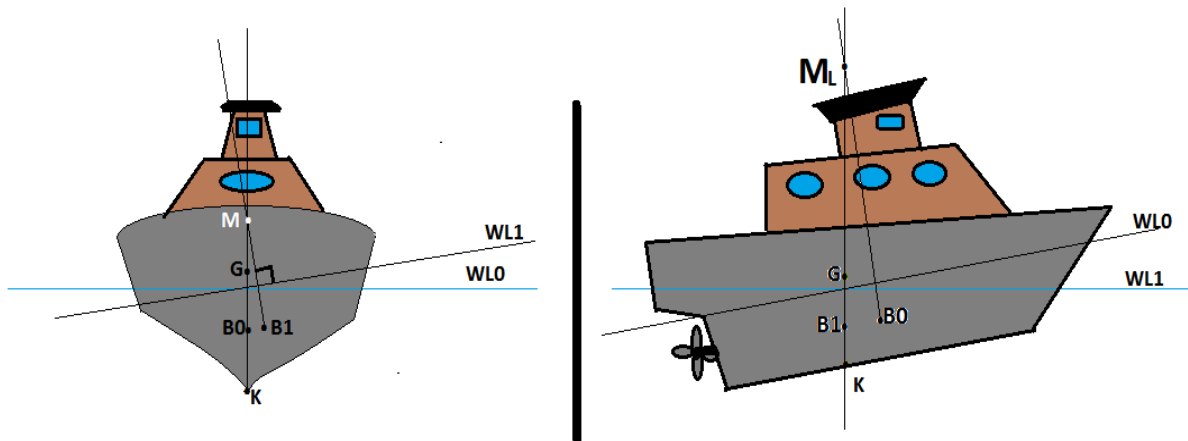


Figure II-15 : Le rayon métacentrique transversal et longitudinal

II-15-3 Déroulement de calculs

II-15-3-1 Calcul de KB

La position verticale du centre de carène sur la quille pour une ligne d'eau voulue est égale à :

$$KB = \frac{M}{\nabla} \quad \text{--- (17)}$$

Où : $M = \lambda^2 \left(S_1 + 2S_2 + 3S_3 + 4S_4 + \dots + \frac{n}{2} S_n \right)$

$S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$: Surfaces totales des lignes d'eau. Si on a fait le calcul avec 10 lignes d'eau (S_0, \dots, S_9), on a **n=9**.

II-15-3-2 Calcul du rayon métacentrique BM

Le rayon métacentrique initial transversal pour une ligne d'eau voulue est égale à :

$$BM = \frac{I_{ox}}{\nabla} \quad \text{--- (18)}$$

$$I_{ox} = \frac{2\lambda}{3} \left(\frac{Y_0^3}{3} + Y_1^3 + Y_2^3 + \dots + \frac{Y_n^3}{2} \right)$$

II-15-3-4 Méthode de calcul de GM

En suivant sur la figure lorsqu'on déplace un poids horizontale transversale et verticalement à l'axe de symétrie longitudinale on va créer la gîte par le moment perturbateur qui est :

$$M_p = w \times \text{bras}$$

$$\text{bras} = d \times \cos \alpha$$

$$M_p = w \times d \times \cos \alpha$$

Lorsqu'il est prend son équilibre, ce moment perturbateur sera égale au moment stabilisateur M_s .

$$M_s = \Delta \times GZ$$

$$GZ = GM \times \sin \alpha$$

$$M_s = \Delta \times GM \times \sin \alpha$$

$$\text{Equilibre} \Leftrightarrow M_p = M_s$$

Donc:

$$w \times d \times \cos \alpha = \Delta \times GM \times \sin \alpha$$

$$\Rightarrow GM = \frac{w \times d}{\Delta} \times \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{w \times d}{\Delta \times \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}} = \frac{w \times d}{\Delta \times \tan \alpha}$$

II-15-3-5 Calcul du centre de gravité de la flottaison LCF

Pour calculer la position du centre de gravité d'une flottaison donnée par rapport à la perpendiculaire arrière, on utilise la formule suivante :

$$LCF = \frac{M}{S_f} \quad \text{--- (19)}$$

Où :

$$M = \lambda^2 \left(Y_1 + 2Y_2 + 3Y_3 + \dots + \frac{n}{2} Y_n \right)$$

Et S = la demi surface de flottaison étudiée.

II-15-3-6 Calcul de la position longitudinale du centre de carène LCB par apport à la PP AR

Ayant calculé les différentes aires des couples comme indiqué ci-dessus ce chapitre, on calcul LCB (pour une ligne d'eau considérée) avec :

$$LCB = \frac{M}{\nabla} \quad \text{--- (20)}$$

Où :

$$M = x^2 \left(S_1 + 2S_2 + 3S_3 + \dots + \frac{n}{2} S_n \right)$$

X est la distance entre les couples sur l'axe longitudinal et $S_1 \dots S_n$ sont les surfaces entières des couples pour la ligne d'eau considérée. Si on a pris la surface de 21 couples (S_0 à S_{20}), alors $n=20$.

II-15-3-7 Calcul du rayon métacentrique longitudinal : BM_L

A partir de la ligne d'eau considérée, on calcule le métacentre longitudinal avec les formules suivantes :

$$BM = \frac{I_{OY}}{\nabla} \quad \text{--- (21)}$$

Où ⊗

$$I_y = I_{y0} - S_f \times LCF^2$$

Avec :

$$I_{oy} = 2\lambda^3 \left(Y_1 + 4Y_2 + 9Y_3 + \dots + \frac{n^2 Y_n}{2} \right)$$

II-16 Le TPC

C'est le nombre de tonnes qu'il faut charger ou décharger pour changer le tirant d'eau de 1cm.

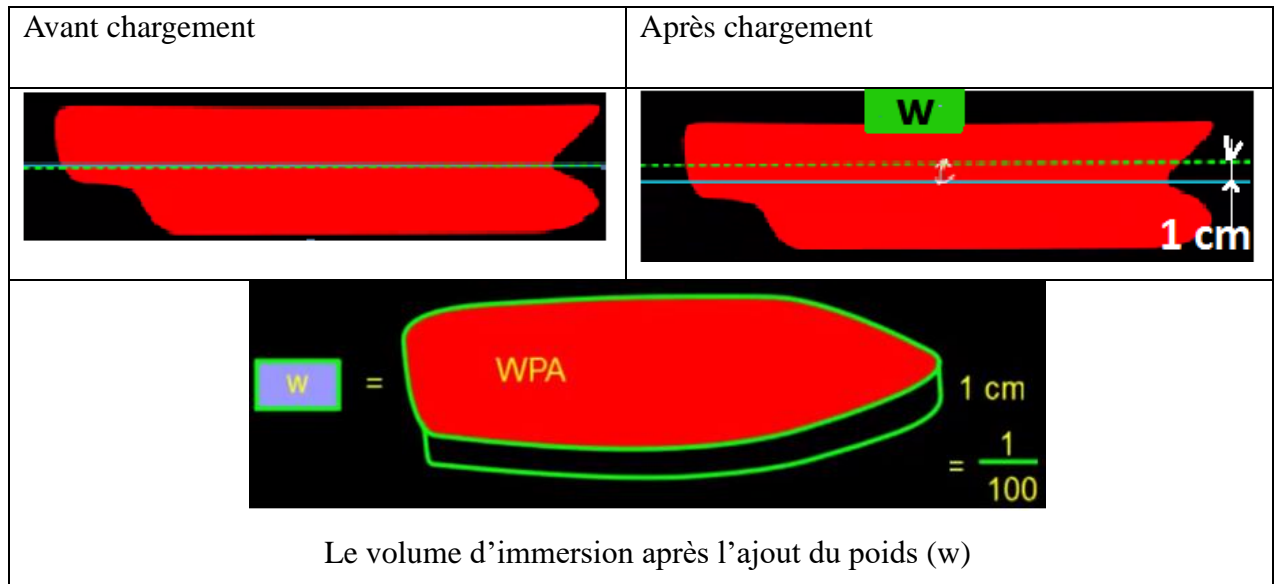


Figure II-17 : Tonne Par Centimètre

Si on charge une masse (w) de 200 tonne à bord d'un navire, le navire s'enfoncé par-exemple de 10 cm.

Donc je pouvais écrire $t \rightarrow 10 \text{ cm}$.

Aussi : $20 \text{ t} \rightarrow 1 \text{ cm}$.

Donc 20 [t/cm] C'est le TPC d'immersion de 1 cm.

Et si on le soustrait le navire revient à sa position initiale ; ceci est similaire au volume du liquide échangé, ou on peut dire que le volume d'immersion est égale directement au poids ajouté. Voir **Figure (3-5)**.

Le poids qui subit ce changement de tirant d'eau de 1 centimètre est le TPC, et se calculé par :

$$\text{TPC} = \text{VOLUME} \times \text{MASSE VOLUMIQUE}$$

$$\text{TPC} = (\text{WPA} \times 1/100) \times \rho_e$$

$$\text{TPC} = \frac{\text{WPA} \times \rho_e}{100} \left[\frac{\text{t}}{\text{cm}} \right]$$

WPA en (m²) ET ρ_e en ($\frac{\text{t}}{\text{m}^3}$)...[20]

Conclusion

En nous appuyant sur les formules vues précédemment et les connaissances théoriques que nous avons vues au premier chapitre, nous allons reproduire le plan de forme et calculer quelques éléments hydrostatiques, par exemple : plan de formes avec son tableau des demi-ouvertures, dessiner la coque à part, surface flottante selon le changement du volume de la coque, la différence du tirant d'eau théorique du modèle, il n'est pas nécessaire de le mettre à l'eau, pour ne pas endommager les lattes, la surface flottante et le TPC.

CHAPITRE III :

Etude de cas d'une maquette
du yacht type Riva

Introduction

Dans le quotidien, il est nécessaire de faire des mesures. En tout temps on interagit avec l'environnement autour, on fait des mesures des grandeurs physiques. Pour cette raison, il est important que les moyens de mesure soient disponibles pour les spécialistes, une mesure est disponible si le système de mesure est accessible et facile à utiliser, notre expérience est fait partie d'une mesure de la conception de l'architecture navale.

Ce chapitre nous permet de relier nos connaissances théoriques à la réalité, mais à une échelle réduite basée sur l'exemple : maquette du yacht type Riva.

L'objectif principal dans ce chapitre est de calculer quelques variables hydrostatiques, plus la validation par l'expérimentation.



