



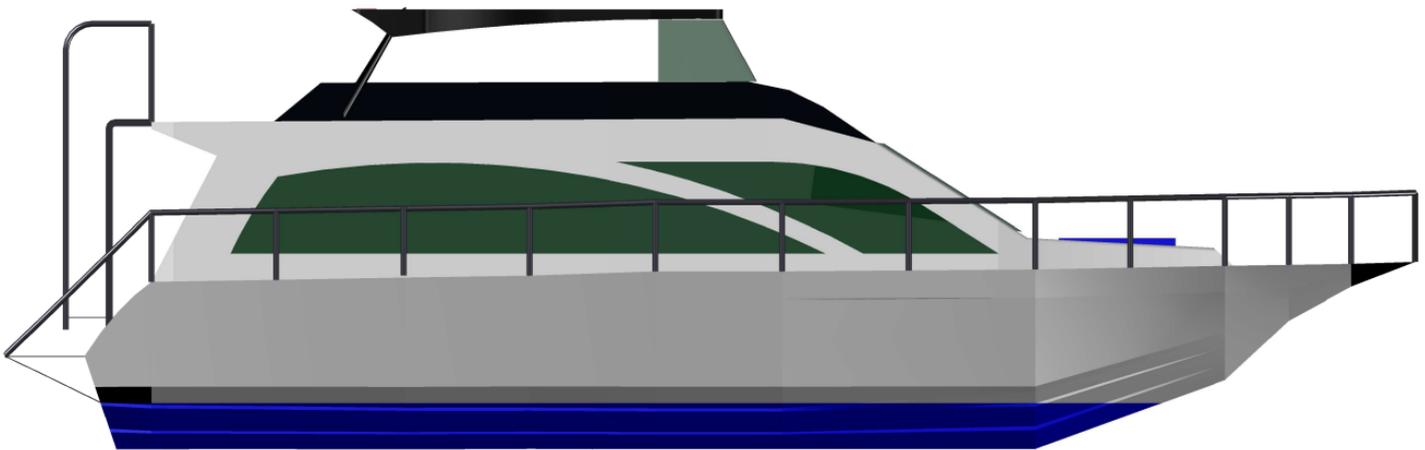
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL
PARCOURS GENIE INDUSTRIEL

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur, grade
Master en génie industriel*

ETUDE ET CONCEPTION D'UN YACHT



Présenté par : **RASAMOELA Tolojanahary Ravakiniaina**

Directeur de mémoire : **Monsieur RATSARAZAKA Michel**

Date de soutenance : *Lundi 12 Décembre 2016*

Promotion 2015



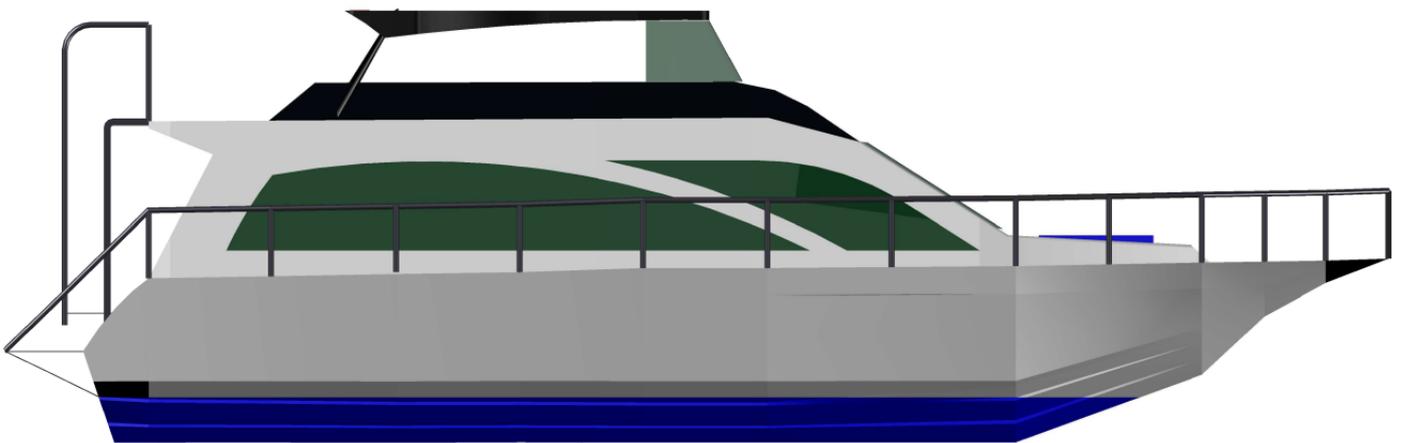
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL
PARCOURS GENIE INDUSTRIEL

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur, grade
Master en génie industriel*

ETUDE ET CONCEPTION D'UN YACHT



Présenté par : **RASAMOELA Tolojanahary Ravakiniaina**

Directeur de mémoire : **Monsieur RATSARAZAKA Michel**

Date de soutenance : *Lundi 12 Décembre 2016*

Promotion 2015

REMERCIEMENTS

« Je tiens à remercier Le Seigneur tout puissant, de tout mon cœur de m'avoir donné sa grâce et sa bonté durant la réalisation de ce travail de mémoire de fin d'étude».