Figure III.1 : Maquette de yacht type Riva Aquarama.



Figure III.2 : Maquette de yacht type Riva Aquarama vue de dessus.

Les dimensions de cette maquette sont :

$$\text{LHT} = 70 \text{ cm}$$

$$B = 24,4 \text{ cm}$$

$$C = 11,5 \text{ cm}$$

Par le moyen du logiciel de conception ANSYS R16.0 module ICEM. Nous pouvons extraire les valeurs de demis ouvertures pour la maquette de type Riva Aquarama, comme suivant :

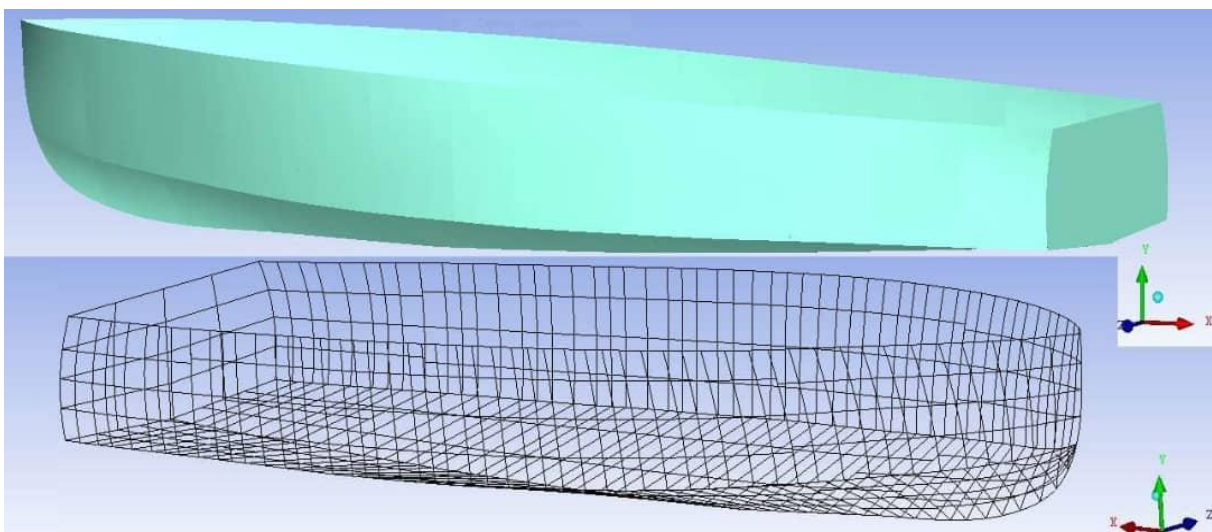


Figure III-3 : La coque du yacht.

Chapitre III : **Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva**

A l'aide de logiciel **ANSYS R16.0** , et le plan de formes nous pouvons faire la conception géométrique de la maquette étudiée comme indique la figure en bas :

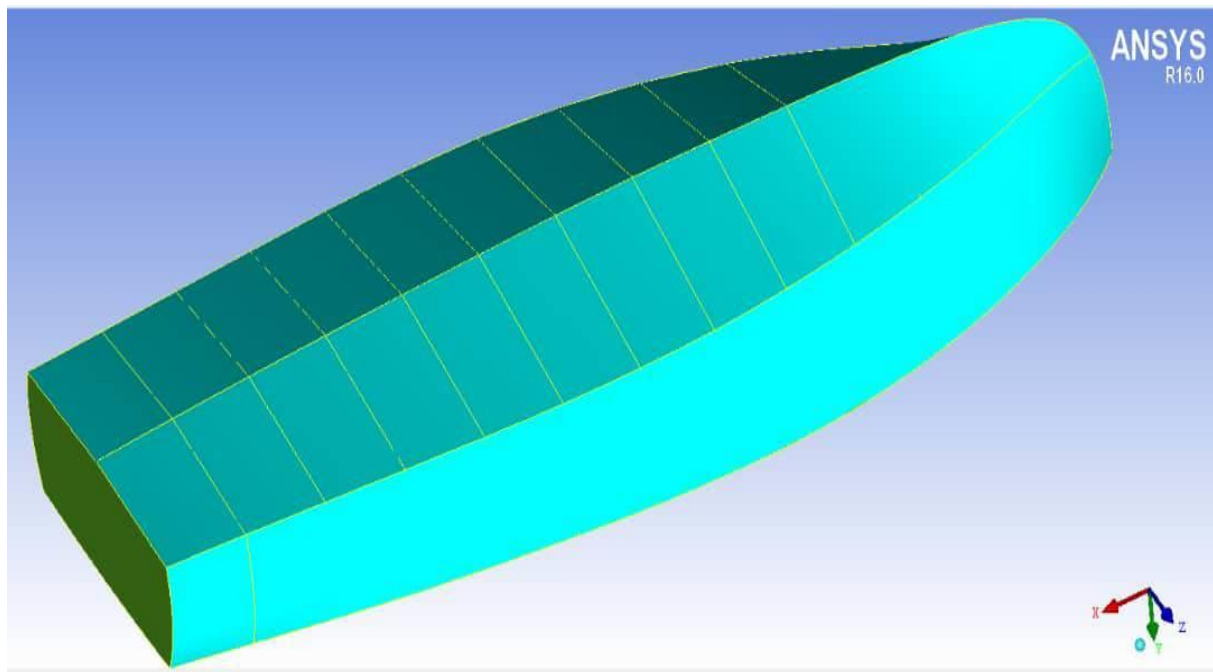
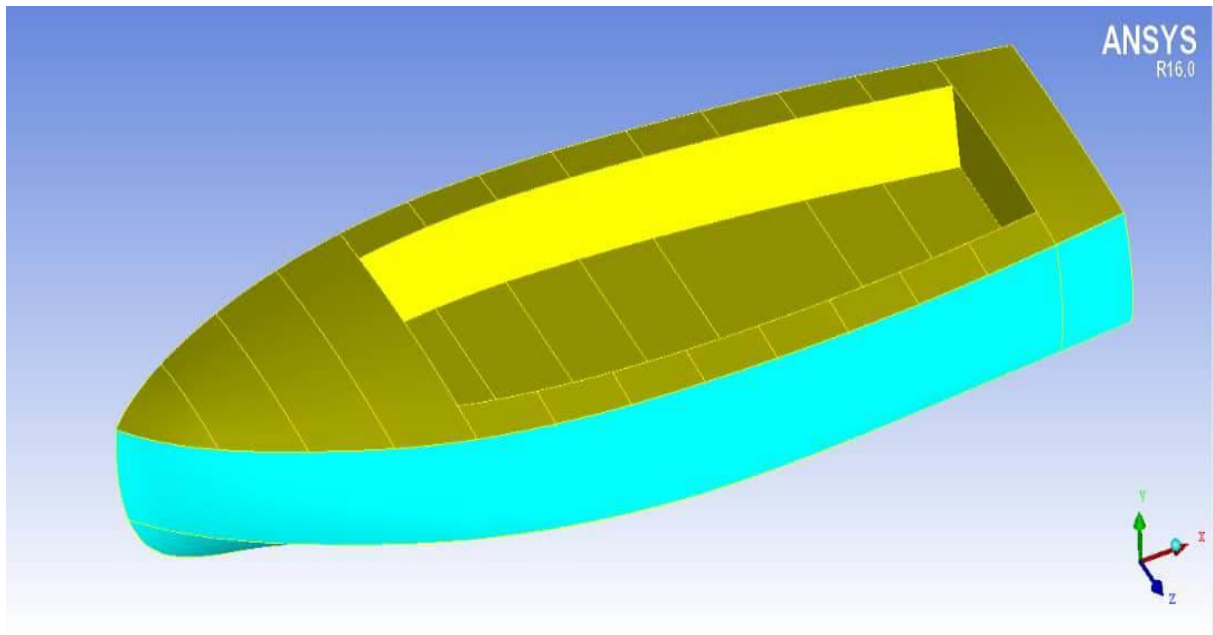


Figure III-4 : vues de la maquette en perspective

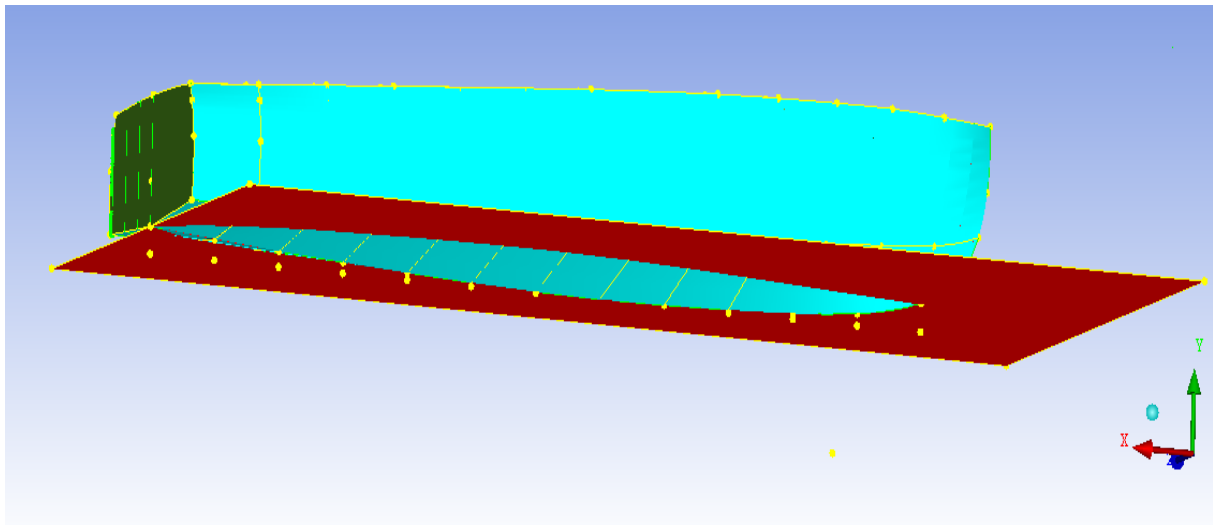


Figure III-5 : Intersection du plan d'eau et la coque de la maquette.

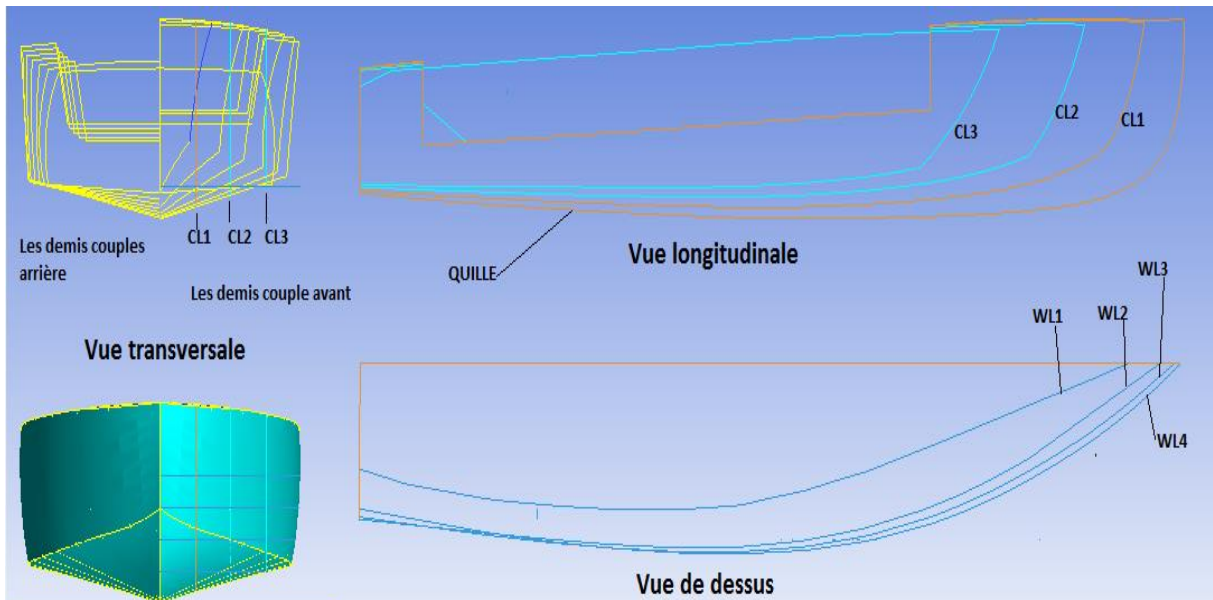


Figure III-6 : Le plan de formes de la coque.

Remarque

Ces coordonnées ci-dessus nous a permet de dessiner la forme de la coque et aussi son plan de formes pour les 13 couples. À l'aide de logiciel **ANSYS R16.0** nous a permet de trouver les résultats ci-dessous.

Pour permettre de traduire ces coordonnées de tableau (N ° III.3) de demi-ouvertures à une géométrie il faut comprendre cette méthode : prenons l'exemple (couple 13) : les valeurs de la

ligne horizontale représentent (le couple 13) pour quatre (4) valeurs de tirant d'eau de [T1 à T4].

Par contre les valeurs de la colonne verticale représentent la ligne d'eau car le tirant d'eau est fixe pour une colonne.

III-1 Présentation globale de logiciel de dessin

Le code de calcul CFX-16.0 est constitué de cinq modules qui sont liés par le flux d'information requis pour réaliser une analyse CFD. Ce code est très utilisé pour la simulation numérique soit pour les fluides compressible ou non compressible dans le domaine énergétique. les cinq modules sont :

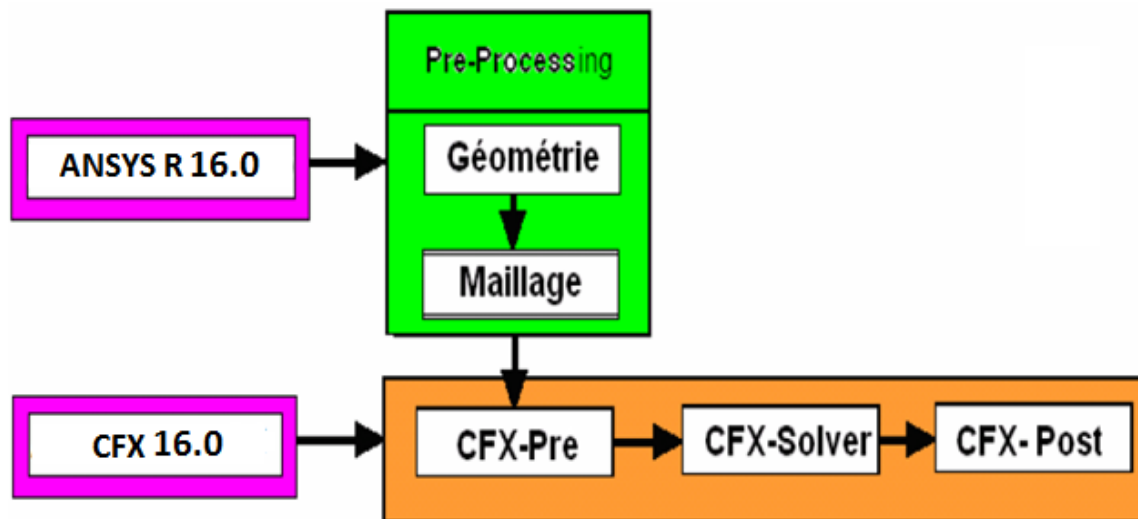


Figure III-7 : Structure du code de calcul CFX-16.0

III-1-1 ANSYS R16.0 :

Est un module de pré processeur de génération de la géométrie et du maillage de CFX-16.0 C'est un programme interactif qui permet de construire des géométries plus au moins complexes avec un maillage approprié et désignation de chaque région pour l'entrée au CFX-Pre.

Traditionnellement la modélisation avec CFX 16.0 inclue la mise en place de la géométrie du problème, la génération d'un maillage convenable et la définition des conditions limites.

III-1-2 CFX-Solver :

Est le module qui résout le problème spécifié dans CFX-pre pour toutes les variables de la solution.

III-1-3 CFX-Post :

Est une interface pour la représentation des résultats sur l'écran, sous différentes formes : contours, lignes de courant, champs de vitesse, courbes, tableau et même animation (vidéo).

Il est conçu pour permettre la visualisation facile et quantitative des résultats de simulation de CFD.

Nous ne faisons usage que du module initial d'ANSYS R16.0 afin de déterminer la configuration du yacht. Les résultats que nous obtenons sont les suivants :

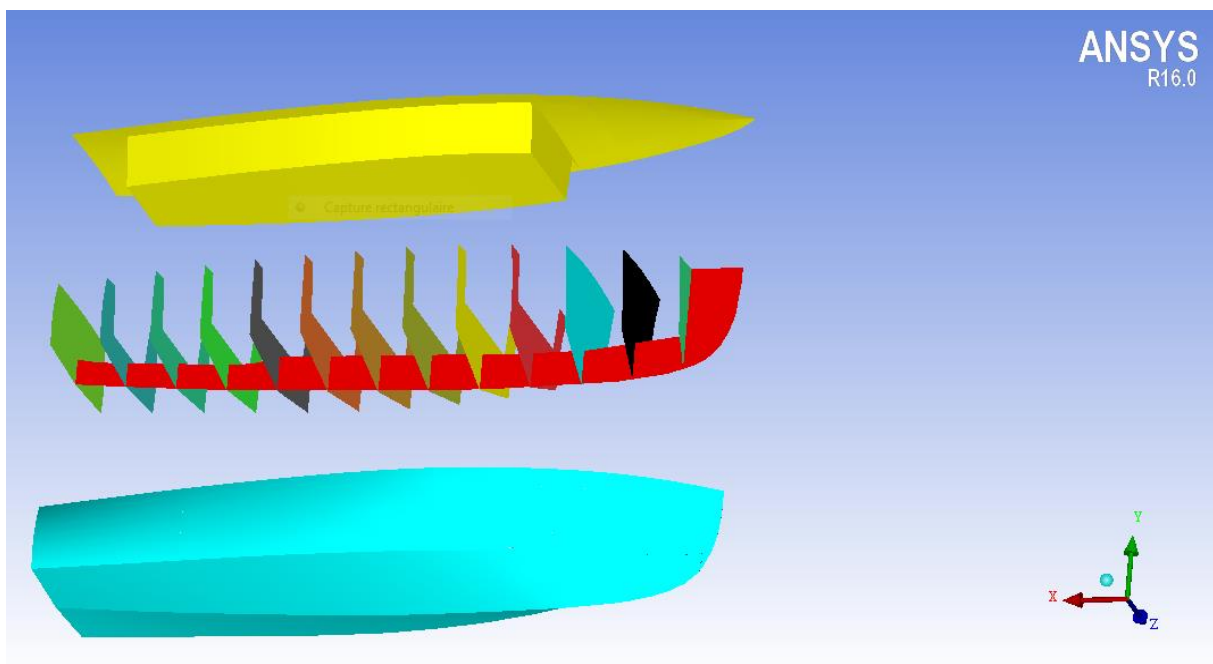


Figure III-8 : Vue éclatante entre coque, quille, couples et pont

La (figure III-9) montrent les vues perspectives éclatantes, entre l'assemblage des couples sur la quille et le bordé extérieur de la coque.