Ce mémoire n'a pu être réalisé sans la participation de nombreuses personnes. Ainsi mes sincères remerciements s'adressent aux personnes suivantes:

- ❖ Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo de m'avoir donné la permission d'effectuer mes études au sein de l'école.
- ❖ Madame RAKOTOMANANA Dina, chef de la Mention Génie Mécanique et Industriel; qui n'a pas ménagé ses efforts pour le bon déroulement de notre formation au sein du département.
- ❖ Monsieur RAMILISON Jean Masy, Maître de Conférences et enseignant à l'ESPA qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance de mémoire.
- ❖ J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur RATSARAZAKA Michel, Architecte Naval et enseignant à l'ESPA, et Monsieur Jean Guy GABRIEL, Directeur Technique de la Société POLYMA: notre Encadreur Professionnel, pour m'avoir encadré durant la longue période qu'a nécessité la réalisation de ce mémoire. Ils ont fait tous les efforts possibles pour mener à terme ce travail: leurs encadrements, leurs conseils concernant la rédaction ainsi que leurs relectures m'ont été d'une aide précieuse.
- ❖ Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps, malgré leurs lourdes tâches, pour juger ce travail. Je leur suis entièrement reconnaissant de l'intérêt qu'ils ont porté sur ce mémoire:
 - Monsieur ANDRIAMANALINA William, Enseignant à l'ESPA
 - Monsieur RAMAHAROBANDRO Germain, Enseignant à l'ESPA
- ❖ Tous les Enseignants formateurs qui trouveront une admiration dans ce rapport pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont dispensé.
- ❖ A toute ma famille surtout à mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi durant ces années, pour leur soutien morale et financier. Sans votre aide, ce travail est inachevable.
- ❖ Enfin, un vif remerciement s'adresse aussi à tous mes collègues et amis qui pour leurs aimables contributions à la réalisation de ce travail. Et à toute personne physique ou morale qui m'a aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Table des matières

PARTIE I: GENERALITES SUR LES BATEAUX ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	2
I-1- Introduction	2
I-2- Généralités sur les bateaux.....	2
I-2-1- Les catégories de bateaux selon leurs usages.....	2
I-2-2- Les catégories selon le nombre de coques	3
I-2-3- Les types de coques	3
I-3- Matériaux de construction navale	5
II-3-1- Les matériaux utilisés en construction navale	5
II-3-2- Le PRVT.....	8
I-3-3- Technologie de mise en œuvre du PRVT au sein de Polyma	14
I-4- Conclusion.....	19
PARTIE II : CAHIER DES CHARGES	20
II-1- Introduction.....	20
II-2- Les forces appliquées à un navire et les types de propulsion.....	20
II-2-1- Les forces appliquées à un navire	20
II-2-2- Les types de propulsion	21
II-3- Cahier des charges	26
II-3-1- Zone d'exploitation.....	26
II-3-2- Caractéristiques et descriptifs de la vedette rapide.....	33
II-3-3- Configuration d'aménagement et accessoires	36
II-4- Conclusion	39
PARTIE III : FLOTTABILITE ET STABILITE.....	40
III- 1 Introduction.....	40
III- 2 Plans de conception.....	40
III- 2- 1 Le plan des formes.....	40

III- 2- 2 Le plan structure ou plan de construction.....	40
III- 2- 3 Le plan d'ensemble.....	40
III- 2- 4 Le plan des installations du circuit électrique et du circuit carburant	40
III- 3 Devis de poids et centre de gravité	45
III-3-1 Définitions	46
III-3-2 Devis de poids	46
III-3-3 Recherche du centre de gravité.....	52
III- 4 Flottabilité.....	57
III-4-1 Définition.....	57
III-4-2 Détermination du déplacement et du volume de carène.....	57
III-4-3 Aires des couples	57
III-4-4 Aires des lignes d'eau.....	60
III-4-5 Le centre de carène	63
III-5 Stabilité	65
III-5-1 Définition.....	65
III-5-1 Stabilité transversale du navire.....	65
III-5-2 Stabilité pour les grandes inclinaisons.....	70
III-7 Conclusion	82
PARTIE 4 : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET RENTABILITE ECONOMIQUE	83
IV -1 ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL	83
IV -1- 1 Introduction	83
IV -1-2 Les différentes étapes de l'étude d'impacts environnementaux.....	83
IV -2 RENTABILITE ECONOMIQUE	89
IV -2-1 Coût des matières premières.....	89
IV -2-2 Rentabilité du projet	89
IV-3 Conclusion	90

CONCLUSION GENERALE	91
BIBLIOGRAPHIE	92
WEBOGRAPHIE.....	94
ANNEXES	95
Annexe 1 : ECHELLE DE BEAUFORT ET ETAT DE LA MER.....	95
Annexe 2 : EXIGENCES MINIMALES EN MATIÈRE D'ÉQUIPEMENT DE SÉCURITÉ SELON LE TYPE ET LA LONGUEUR DE L'EMBARCATION	98
FICHE DE RENSEIGNEMENTS	100

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR :	Association Française de Normalisation
APMF:	Agence Portuaire, Maritime et Fluviale
COV:	Composés Organiques Volatils
DIANA:	Diego Suarez, Nosy Be, Ambanja et Ambilobe
ESPA :	Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo
GPS:	Global Positioning System
MPa:	Méga Pascal
PAEM :	Peroxyde d'acétone éthyle méthyle
PFOI :	Pèche et Froid Océan Indien
POLYMA :	Polyester Malagasy
PRVT :	Polyester Renforcé de Verre Textile
RT :	Roving tissé
SAVA :	Sambava, Antalaha, Vohémar, Andapa
SECREN :	Société d'Etudes, de Construction et de Réparation Navales
UV :	Ultra-Violet
V-drive:	Transmission en V
VHF:	Very high Frequency
WL:	Water line (Ligne de flottaison)
Z-drive:	Transmission en Z

LISTES DES FIGURES

Figure 2: Exemple de bateau multicoque	3
Figure 3:Coque à déplacement.	4
Figure 4:Coque planante.	4
Figure 5 : Coque semi-planante.	5
Figure 6: Matériau composite.	7
Figure 7 : Répartition des divers matériaux en construction navale pour les bateaux de plaisance.	8
Figure 8 : Mat.	10
Figure 9: Roving.....	11
Figure 10: Application de la résine de stratification et du gelcoat sur une moule.	12
Figure 11: Gelcoat mélangé à une couleur.....	13
Figure 12: Accélérateur et catalyseur.	13
Figure 13: Quelques outils utilisés.	16
Figure 14: le moule.	17
Figure 15: Mélange du catalyseur et du gelcoat et application sur le moule.	18
Figure 16: Exemple de stratification.	19
Figure 17: Forces appliquées à un bateau en équilibre.	20
Figure 18: Forces appliquées à un bateau en mouvement.....	21
Figure 19: Un moteur hors-bord.....	22
Figure 20: Transmission V-drive.	23
Figure 21: Transmission en Z-drive.	23
Figure 22: Transmission en pod-drive.	23
Figure 23: Les caractéristiques d'une hélice.	24
Figure 24: Zone d'exploitation.....	27
Figure 25: Relief marin du Canal de Mozambique.	29
Figure 26 : Données statistiques de vent de Morondava.....	30
Figure 27: Distribution de la direction du vent en %.	30
Figure 28: Données statistiques de vent d'Antsiranana.	31
Figure 29 : Distribution de la direction du vent en %.	31
Figure 30: Dimensions d'un navire.	34
Figure 31: Cloisons d'étanchéité.....	35

Figure 32: Varangues et longrines.....	36
Figure 33: Feux de navigation.....	38
Figure 34: Référentiel.....	53
Figure 35: Coordonnées de l'aire immergée d'un couple.	58
Figure 36: Coubre des aires des couples.	59
Figure 37: Aire des lignes d'eau.	62
Figure 38: Angle de gîte θ	65
Figure 39: Assiette Ψ	66
Figure 40 : Rayon métacentrique.	66
Figure 41: Volume émergent et immergent de la carène.	67
Figure 42: Volume élémentaire du.....	68
Figure 43: Position du métacentre.....	69
Figure 44: Flottaison auxiliaire et isocarène.	70
Figure 45: Diagramme polaire.	72
Figure 46: Courbe de stabilité.	73
Figure 47: Moment redresseur.	74
Figure 48: Valeur du moment redressant et du moment inclinant.	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des fibres de renforcement et des résines	7
Tableau 2: Masse surfacique de Mat	9
Tableau 3: Nombre de pales des hélices et utilisations	25
Tableau 4: Nombre de Froude et caractère du navire	33
Tableau 5: Devis de masse de la coque, du plancher et des renforts	50
Tableau 6: Devis de masse de l'aménagement du bateau ainsi que la motorisation.....	51
Tableau 7: Devis de masse des équipements mécaniques, de l'accastillage et de la propulsion	52
Tableau 8: Moments statique de chaque élément de structure	56
Tableau 9: Coefficients de Tchebychev	57
Tableau 10: Coefficient de Tchebychev pour 5 divisions.....	57
Tableau 11: Valeur de x pour chaque coefficient de Tchebychev	58
Tableau 12: Ordonnées aux divisions	59
Tableau 13: Aires des couples.....	60
Tableau 14: Valeur de xi pour la ligne d'eau n°1	61
Tableau 15: Ordonnées aux divisions pour chaque ligne d'eau	62
Tableau 16: Aire des couples et des lignes d'eau.....	64
Tableau 17: Largeur à la flottaison à chaque division	69
Tableau 18: Surface de flottaison à 10°	71
Tableau 19: Surface de flottaison pour chaque angle	72
Tableau 20: Moment statique, bras de levier et hauteur métacentrique.....	73
Tableau 21: Description des matériaux de construction navale	84
Tableau 22: Les diverses sources de pollution marine.....	85
Tableau 23: Coût des matières premières	89

INTRODUCTION

Les navires ont été l'un des premiers moyens de transport qui ont accompagné l'évolution de l'homme. Auparavant, ils avaient leur place dans le domaine du transport de personnes, et de nos jours ils monopolisent le marché du transport de marchandises. De ce fait, la construction des navires est devenue de plus en plus moderne et importante. Cette évolution va de pair avec celle de l'architecture navale. Mais malgré les progrès accomplis, l'architecture navale va rester un art nécessitant la connaissance, l'expérience et aussi la pratique.

La construction navale a désormais recours aux technologies les plus avancées afin de concevoir des navires plus performants et plus sécuritaires. Chaque type de bateau ainsi que son utilisation correspond à une technologie bien précise, ce qui fait qu'il existe un grand nombre de technologies de construction existantes.

Ce mémoire sera tourné vers un type de construction moderne avec un matériau qui gagne de plus en plus de place dans le monde du nautisme : le PRVT ou Polyester Renforcé de Verre Textile. L'objectif étant de construire un Yacht de 13,65 mètres de long en PRVT, les études ont été faites en collaboration avec la société de construction navale Polyester Malagasy (POLYMA). Une fois terminé, le navire naviguera dans le Canal de Mozambique, bordant la côte Ouest de Madagascar, plus précisément, entre Morondava et Antsiranana, dans le but d'aider la population de cette zone à avoir accès aux aides venant des autorités locales.

Ainsi, nous entamerons dans la première partie les généralités sur les bateaux ainsi que les matériaux de construction navale. En seconde partie, le cahier des charges du bateau sera détaillé pour mieux connaître les conditions dans lesquelles il va naviguer. L'étude de la stabilité et de la flottabilité s'en suivra pour aborder le côté technique, muni des divers plans qui illustrent la construction, étape par étape. Enfin, nous terminerons avec l'étude d'impact environnemental ainsi que la rentabilité économique du projet.

PARTIE I : GENERALITES SUR LES BATEAUX ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION.

I-1- Introduction

Par bateau, on entend un moyen de transport capable de flotter sur l'eau et de s'y déplacer, dirigé par ses occupants. L'imagination des architectes navals ainsi que les connaissances qu'ils ont acquises dans le domaine du nautisme ont donné naissance à des embarcations de tous genres et de toutes les formes. Les diverses catégories et les matériaux utilisés en construction navale seront mis en évidence dans cette partie.

I-2- Généralités sur les bateaux.

Les traits caractéristiques d'un navire répondent à de multiples critères tels que son utilisation, la zone d'exploitation, les performances attendues et les besoins économiques à satisfaire. Cette diversité est d'ailleurs telle qu'il ne peut être question de décrire ici tous les types de navires existants, mais seulement de présenter quelques exemples significatifs.