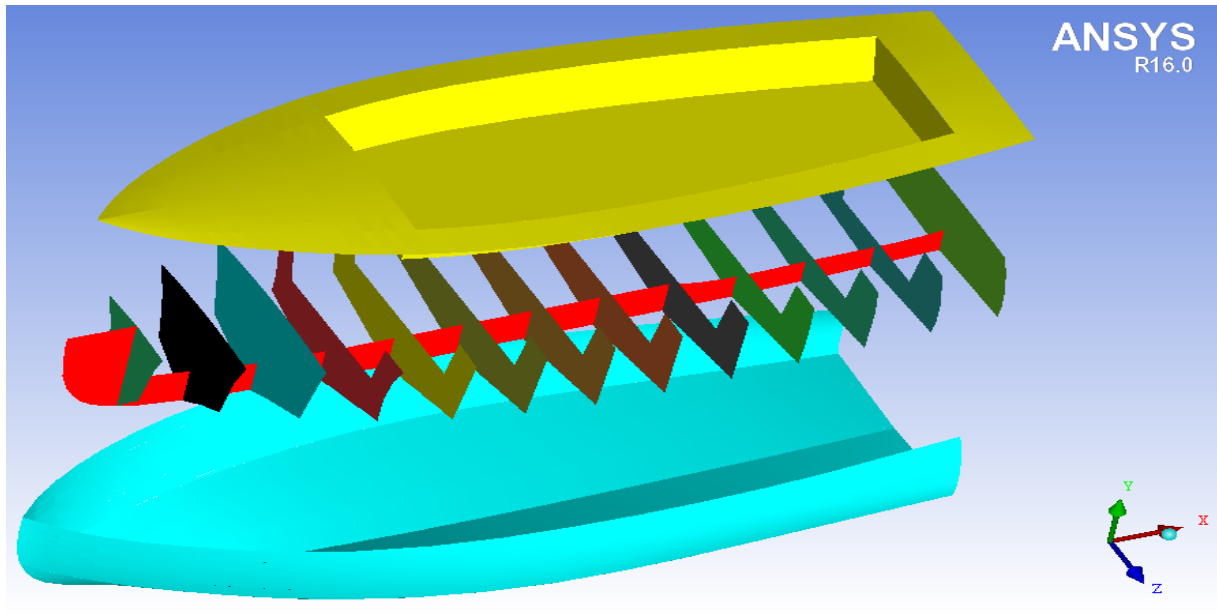


Figure III-9 : Vue éclatante entre l'ossature avec coque et pont

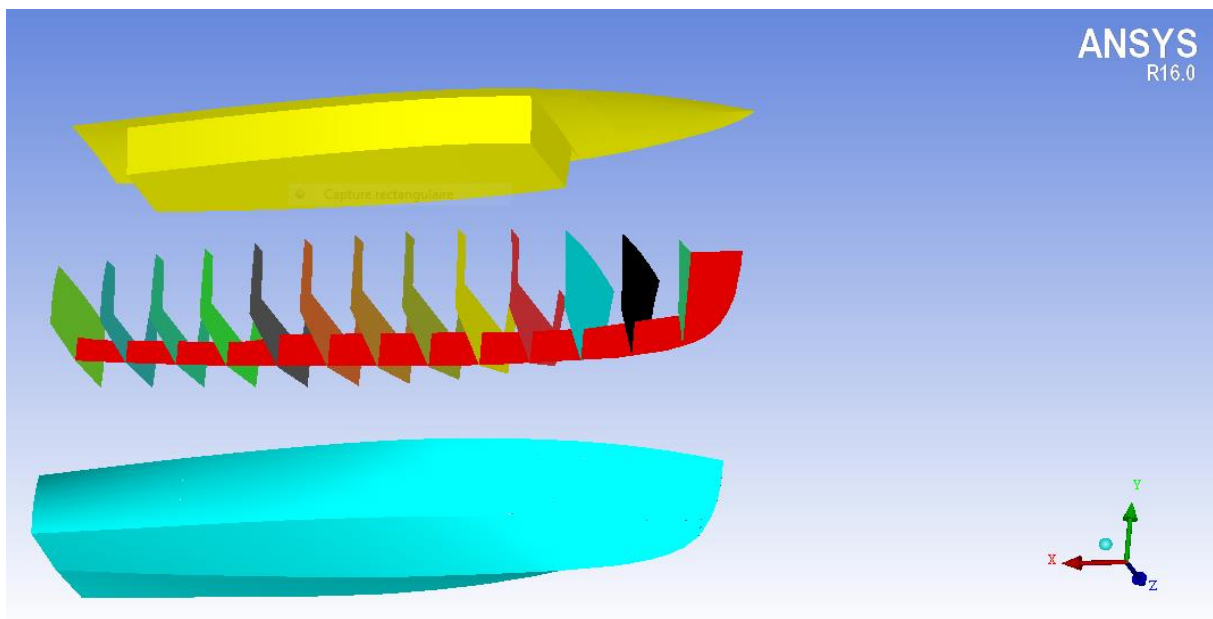


Figure III-10 : Principe de construction de la maquette.

Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva

Après que les couples ont été positionnés le long de la quille, les lattes sont adhérees en utilisant de la colle pour le bois ou parfois avec de petits clous. Ensuite, la coque est poncée pour obtenir une surface lisse.

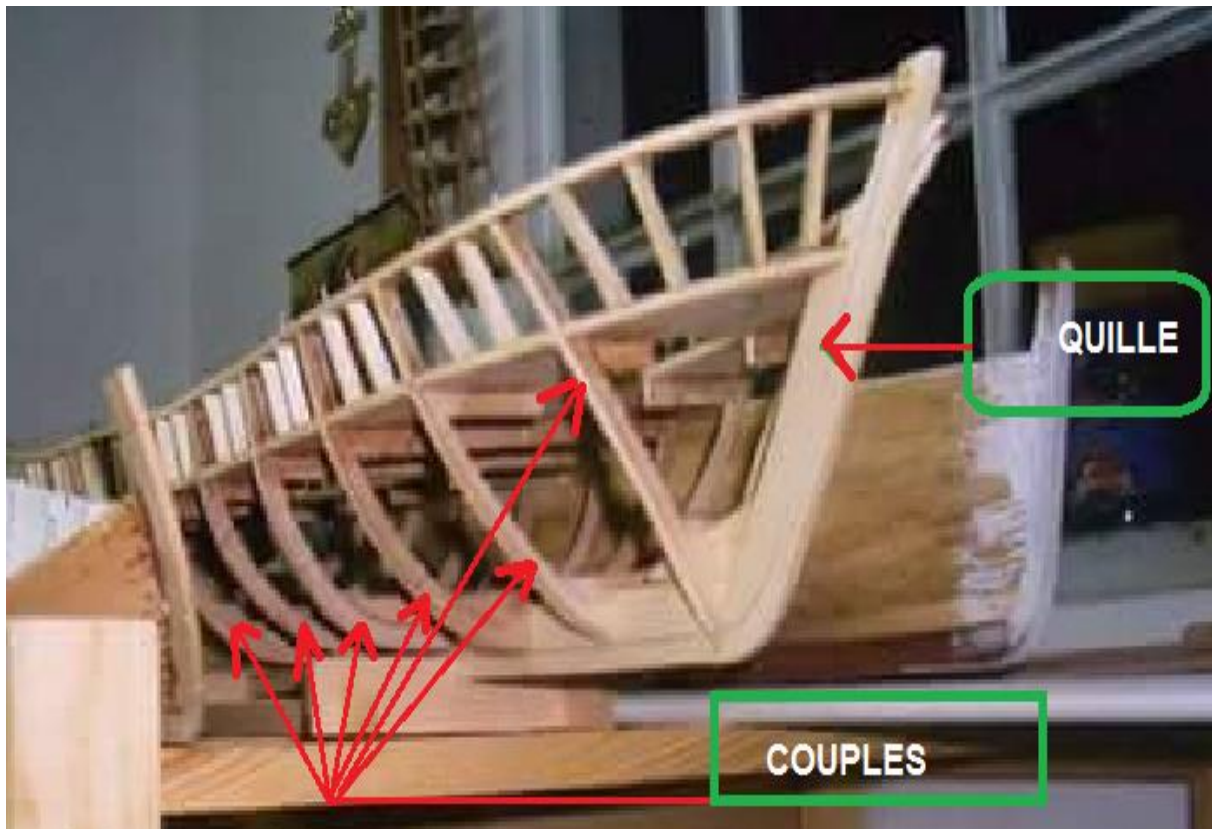


Figure III-11 : Conception de la coque

Pour mieux comprendre la théorie du navire d'une manière adéquate à notre niveau on a entamé les calculs analytique et l'expérimentale.

III-2 Calcul de volume de la carène



Figure III-12 : Le poids total de la maquette

Le déplacement (poids) de la maquette est : 1,7639 Kg donc elle déplace clairement un volume de 17639 cm^3 à l'eau douce.

$$\rho_{\text{ed}} = \frac{\Delta}{\nabla} \Rightarrow \nabla = \frac{\Delta}{\rho_{\text{ed}}} = \frac{1,7639}{1000} = 1,7639 \times 10^{-3} (\text{m}^3) = 17639 \text{ cm}^3$$

Ce volume a la relation proportionnelle avec le tirant d'eau.

III-3 Calcul des surfaces de flottaisons

Après le relèvement des demi-ouvertures (les Y_i) et les écartement (λ_i) par logiciel ANSYS pour chaque surface de flottaison, correspondante aux tirant d'eau qui vari de [T1 à T4] par 1(cm) en utilisant la deuxième règle de Trapèze comme suivant :

Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva

Tableau III-1 : Le tableau des demi-ouvertures pour chaque surface de flottaison par centimètre.

| SURFACE DE FLOTTAISON | LES DEMI-OUVERTURES VI | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 |
| A1 | 6.825 | 7.953 | 3.673 | 4.077 | 9.334 | 9.354 | 9.062 | 8.18 | 6.965 | 5.395 | 3.756 | 2.107 | 0.456 |
| A2 | 9.943 | 10.371 | 10.803 | 11.198 | 11.526 | 11.719 | 11.681 | 11.297 | 10.497 | 9.23 | 7.436 | 4.959 | 2.135 |
| A3 | 9.819 | 10.376 | 10.943 | 11.397 | 11.751 | 11.868 | 11.873 | 11.67 | 10.974 | 9.81 | 8.111 | 5.892 | 3.158 |
| A4 | 9.303 | 10.044 | 10.771 | 11.347 | 11.762 | 12.031 | 12.103 | 11.894 | 11.309 | 10.25 | 8.638 | 4.462 | 3.742 |

$$A = h\left(\frac{y_1}{2} + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + \dots + y_{12} + \frac{y_{13}}{2}\right)$$

$$A_1 = \frac{0.456 \cdot 0.79}{2} + 5.385 \left[\frac{1}{2} \cdot 6.825 + 69.856 + \frac{1}{2} \cdot 0.456 \right] = 395.9587 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 2A_1 = 2 \cdot 395.9587 = 791.9174 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = \frac{2.135 \cdot 3.54}{2} + 5.385 \left[\frac{1}{2} \cdot 9.943 + 110.717 + \frac{1}{2} \cdot 2.135 \right] = 632.51001 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 2A_2 = 2 \cdot 632.51001 = 1265.02002 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = \frac{3.158 \cdot 4.678}{2} + 5.385 \left[\frac{1}{2} \cdot 9.819 + 114.665 + \frac{1}{2} \cdot 3.158 \right] = 659.7981 \text{ cm}^2$$

$$S_3 = 2 \cdot 659.7981 = 1319.5962 \text{ cm}^2$$

$$A_4 = \frac{3.742 \cdot 5.214}{2} + 5.385 \left[\frac{1}{2} \cdot 9.303 + 116.611 + \frac{1}{2} \cdot 3.742 \right] = 672.8292 \text{ cm}^2$$

$$S_4 = 2A_4 = 2 \cdot 672.8292 = 1345.6584 \text{ cm}^2$$

A partir de logiciel ANSYS 16.0 on obtient les quatre, surface de flottaison comme suivant :