I-2-1- Les catégories de bateaux selon leurs usages

Le domaine d'utilisation d'un bateau est très vaste, et à chaque type de bateau correspond une utilisation bien spécifique. Si l'on tient compte de leur utilisation, on distingue 4 catégories :

a) Les navires militaires

Un navire se trouve dans la catégorie de navire militaire lorsqu'il appartient à la force armée. Dans ce cas, il peut s'agir d'un navire de surface ou d'un sous-marin. Avant, ils étaient destinés pour les conquêtes ou utilisés en tant que bâtiment de guerre, mais de nos jours, ils sont plutôt dédiés à la protection des eaux et des mers territoriales.

b) Les navires de commerce et service

Cette catégorie regroupe les navires destinés pour le transport fluvial et maritime. Cela concerne le transport de marchandises tel que les cargos et les porte-conteneurs, et le transport de passagers comme les paquebots de croisière. Les navires spéciaux tels que les navires océanographiques ou hydrographiques sont aussi classés comme étant des navires de service.

c) Les navires de pêche

Comme l'indique son nom, cette catégorie concerne les navires dont l'activité première est la pêche. On sait que dans le domaine halieutique, les méthodes d'exploitations peuvent être très artisanales (extensives) ou industrialisées (intensives). Le type de bateau utilisé va de pair avec ces méthodes : les bateaux de pêche vont de petites pirogues à des thoniers de 45 mètres.

d) Les navires de plaisance

Les navires de plaisance sont ceux qui sont destinés uniquement aux activités nautiques pratiquées pour le loisir. Dans cette catégorie, le confort et la sécurité des passagers passent avant les performances du navire.

I-2-2- Les catégories selon le nombre de coques

a) Les monocoques

Un monocoque est, comme l'indique son nom, une embarcation possédant une seule et unique coque. C'est la forme la plus courante de bateau. Ce type de bateau coûte moins chère à cause de la simplicité de sa mise en œuvre et est plus facile à concevoir. Il se trouve que les monocoques sont dotés d'une plus grande stabilité en mer. Toutefois, le confort à bord rivalise bien avec ceux des autres types.



Figure 1 : Bateau monocoque

Les multicoques

Contrairement aux monocoques, les multicoques possèdent plusieurs coques. Le catamaran un est un bateau à deux coques, le trimaran possède trois coques et le quadrimaran est une embarcation qui possède quatre coques identiques. Ces types de bateaux possèdent une puissance supérieure ainsi qu'un plus grand espace exploitable mais sa structure est moins rigide que celle d'un monocoque et sa technologie de mise en œuvre est plutôt complexe.

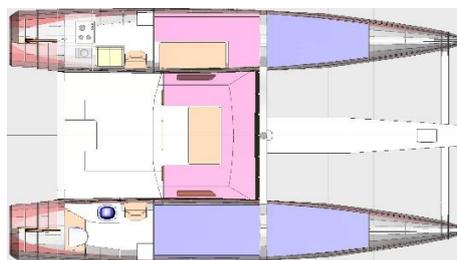


Figure 1: Exemple de bateau multicoque

I-2-3- Les types de coques

La coque est le constituant premier d'un bateau : elle forme le flotteur, c'est-à-dire l'élément assurant la flottabilité et l'étanchéité. La coque est disponible en plusieurs types. Chaque type possède une forme unique et cette forme influe sur les performances du bateau.

On peut dire qu'il existe de grandes différences entre toutes les formes de coques et à puissance égale, tous les bateaux ne se valent pas.

Les deux principaux types de coques sont la coque à déplacement et la coque planante. D'autres types de coques allient des caractéristiques de ces deux types principaux pour former des coques à semi-déplacement ou des coques semi-planantes.

a) La coque à déplacement

Pour ce type de coque, lors d'une augmentation de vitesse, le bateau ne s'élève pas hors de l'eau, c'est-à-dire que les coques à déplacement n'offrent pas de portance hydrodynamique. La carène reste immergée quand le bateau est en mouvement. Leurs formes ne favorisent pas la vitesse même si la motorisation est importante. Toutefois, ils présentent des points positifs tels que de plus grands espaces intérieurs et un corps plus robuste.

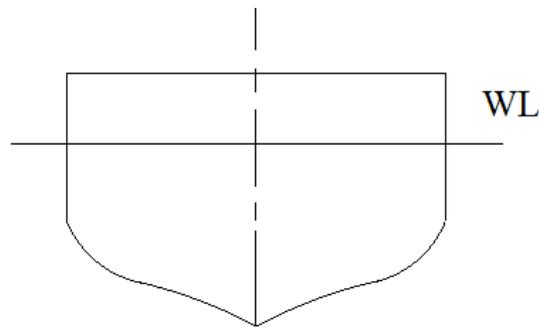


Figure 2: Coque à déplacement.

La coque planante

Les coques planantes sont conçues pour glisser au-dessus de l'eau lorsque la vitesse est élevée. Elles ont des formes en V évolutif, c'est-à-dire des formes plus évasées à l'arrière, ou en V constant, marquées par des redans et des virures. Ces derniers conditionnent leur comportement marin. Les bateaux dotés de ce type de coque sont rapides dans une mer agitée avec une motorisation raisonnable, certes, mais ils sont assez difficiles à stabiliser en eau plate.

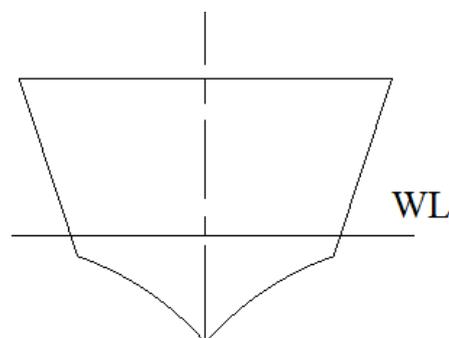


Figure 3: Coque planante.

La coque semi-planante

Appelées aussi coque à semi déplacement, elle associe les caractéristiques des deux types précédents en adoptant un V assez profond sur la partie avant qui s'adoucit progressivement vers l'arrière, et possède des bouchains vifs très prononcés. Sa vitesse est supérieure à celle de la coque à déplacement pour une puissance raisonnable. Ce type de coque allie vitesse et navigabilité, tout en offrant un grand espace intérieur.

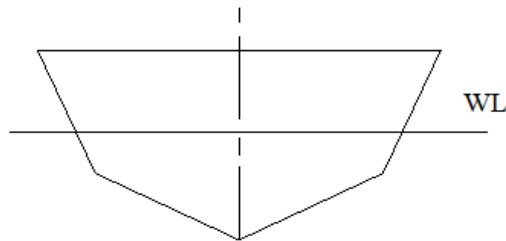


Figure 4 : Coque semi-planante.