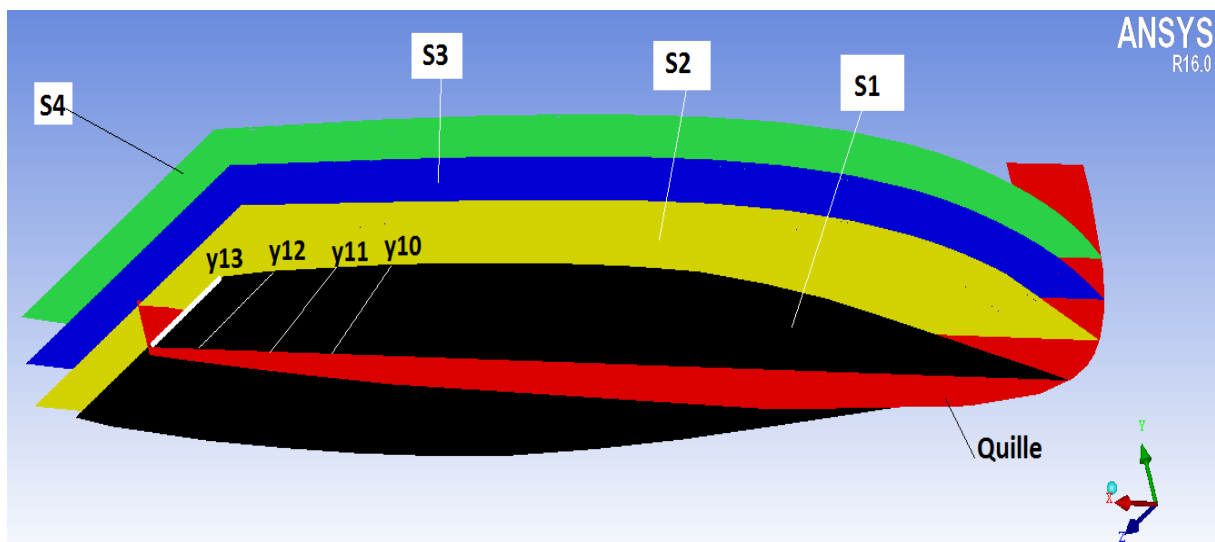


Figure III-13 : Déplacement du plan d'eau du bas en haut par 2 (cm).

III-4 Déduisons le tirant d'eau « T »

On va projeter le volume de la carène en fonction du tirant d'eau

Application numérique :

$$\begin{aligned} T_4 \rightarrow \nabla_4 &= h\left(\frac{1}{2}S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + \frac{1}{2}S_4\right) \\ &= 0.2 [0+7.9191+12.6502+13.1959+\frac{1}{2} (13.4565)] \\ &= 0.2(40.49345) \end{aligned}$$

$$T_4 \rightarrow \nabla_4 = \mathbf{8.09869 \text{ dm}^3}$$

$$\begin{aligned} T_3 \rightarrow \nabla_3 &= h\left(\frac{1}{2}S_0 + S_1 + S_2 + \frac{1}{2}S_3\right) \\ &= 0.2[0+7.9191+12.6502+\frac{1}{2} (13.1959)] = 0.2(27.16725) \end{aligned}$$

$$T_3 \rightarrow \nabla_3 = \mathbf{5.43345 \text{ dm}^3}$$

$$\begin{aligned} T_2 \rightarrow \nabla_2 &= h\left(\frac{1}{2}S_0 + S_1 + \frac{1}{2}S_2\right) \\ &= 0.2[0+7.9191+\frac{1}{2} (12.6502)] = 0.2(14.2442) \end{aligned}$$

$$T_2 \rightarrow \nabla_2 = \mathbf{2.84884 \text{ dm}^3}$$

$$\begin{aligned} T_1 \rightarrow \nabla_1 &= \nabla_4 - \frac{3h}{8} (1S_1 + 3S_2 + 3S_3 + 1S_4) \\ &= 8.09869 - \frac{3h}{8} [7.9191+3(12.6502)+3(13.1959)+13.4565] \\ &= 8.09869 - \frac{3(0.2)}{8} (98.9139) \\ &= 8.09869 - 7.4185425 \end{aligned}$$

$$T_1 \rightarrow \nabla_1 = \mathbf{0.6801475 \text{ dm}^3}$$

Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva

Les calculs de ces 04 surfaces de flottaison nous a permet de calculer les volumes de carènes pour les 04 tirants d'eau en allant de $T = 02 \text{ cm}$ à $T = 08 \text{ cm}$ en utilisant les 02 méthodes de Trapèze et Simpson.

Traçage la relation entre le volume et le tirant d'eau :

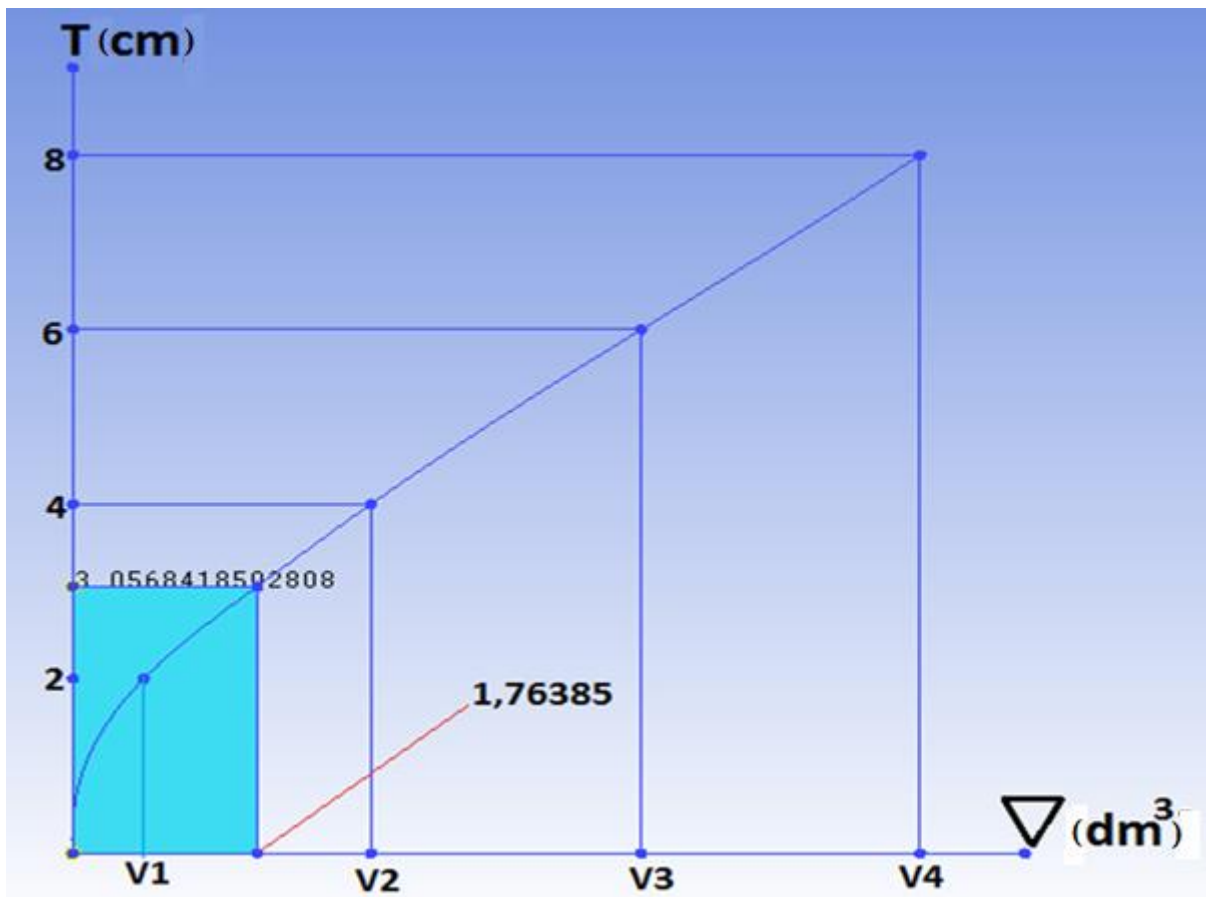


Figure III-14 : Volume de la carène en fonction du tirant d'eau

Nous pesons la maquette par la balance électronique précise trouvant son poids égale à $\Delta = 1,7639 \text{ Kg}$, par le principe d'Archimède en eau douce nous trouvons le volume total de la carène correspond à ce déplacement (poids) égale à $\nabla = 1,7639 \text{ dm}^3$, ce volume réel est projeté dans la courbe de la **Figure III-14**. ceci donne le résultat de tirant d'eau $T = 3,056 \text{ cm}$.

III-5 Distinction de la surface de flottaison

On va projeter le tirant d'eau sur la courbe surface de flottaison en fonction du tirant d'eau.

Avec le tirant d'eau $T = 3,056 \text{ cm}$, et la figure (III-14) à l'aide de logiciel ANSYS on peut trouver facilement la surface de flottaison qui correspond à ce tirant d'eau est

$S_f = 11,7726 \text{ dm}^2$, ce résultat illustré sur la figure (III-15).

Selon le logiciel ICEM CFD 16.0, nous a permis de relever les demis ouvertures pour chaque surface de flottaison à travers les couples, les demis ouvertures sont des valeurs pour dessiner les contours de la surface de flottaison, nous intégrons ces valeurs dans la méthode de Trapèze pour le calcul de 04 surfaces de flottaison de différence de tirant d'eau de 02 [cm] entre chaque surface.