I-3- Matériaux de construction navale

Dans la construction navale, tous les paramètres concernant un bateau sont interdépendants. Le matériau et la technologie utilisés pour la construction, la forme de la coque, ainsi que le domaine d'utilisation du bateau en question sont interdépendants. Le choix du matériau de construction ne doit donc pas être pris à la légère. Le présent chapitre sera alors dédié aux différents types de matériaux utilisés dans la construction navale.

II-3-1- Les matériaux utilisés en construction navale

Les matériaux utilisés dans la construction nautique peuvent varier d'un bateau et d'un constructeur à l'autre. Cela nous mène à dire qu'il existe un grand nombre de matériaux que l'on peut utiliser. On peut les classer dans les différentes catégories suivantes :

a) Les métaux

➤ L'acier

L'acier est un matériau de construction résistant et facile à travailler. Il ne brûle pas et dure longtemps si on le protège convenablement contre la rouille, surtout en climat tropical. On le trouve dans le marché sous forme de tôles ou en profilé.

Dans la construction navale, il est le matériau le plus utilisé. Cela est en relation avec ses propriétés mécaniques car il donne aux bateaux une structure plus solide face aux forces hydrodynamiques. De plus, il possède une résistance considérable face aux agressions

chimiques de la mer. Toutefois, son coût élevé est un paramètre à prendre en considération avant de prendre la décision de construire un bateau en acier.

➤ Les alliages

Les alliages d'aluminium sont les plus utilisés dans la construction navale. Ils ont des bonnes propriétés mécaniques et une résistance à la corrosion élevée. Ces matériaux contiennent en plus de l'aluminium, 3 à 4 % de magnésium et d'autres métaux en faible quantité. Leurs propriétés mécaniques peuvent être améliorées de façon substantielle par des traitements thermiques. Le poids spécifique et les propriétés mécaniques de l'aluminium permettent une fabrication et un formage relativement aisés avec un outillage assez simple. Cependant, ce matériau convient le mieux à une production à l'unité plutôt qu'à une production en série car sa manipulation requiert de grandes compétences en soudure.

b) Le bois

La construction en bois est parfois utilisée pour garder l'apparence classique d'un bateau. Le bois a la capacité d'absorber les vibrations, ce qui rend le voyage beaucoup plus agréable. En ce qui concerne les détails environnementaux, un bateau en bois est créé à partir d'une ressource renouvelable. Certains bateaux sont fabriqués avec un nouveau type de bois composite qui est plus léger, il est donc possible d'utiliser un moteur plus petit que ceux qui sont requis pour ce type de bateau.

c) Le ferrociment

Ce type de construction est à base de ciment hydraulique et d'une armature de couches continues de grillages d'acier, réparties dans toute la masse. Il se comporte comme le béton armé dans ses caractéristiques de résistance aux charges sauf que pour le ferrociment, le développement des fissures est retardé. Les principaux avantages du ferrociment sont son faible coût, le bas niveau de qualification de la main d'œuvre pour la construction de la coque et l'entretien réduit du fait d'une bonne résistance à la putréfaction et à la corrosion, si on le compare au bois et à l'acier.

d) Les matériaux composites

Un composite est, comme l'indique son nom, un matériau qui est fabriqué à partir de plusieurs composants. Il est formé par le renfort et la matrice. Des fois, les charges et les additifs s'ajoutent à ces deux principaux éléments. L'intérêt de ces mélanges est de produire des matériaux qui combinent des avantages que ni la matrice ni le renfort n'auraient eu par eux-mêmes. La nature composée du matériau permet d'optimiser ses paramètres techniques, esthétiques, pratiques et financiers.



Figure 5: Matériau composite.

➤ Le Renfort

C'est la phase discontinue du composite. Il est souvent filamentaire et possède de bonnes propriétés mécaniques (rigidité et résistance aux chocs élevées). On peut citer la fibre de verre, la fibre de carbone, la fibre naturelle, l'aramide, etc...

➤ La matrice

La matrice est la phase continue du composite. Son rôle est d'assurer la cohésion de l'ensemble. Elle transfère et répartit les charges et les contraintes appliquées sur le composite.

➤ Les charges et additifs

Ils peuvent être des pigments de coloration ou des agents anti-UV.

➤ Exemples :

Le tableau suivant montre les caractéristiques des fibres de renforcement et des résines les plus utilisés.

Caractéristiques	Fibres			Résines	
	Verre	Aramide	Carbone	Polyester	Epoxyde
Masse volumique [g/cm ³]	2,54	1,45	1,80	1,20	1,20
Module d'Young [MPa]	73 000	130 000	230 000	3 000	2 600
Coefficient de poisson	0,35	0,35	0,35	0,316	0,40

Tableau 1: Caractéristiques des fibres de renforcement et des résines

Les matériaux composites, l'acier, l'aluminium et le bois sont les quatre (4) principaux types de matériaux utilisés pour la construction navale.

La figure suivante illustre la répartition des divers matériaux utilisés pour la construction de bateaux de plaisance en 2009 :

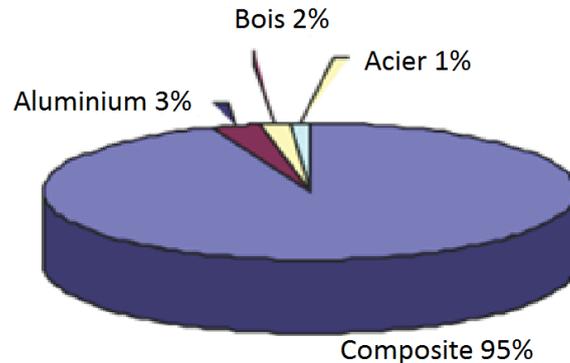


Figure 6 : Répartition des divers matériaux en construction navale pour les bateaux de plaisance.

II-3-2- Le PRVT

a) Définition

Le PRVT ou Polyester Renforcé de Verre Textile, encore appelé Polyester Renforcé de Fibre de Verre, est un matériau plastique : il est composé par l'utilisateur sur le milieu d'emploi.