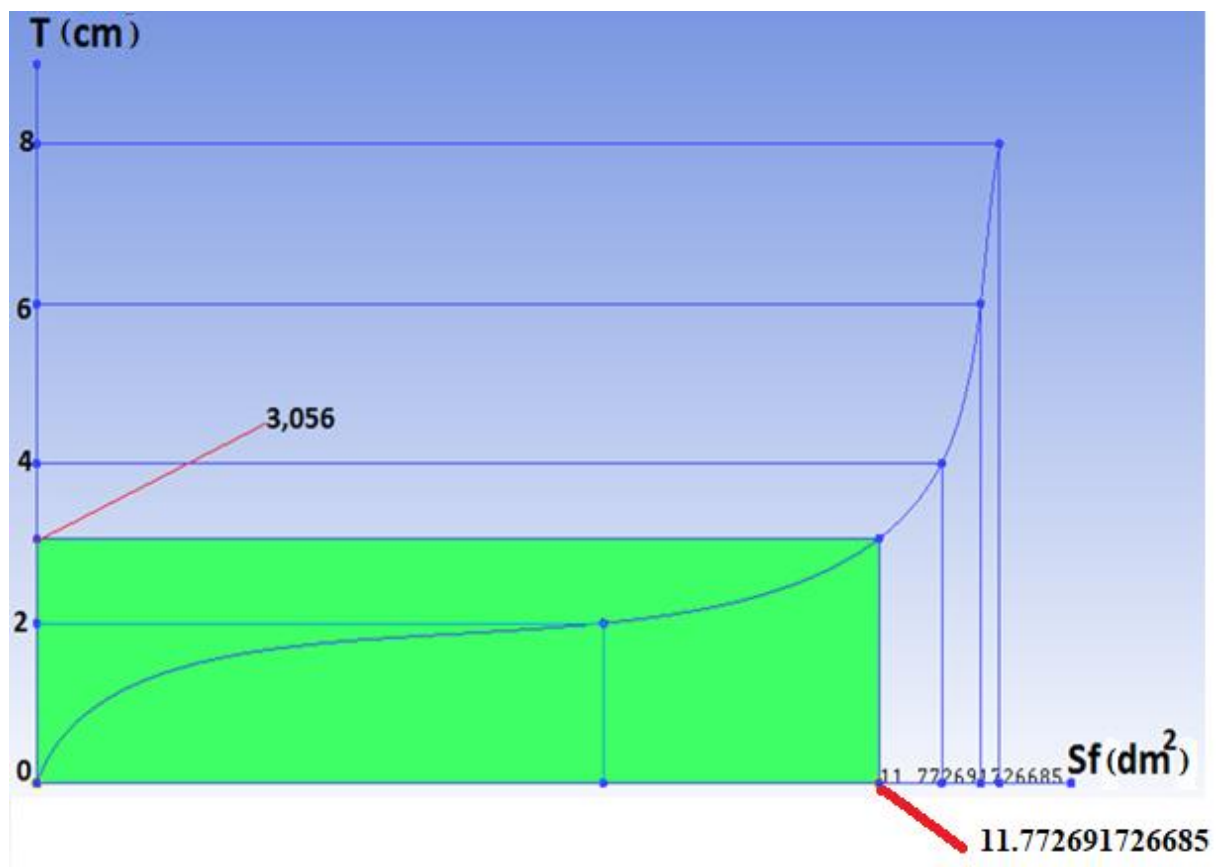


Figure III-15 : Projection tirant d'eau pour trouver la surface de flottaison

Ce tirant d'eau on la projeté dans la **Figure III-15** où nous avons trouvé la surface de flottaison réelle égale $S_f = 11,772 \text{ dm}^2$, cette surface de flottaison est utilisée pour le calcul de TPC.

III-6 Calcul de TPC à l'eau douce

$$\text{TPC} = \frac{\text{WPA} \times \rho_{ed}}{100}$$

$$\text{TPC} = \frac{11,7726 \times 10^{-2} \times 1}{100} = 0,00117726 \text{ t/cm} = 1,17726 \text{ kg/cm}$$

C'est-à-dire à l'eau douce il faut 1,17726 kg pour enfoncer 1 cm.

III-7 Validation par test expérimentale

Nous fabriquons par une méthode locale un bassin de carènes comme indique la figure ci-dessous.



Figure III-16 : Banc d'essai (Bassin de carène).



Figure III-17 : La maquette dans le bassin.

Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva

Nous avons calculé le TPC et nous avons trouvé qu' il nous faut 1,17726 kg pour enfoncer 1cm , ce résultat théorique est confirmé par le test expérimental voir la figure ci-dessous :

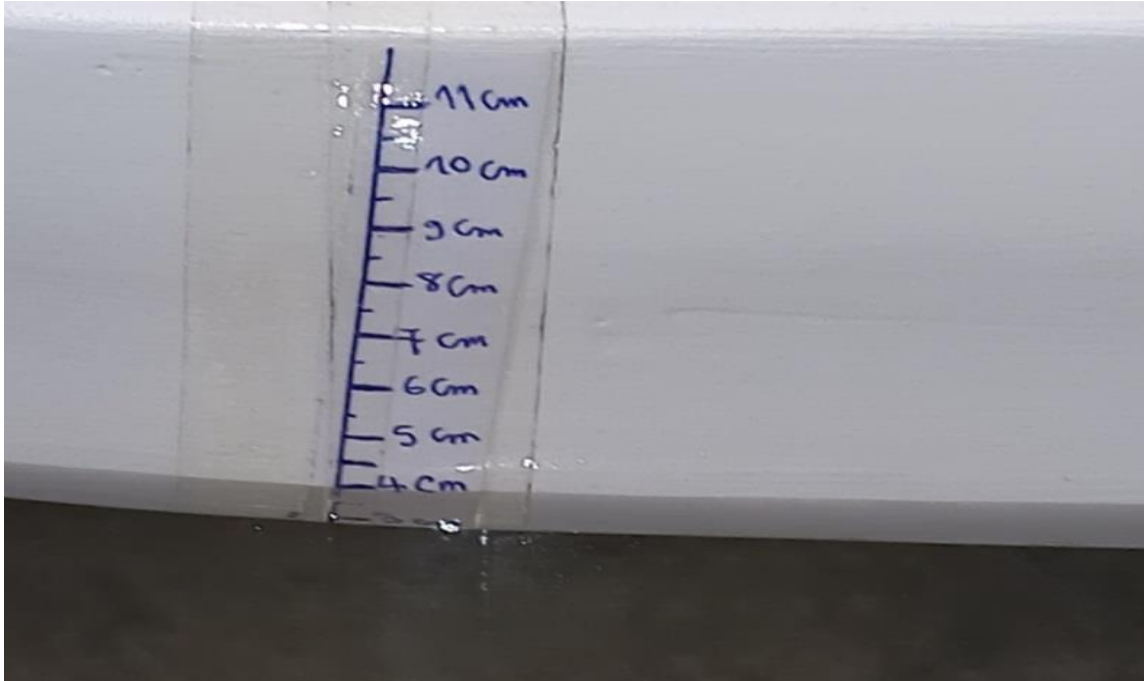


Figure III-18 : Confirmation de TPC par méthode expérimental (1 cm).

Ceci donne le résultat de tirant d'eau $T = 3,056 \text{ cm}$, ce résultat est confirmé expérimentale comme suivant :



Figure III-19 : Confirmation de tirant d'eau.

Chapitre III : Etude de cas d'une maquette du yacht type Riva

Pour trouver la stabilité et le déplacement de notre maquette, on a effectué une série d'expériences à chaque fois on ajoute des poids et on vérifie l'inclinaison transversale du navire (la gîte) à l'aide d'une application (Clinomètre) sur un smartphone ; les poids utilisés sont comme suivants :

» Le poids de la maquette = 1763,85 g

» Le poids de portable = 241,55 g

» La profondeur de l'eau dans le bassin = 30 cm

» 02 Masses = 214,3g ; 214,4 g (Figure III-21)

Le test expérimental pour le calcul de la stabilité transversale commence juste après les confirmations de tirant d'eau et TPC.

Le calcul de la stabilité transversale expérimentale se fait par l'utilisation d'un smart phone équipé d'un clinomètre pour la mesure de gîte, et le déplacement de poids de 214,4 g de bâbord vers tribord à bord de cette maquette d'une distance de 08 cm, comme indique la la figure ci-dessous :

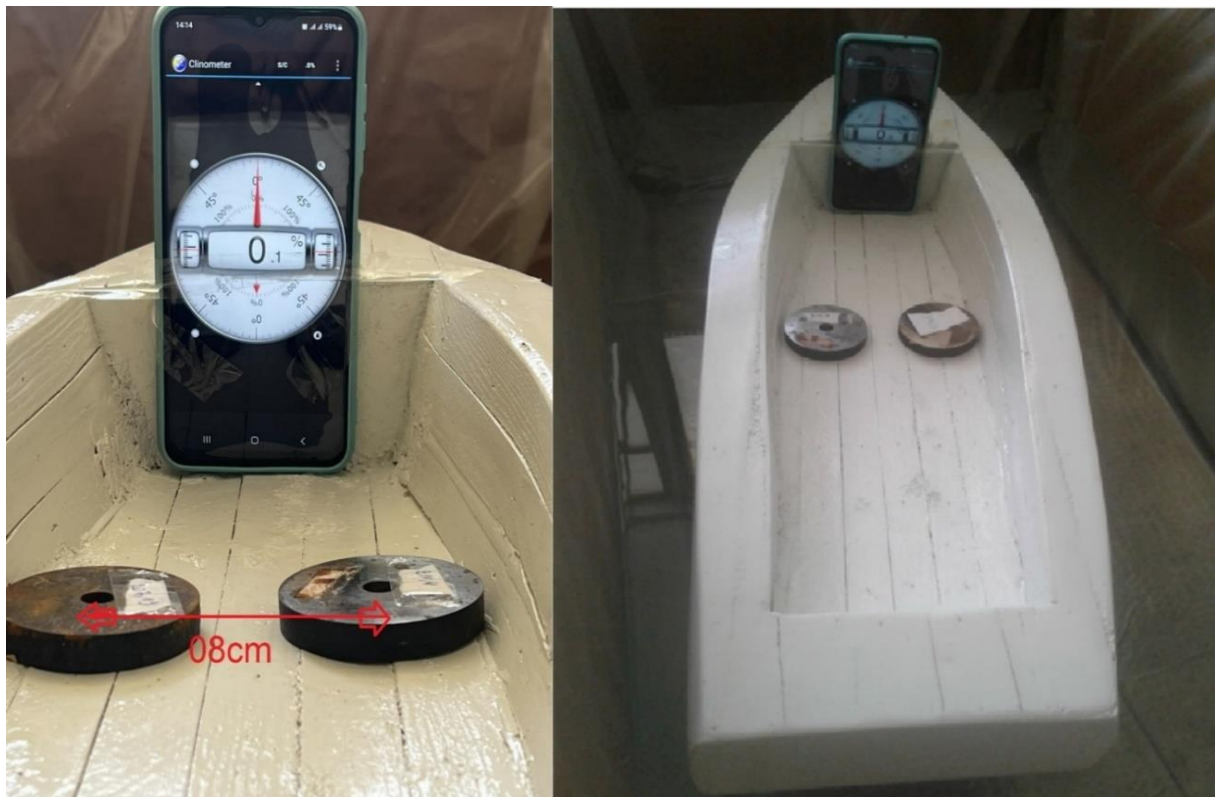


Figure III-20 : Vérification de la stabilité de la maquette.

III-8 Tests expérimentaux

La figure ci-dessous représente les différentes masses que nous avons utilisées dans notre expérience, nous avons utilisées 8 masses différentes, qui sont comme suivantes : 202.96 ; 206.04 ; 207.19 ; 211.28 ; 214.3 ; 214.4 ; 215.42 ; 195.79.



Figure III-21 : Les masses utilisés dans nos expériences.

NB : Les masses utilisées sont en gramme (g).

Nous voulons savoir quelle est l'influence de déplacement(Δ) sur cette stabilité transversale, par le même déplacement de poids à bord pour 07 autres cas, cette curiosité scientifique est entamée expérimentalement, voir les Figures III.22 jusqu'à Figure III-28.



Figure III-22 : Premier essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=5,3^\circ$)



Figure III-23 : Deuxième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=4,8^\circ$)



Figure III-24 : Troisième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha=4,4^\circ$)



Figure III-25 : Quatrième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,8$)



Figure III-26 : Cinquième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,3^\circ$)



Figure III-27 : Sixième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 3,1^\circ$)



Figure III-28 : Septième essai expérimental pour le calcul de la stabilité transversal ($\alpha= 2,7^\circ$)

III-9 Calculs des déplacements sur navire

On a : $\Delta_1 = \Delta_i + T$

$$= 1763.9 + 241.55 + 214.4 + 214.3$$

$$\Delta_1 = 2434.15 \text{ g} = 2.43415 \text{ kg}$$

$$\Delta_2 = 2434.15 + 211.28 = 2645.43 \text{ g} = 2.64543 \text{ kg}$$

$$\Delta_3 = 2645.43 + 195.79 = 2841.22 \text{ g} = 2.84122 \text{ kg}$$

$$\Delta_4 = 3044.18 \text{ g} = 3.04418 \text{ kg}$$

$$\Delta_5 = 3250.22 \text{ g} = 3.25022 \text{ kg}$$

$$\Delta_6 = 3457.41 \text{ g} = 3.45741 \text{ kg}$$

$$\Delta_7 = 3672.85 \text{ g} = 3.67285 \text{ kg}$$

Tableau III- 2 : Les résultats des essais expérimentaux.

| Cas (kg) | Poids (kg) déplacé de Bâbord vers Tribord | Gîtes |
|----------------------|---|------------------------|
| $\Delta_1 = 2,4341$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_1 = 5,3^\circ$ |
| $\Delta_2 = 2,64536$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_2 = 4,8^\circ$ |
| $\Delta_3 = 2,84115$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_3 = 4,4^\circ$ |
| $\Delta_4 = 3,04411$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_4 = 3,8^\circ$ |
| $\Delta_5 = 3,25051$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_5 = 3,3^\circ$ |
| $\Delta_6 = 3,4577$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_6 = 3,1^\circ$ |
| $\Delta_7 = 3,67312$ | $0,214 \times 8 \text{ cm}$ | $\alpha_7 = 2,7^\circ$ |

Remarque : 8 cm signifie la distance de déplacement du poids de Bâbord vers Tribord

III-10 Calculs de la stabilité transversale GM

$$GM_i = \frac{w_i \times d}{\Delta_i \times \text{tg } \alpha_i}$$

$$GM_1 = \frac{w_1 \times d}{\Delta_1 \times \text{tg } \alpha_1}$$

$$GM_1 = \frac{214.4 \times 8}{2434.15 \times \text{tg}(5.3)} = 7.595 \text{ cm}$$

$$GM_2 = \frac{w_2 \times d}{\Delta_2 \times \text{tg } \alpha_2}$$

$$GM_2 = \frac{214.4 \times 8}{2645 \times \text{tg}(4.8)} = 7.721 \text{ cm}$$

$$GM_3 = \frac{w_3 \times d}{\Delta_3 \times \text{tg } \alpha_3}$$

$$GM_3 = \frac{1715.2}{2841.22 \times \text{tg}(4.4)} = 7.845 \text{ cm}$$

$$GM_4 = \frac{w_4 \times d}{\Delta_4 \times \text{tg } \alpha_4}$$

$$GM_4 = \frac{1715.2}{3044.18 \times \text{tg}(3.8)} = 8.482 \text{ cm}$$

$$GM_5 = \frac{w_5 \times d}{\Delta_5 \times \text{tg } \alpha_5}$$

$$GM_5 = \frac{1715.2}{3250.22 \times \text{tg}(3.3)} = 9.1522 \text{ cm}$$

$$GM_6 = \frac{w_6 \times d}{\Delta_6 \times \text{tg } \alpha_6}$$

$$GM_6 = \frac{1715.22}{3457.41 \times \text{tg}(3.1)} = 9.16 \text{ cm}$$

$$GM_7 = \frac{w_7 \times d}{\Delta_7 \times \text{tg } \alpha_7}$$

$$GM_7 = \frac{1715.2}{3672.85 \times \text{tg}(2.7)} = 9.902 \text{ cm}$$

A partir des résultats au dessus on obtient la courbe suivante

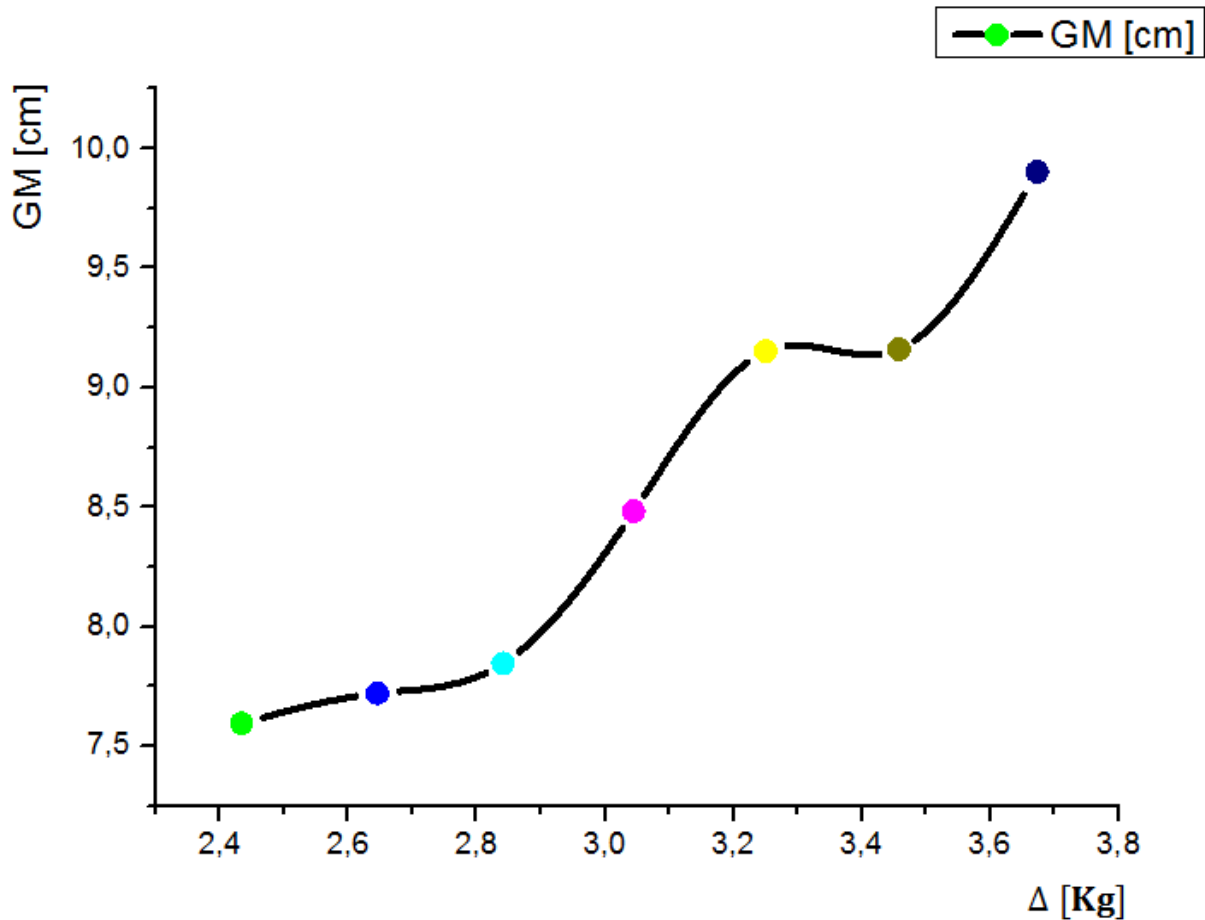


Figure III-29 : Courbe de la stabilité transversale GM en fonction de déplacement

Les résultats de la stabilité transversale GM expérimentale montrent que la stabilité transversale GM est directement proportionnelle avec l'augmentation de de déplacement selon la Figure III.28 , par contre le déplacement(Δ) et la gîte α sont inversement proportionnels selon le Tableau III.2.