C'est un matériau composite formé par des tissus de verre (obtenus par le tissage des fibres de verre), de la résine et quelques additifs.

b) Historique

Le PRVT en tant que matériau de construction navale a été utilisé pour la première fois en Amérique du Nord à la fin des années 1940, à des fins militaires. Les premières coques ont été faites en enveloppant un modèle de bois (moule mâle) dans le renfort qui était ensuite enduit de résine. A cette époque, on utilisait alors un fort ensoleillement pour que le mélange puisse durcir ou polymériser. On a développé par la suite les résines à polymérisation rapides et le moulage par contact avec des moules femelles pour assurer une production en série.

c) Les éléments constitutifs du PRVT

Comme nous venons de voir plus haut, le PRVT est un matériau composite. De ce fait, il possède :

- un renfort : les fibres de verre,
- une matrice : la résine,
- des additifs : les charges et pigment.

➤ Les fibres de verre

Les fibres de verre sont aussi connues comme étant des fibres de renforcement ou fibres textiles. Ces filaments de verre sont très longs et de ce fait, ils ont peu de chance d'être libérés par le produit.

Elles sont faites à partir de sable (silice), carbonate de calcium, silicate d'aluminium, oxyde de calcium, borate de calcium, fluorure de calcium, sulfate de calcium, carbonate de sodium et sulfate de sodium. Après fusion, le mélange est étiré et passe dans un manchon percé de trous de diamètre déterminé. A la sortie, des liants sont ajoutés tels que des régulateurs de pH (acide éthanoïque, acide chlorhydrique, sels d'ammonium) et des lubrifiants (huiles minérales ou des silicones). On obtient alors des fibres résistantes de 8 à 14 microns de diamètre.

Les fibres de verre sont classées en de nombreux types, selon leur composition, mais les fabricants proposent généralement les types A, E, et S dans la construction navale. Pour les régions tropicales, on utilise uniquement le type E. Le tissage de ces fibres ainsi obtenues donne naissance à des tissus sous forme de feuille appelés tissus de verre.

Il existe deux types de tissus couramment utilisés dans la construction des bateaux : le mat et le roving.

- Le mat

Le mat se compose de fibres de verre découpées en morceaux, d'une longueur d'environ 50mm. Sans autre traitement que la découpe, ces morceaux sont ensuite déposés par une machine sur un tapis transporteur et maintenus entre eux par un liant en poudre ou liquide. L'ensemble fibre-liant forme après un ruban continu de mat, de diverses épaisseurs. Les deux faces du mat ont des aspects différents car la partie qui était au contact du tapis lors de son usinage est plus lisse, l'autre partie étant plus rugueuse. Cette dernière devra être placée côté moule lors de la stratification. Le mat est utilisé comme tissu de contact, c'est-à-dire qu'après que l'on ait appliqué la première couche sur le moule femelle, on applique ensuite le mat. Ce matériau est caractérisé par sa masse surfacique. Voici quelques types de mat les plus utilisés:

Désignation	Masse surfacique
Mat 300	300 g par cm ²
Mat 450	450 g par cm ²
Mat 600	600 g par cm ²
Mat 900	900 g par cm ²

Tableau 2: Masse surfacique de Mat

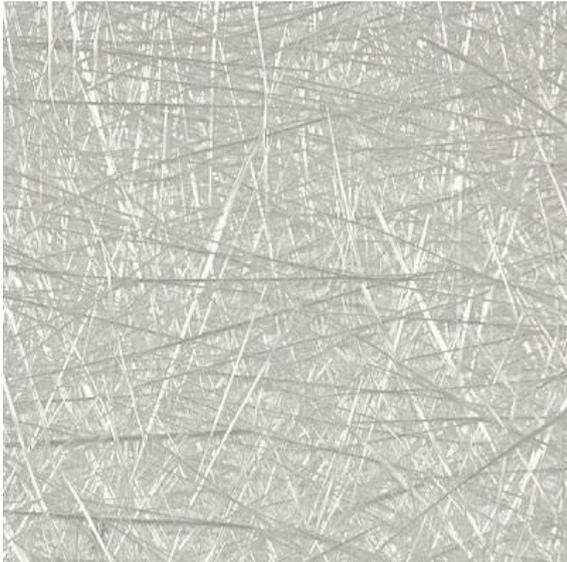


Figure 7 : Mat.

- Le Roving

Le Roving ou « stratifil » en appellation AFNOR (ou Association Française de Normalisation), est un autre type de tissu obtenu à partir des fibres de verre utilisées dans la construction des bateaux. En aspect, le Roving ressemble à un treillis de fibres blanches. Les fibres de verre sont tissées perpendiculairement. Les types de Roving couramment utilisés sont le « roving 300 » et le « roving 450 ». Il est caractérisé de la même façon que le mat. Voici les différents types de Roving :

- le Roving continu,
- le Roving tissé ou RT,
- le Roving unidirectionnel.

Il est à remarquer que dans le cas où le Roving contient de la fibre de carbone, qui, en plus du fait d'être très léger, est très résistant, l'on peut réduire le nombre de couches de Roving utilisées lors de la stratification.

Ces deux types de tissus sont alternés lors de la stratification. En effet, il faut éviter de faire une stratification successive de deux tissus de même type pour remédier au délaminage de la fibre de verre.



Figure 8: Roving.

➤ La résine

Les résines servant de liant ou de renforcement sont dites macros molécules synthétiques thermodurcissables. Ce sont des enchaînements de molécules élémentaires appelées monomères forment un réseau tridimensionnel rigide appelé polymère.

Il existe trois types de résine dont la résine polyester, les époxyes et les vinylesters.

La résine la plus utilisé dans la construction nautique est la résine polyester. Elle se présente sous forme de liquides visqueux et translucides, avec un retrait volumique après durcissement non négligeable, de l'ordre de 7 à 8 %. Combinées à des accélérateurs qui initient la réaction chimique, des catalyseurs permettent à la résine de passer de l'état liquide à l'état solide à la température ambiante : c'est le phénomène de réticulation ou polymérisation.