III-11 Calculs du moment de redressement M_r

$$M_r = \Delta_i \times GM_i \times \sin \alpha_i$$

On a:

$$Mr_1 = 2434,1 \times 7,595 \times \sin (5,3) = 1,707 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_2 = 2645,36 \times 7,721 \times \sin (4,8) = 1,709 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_3 = 2841,15 \times 7,845 \times \sin (4,4) = 1,709 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_4 = 3044,11 \times 8,483 \times \sin (3,8) = 1,711 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_5 = 3250,51 \times 9,151 \times \sin (3,3) = 1,712 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_6 = 3457,7 \times 9,159 \times \sin (3,1) = 1,712 \text{ Kg.cm}$$

$$Mr_7 = 3673,12 \times 9,901 \times \sin (2,7) = 1,713 \text{ Kg.cm}$$

A partir des résultats au dessus on obtient la courbe suivante :

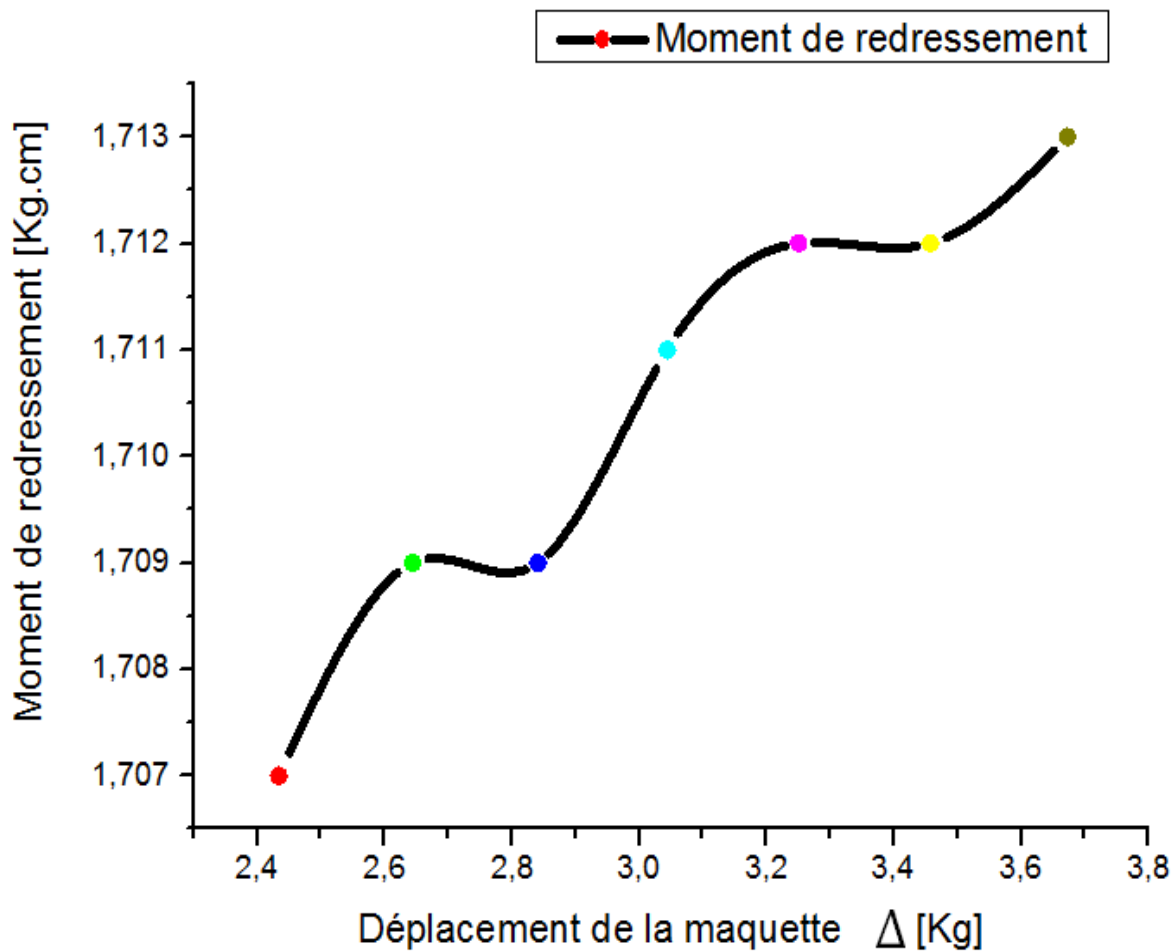


Figure III-30 : Courbe des moments de redressement en fonction de déplacement de la maquette

Les résultats de Moment de redressement M_r expérimentale montrent que le Moment de redressement M_r est directement proportionnelle avec l'augmentation de de déplacement selon la Figure III-29.

CONCLUSION

A la fin de notre travail expérimental dans la Faculté de Génie de la Construction, nous présentons les principales connaissances théoriques et pratiques en génie maritime, et les étapes que traverse notre expérience pour le projet de l'étude analytique et expérimentale d'une maquette du yacht comme exemple valable pour d'autres modèles réduits, ou à l'échelle réelle avec d'autres moyens plus sophistiqués.

Le but de ces calculs analytiques est de connaître les valeurs limite géométrique et hydrostatique du navire et de les confirmer par des essais expérimentaux tel que le calcul de volume de la carène pour chaque tirant d'eau et les surfaces de flottaisons pour des raisons d'exploitations durant le travail de réparation navale et surtout pour la sécurité des portiques (grues) qui soulève le bateau durant les travaux de réparation comme le carénage exemple le grattage, le sablage, cracheur par le jet d'eau.

L'étude de cette maquette nous permet d'apprécier la passion, le dévouement et le savoir-faire qui se cachent derrière chaque bateau en général, faisant de cette marque une icône intemporelle de l'industrie nautique de luxe.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le projet de construction d'une embarcation est un projet très intéressant et spécifiques malgré les difficultés rencontrées au débutant ; vu que l'expérience n'arrive pas seulement avec les calculs analytiques mais bien de la confirmer par des essais expérimentaux. Ceci rend l'exercice pratique un espace d'acquisition de l'expérience.

Il existe une large diversité dans le domaine des professionnelles de l'embarcation marine ; à savoir la mission exercée.

Le plus important dans notre étude est la diversité de points de vue formes géométrique des coques qui possèdent une relation directe avec les cours de l'architecture navale : hydrostatique et la stabilité statique des navires.

Nous avons constaté qu'à l'aide de logiciel ANSYS R16, nous pouvons voir les différentes lignes qui constituent le plan de formes d'une coque du bateau.

Nous avons tracé la courbe caractéristique du tirant d'eau en fonction du volume de la carène, où nous avons projeté le volume total de la carène en fonction du déplacement de la maquette. La valeur de tirant d'eau trouvé égal à 3,056 cm, ce résultat a été confirmé par les essais expérimentaux.

Ensuite, nous avons tracé la courbe caractéristique du tirant d'eau en fonction de la surface de flottaison ; en projetant la valeur du tirant d'eau 3,056 cm ; nous avons trouvé la surface de flottaison égale à 11,772 dm² utilisée pour le calcul de TPC qui a été confirmé par le test expérimental. Le paramètre TPC est nécessaire pour le chargement concernant les opérations de manutention pour ne pas déplacer la charge maximale autorisée du bateau.

Nous avons trouvé expérimentalement que la stabilité transversale et le moment de redressement de la maquette évoluent proportionnellement avec son propre déplacement si le poids déplacer à bord est le même, par contre la gîte est inversement proportionnelle au déplacement de la maquette.

La partie expérimentale de ce mémoire est pleine de techniques de la mécanique concrètes au domaine maritime. Premièrement, nous avons dessiné les couples et le tableau arrière dans des feuilles de contreplaqué pour fabriquer des gabarits, qui servent à faciliter la fabrication des couples et minimiser les erreurs. Concernant la quille, l'étrave et le brion, ils sont assemblés en seul pièce. L'assemblage des différentes composantes de la structure se fait par

Conclusion Générale

la résine marine catalysée par un durcisseur qui très efficace dans le domaine de la construction navale. Après l'assemblage de la structure par la fixation des couples sur la quille, nous avons commencé le bordage avec des feuilles de contre-plaqué.

Pour des travaux à venir, nous proposons de tester d'autres dimensions de la maquette en utilisant l'eau de mer et refaire toutes les expériences à nouveau, en ajoutant les résultats de divers moments pour le même déplacement.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dr. ERROUANE Lahouaria, Construction des Navires, Université Des sciences et de la Technologie MB d'Oran, Septembre 2016.
- [2] OMAR BAAZZA, COURS DE CONSTRUCTION, ISPM AGADIR, Mars 2020.
- [3] Michel BENICOURT ,Raymond SERVIÈRES , Navires - Architecture navale - Encyclopædia Universalis, Universalis.fr.
- [4] Rammal Hassein, Conception et étude d'un bateau trimaran, Mémoire d'ingénieur Cnam, Février 2015.
- [5] Yasar Argun ISIN, _ Théorie du navire(vol1),livre Statique et Dynamique, Université de Kinshasa.
- [6] Djebli Mohammed Abdelkader, Stabilité des navires, Université Des sciences et de la Technologie MB d'Oran, 2018.
- [7] Mohamed Jarmouni, _Equilibre du navire,Wikipédia,11/04/2016.
- [8] Grinnaert François, Laurens Jean-Marc, Stabilité du navire, Théorie- Réglementation- Méthodes de calculs, Edition Ellipses, 04.06.2013.
- [9] DJEBLI Mohamed Abdelkader, Application des Technologies Nouvelles à l'Architecture Navale, thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Année Universitaire 2015 / 2016.
- [10] Amine Mouffak, _ LE NAVIRE : CARACTÉRISTIQUES ET DÉFINITIONS, Manœuvre 5ème année, 2014/2015.
- [11] Dominique Lavoille, Étude sur la flottabilité et la stabilité du navire..., Théorie sur la stabilité du navire, mecanique-bateau.com, <https://www.academia.edu>.
- [12] L. Martin Witkowski, Partie Hydrodynamique Navale, LU2ME108, 11 février 2021.
- [13] Ligne de tins..., Institut Supérieur des Pêches Maritimes,04/2020.
- [14] Albertus, Construction d'une coque en bois, construire une coque, c'est facile -1, navi.modelisme.com.
- [15] TRAFICOM, Agence des transports et des Communications, 2019, <https://ec.europa.eu> › tris › index.cfm.
- [16] Archimède. (2010). On Floating Bodies. Cambridge University Press.
- [17] Stabilité du navire PDF, <http://fr.Scribd.com>.

[18] Titre : Principales of Naval Architecture Auteur : Edward V. Lewis (éditeur) Edition : Troisième édition Éditeur : Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) Année : 1998

[19] P.-A. Reymond, Architecte et Expert naval, Chargé de cours CEPM, Architecte et Expert naval, BREVE APPROCHE DE CALCULS DE CARÈNES ET STABILITE, 2006-2008.

[20] Captain D.R. Derrett, Ship Stability for Masters and Mates, Éditeur : Elsevier Butterworth-Heinemann, Édition : Sixième édition, 2006