On distingue deux types de résines polyester

- les formules orthophtaliques : elles sont les moins couteuses, mais une fois immergées elles tendent à absorber de l'humidité et prédisposent le stratifié aux atteinte de l'osmose.
- Les formules isophtaliques : elles facilitent l'imprégnation des tissus et augmenta la résistance mécanique du stratifié, elles sont les plus chères.

Dans tous les cas, la montée en température ou exothermie qui accompagne la polymérisation doit être soigneusement contrôlée, en particulier dans les zones de fortes épaisseurs pour ne pas induire des déformations et des microfissures.

- La résine de stratification

C'est la résine qui se met entre les différentes couches de tissus pour les adhérer les unes aux autres lors de la stratification. Les propriétés des résines qui entrent en considération dans la construction navale sont :

- la résistance à l'absorption d'eau,
- la solidité,
- la qualité adhésive,
- la résistance aux rayons ultraviolets et aux intempéries,
- la réaction aux autres substances (eau potable, carburant).

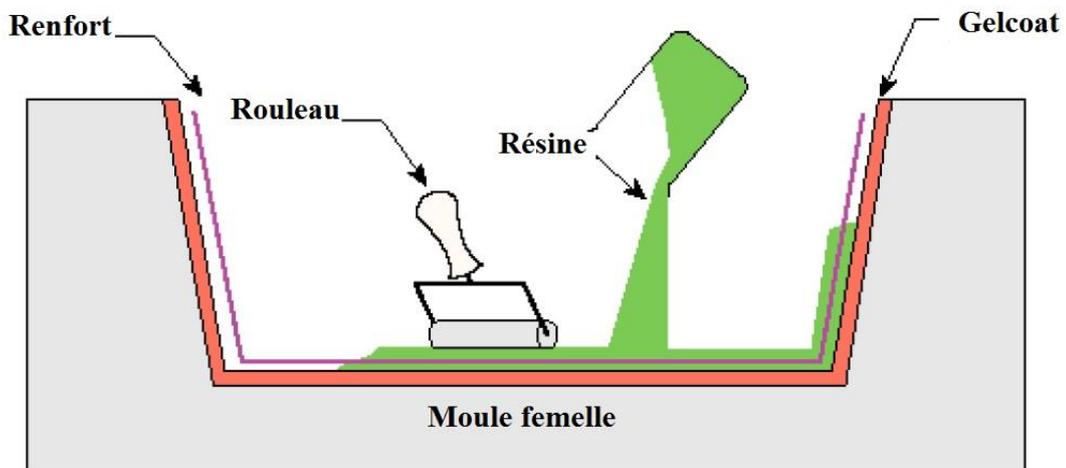


Figure 9: Application de la résine de stratification et du gelcoat sur une moule.

- Le gelcoat

Le gelcoat est une résine qui constitue la surface extérieure lisse et brillante de la coque d'un bateau. De ce fait, on mélange au préalable avec le gelcoat la couleur que l'on veut obtenir. Elle constitue donc la première couche à être appliquée sur le moule femelle au cours du processus pour obtenir la forme extérieure du bateau. Il peut être appliqué à l'aide d'un pinceau, d'un rouleau ou au pistolet à gravité.

L'utilisation du gelcoat pour la couche extérieure est due au fait qu'il possède une meilleure résistance aux intempéries et aux agents chimiques. Il est aussi plus dur que les résines de stratification et forme une barrière entre l'environnement extérieur et les stratifiés.



Figure 10: Gelcoat mélangé à une couleur.

➤ Les catalyseurs et accélérateurs

Le catalyseur et l'accélérateur sont deux produits que l'on ajoute à la résine pour permettre la polymérisation de cette dernière. Le catalyseur change la résine polyester monomère insaturée en une résine polymère saturée à l'état solide par la production d'une réaction exothermique (dégagement de chaleur). L'accélérateur, quant à lui, commande la vitesse de la réaction mais, sans le catalyseur, l'accélérateur n'a aucun effet sur la résine. De ce fait, il peut être mélangé à la résine des mois à l'avance : dans ce cas on parle de résine préaccélérée. Par contre, on ne peut pas mélanger le catalyseur à l'avance car même sans la présence d'accélérateur, la résine avec le catalyseur polymérisera en quelques heures sous un climat chaud. Donc l'addition du catalyseur à la résine doit être la dernière opération avant l'application sur le moule.

L'accélérateur utilisé est le naphthalène de cobalt et le catalyseur le peroxyde d'acétone éthyle méthyle (PAEM).

Il est à remarquer qu'on ne doit jamais mélanger directement accélérateur et catalyseur entre eux car cela entraînera une explosion.



Figure 11: Accélérateur et catalyseur.

➤ Les avantages et inconvénients de la construction en PRVT :

Le PRVT présente de nombreux avantages qui contrebalancent largement ces inconvénients.

Voici quelques-uns des principaux avantages de ce type de matériau :

- le stratifié verre-polyester est très résistant aux agressions du milieu marin tel que la corrosion.
- Le PRVT est inorganique, ce qui fait qu'il est imputrescible et inattaquable par les tarets.
- Il résiste bien à la fatigue générée par les chocs répétés des vagues.
- Ce matériau permet toutes les formes de coque que l'on veut obtenir : il est très malléable.
- Le PRVT est particulièrement léger par rapport aux autres matériaux tels que l'acier ou le béton armé.

Par contre, il présente quelques inconvénients :

- sa construction dépend des devises extérieures car ces matériaux sont totalement importés.
- Il est impossible de changer la forme du bateau une fois la stratification terminée.
- Il présente un danger d'incendie et de santé à cause des produits chimiques.

I-3-3- Technologie de mise en œuvre du PRVT au sein de Polyma

a) L'usine POLYMA :

Depuis près de 20 ans, l'usine POLYMA, située à Anosizato – Antananarivo, construit de petites et moyennes embarcations de tout genre. A part la construction de bateaux, l'usine fait aussi une remise en conformité ou encore une remotorisation des bateaux, selon la demande des clients. Les bateaux sortant de l'usine sont généralement en PRVT ou Polyester Renforcé de Verre Textile.

b) Outillages et équipements:

Les outils suivants sont habituellement utilisés dans le travail du PRVT :

- Equipements de levage et de manutention
- Perceuse électrique professionnelle, capacité 13 mm
- Scies cloche 25–100 mm
- Forêts en acier rapide 3–18 mm
- Scie sauteuse professionnelle avec lames à métaux.
- Meuleuse à main avec disque 100 mm
- Disques à tronçonner au carborundum.

- Disques à meuler au carborundum.
- Disques corindon jetables grain 40.
- Monture de scie à main et lames de 18–24 dents.
- Râpe demi ronde 250 mm
- Limes plates, demi-rondes et rondes 250 mm
- Cutter avec lames standard.
- Scie à bois pour couper la mousse.
- Ciseaux de tailleur pour couper les renforts.
- Papier émeri à sec et à l'égrain 100–1000.
- Compresseur d'air
- Ventilateur et extracteur de poussière
- Cales de ponçage.
- Mètres ruban 3m et 5m.
- Maillets en caoutchouc 1–2 kg pour le démoulage.
- Pinceaux 25–100 mm à manches de bois nus (non peints).
- Raclettes en métal, caoutchouc et plastique pour étendre la résine et l'enduit.
- Cache en ruban largeur 12–50 mm
- Rouleaux en peau de mouton de différentes tailles pour appliquer la résine.
- Rouleaux débulleurs de type cannelé ou à molettes pour compacter le stratifié.
- Des raclettes faites avec des plaques planes de caoutchouc rigide de 150 mm × 75 mm avec un bord effilé remplaçant les rouleaux ci-dessus.
- Flacons distributeurs gradués pour catalyseur et accélérateur.
- Pinceau
- Fil à plomb
- Niveau à bulle 250 et 750 mm
- Mètre ruban



Figure 12: Quelques outils utilisés.

c) Les étapes de la construction :

La construction en PRVT comprend plusieurs étapes qui sont :

- La construction et la préparation du moule

Cette tâche est la plus délicate dans tout le mode opératoire car la forme du moule déterminera la forme du bateau que l'on va construire avec. Il nous faut alors construire un moule exempt de défauts. En général, le moule est construit en bois, mais on peut également utiliser d'autres matériaux.

Pour commencer, on dresse la charpente du moule de haut en bas sur une fondation solide. Il s'agit souvent d'un châssis lourd en bois posé sur un sol en béton de niveau. Quand toute la charpente est dressée, on peut recouvrir le squelette de lattes de bois ou terminer par tout matériau jugé convenable pour réaliser la forme du bateau. A l'extrémité de la coque - côté pont - on fixe une bordure en contreplaqué de sorte que plus tard, au cours de l'opération de moulage, le PRVT à l'état de gel puisse être repris et forme ainsi un bord de stratifié solide avec un rebord net. On peut couvrir la mère d'une couche de PRVT aussitôt la forme brute du bateau achevée pour réduire les déformations dues au retrait du bois. Cette couche peut être ensuite corrigée par un mastic résine remplissant les creux qui apparaissent une fois la couche de PRVT solidifiée. Toute inégalité qui altère l'aspect du moule peut être supprimée par meulage ou ponçage à la main.



Figure 13: le moule.

Dans notre cas, on utilise la solution du moule scindé car le moule présente des angles de dépouilles aigus due à la forme de la coque. Il est à remarquer qu'un moule scindé est un moule en deux ou plusieurs parties permettant un meilleur accès aux endroits prévus comme difficiles à mouler et à démouler et dont le profil rendrait impossible le démoulage d'un moule d'une seule pièce.

➤ L'application du gelcoat

Une fois que la surface du moule est cirée, c'est-à-dire qu'on a appliqué de la cire sur la surface du moule pour éliminer les micropores et faciliter le démoulage, on procède à l'application du gelcoat. Comme on l'a spécifié précédemment, la couleur du bateau que l'on veut obtenir est préalablement mélanger au gelcoat : cette couche formera la partie externe lisse du bateau.

D'abord, il faut mesurer la quantité nécessaire de gelcoat puis le mélanger avec du catalyseur. Ce dernier doit être utilisé à 2%. Il est nécessaire de bien mélanger le catalyseur et le gelcoat pour éviter le durcissement irrégulier pouvant nuire aux caractéristiques physiques de la couche. Ensuite, nous procédons à l'application du mélange gelcoat-catalyseur sur le moule, tout en s'assurant de bien lisser la surface pour obtenir une épaisseur uniforme. Il est à remarquer que l'épaisseur optimale est de 0,5 mm, toutefois, les limites acceptables se trouvent entre 0,4 mm et 0,6 mm.

La température de l'atelier et des matières doit être respectée à un minimum de 18°C et le temps d'application, après l'ajout du catalyseur, doit être compris entre 12 minutes et 18 minutes.



Figure 14: Mélange du catalyseur et du gelcoat et application sur le moule.

➤ La stratification ou moulage

Cette étape consiste à poser les couches successives de tissus de verre une fois que le gelcoat s'est polymérisé, autrement dit lorsque le gelcoat a durci. Avant de commencer la stratification, on mélange la résine avec le catalyseur. La quantité de ce dernier est aux environs de 2%. Ceci dépend des conditions dans lesquelles s'effectue le mélange. On applique alors une couche de résine à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau directement sur le gelcoat.

Ensuite, on met le mat le plus fin (un voile de surface est recommandé lorsque l'on recherche à faire une pièce belle d'aspect, sans marquage de fibre). Le mat sera imprégné de résine puis il sera débullé. Le débullage consiste à chasser l'air du stratifié à l'aide d'un rouleau débulleur. Le débullage permet également de consolider les couches entre elles. Un bon débullage permet de dissoudre le liant et de rendre translucide la couche de mat. On peut ainsi vérifier en croisant les passages du rouleau débulleur qu'il ne reste pas d'air dans le stratifié.

Ensuite, on opère de la même manière pour l'application du roving. Les couches de résine, de mat et de roving sont alternés jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue. Il est à souligner que chaque couche doit être imprégnée de résine puis débullée. Cette méthode s'appelle « méthode œuvré au contact ». La durée de durcissement du stratifié est de 30 minutes.

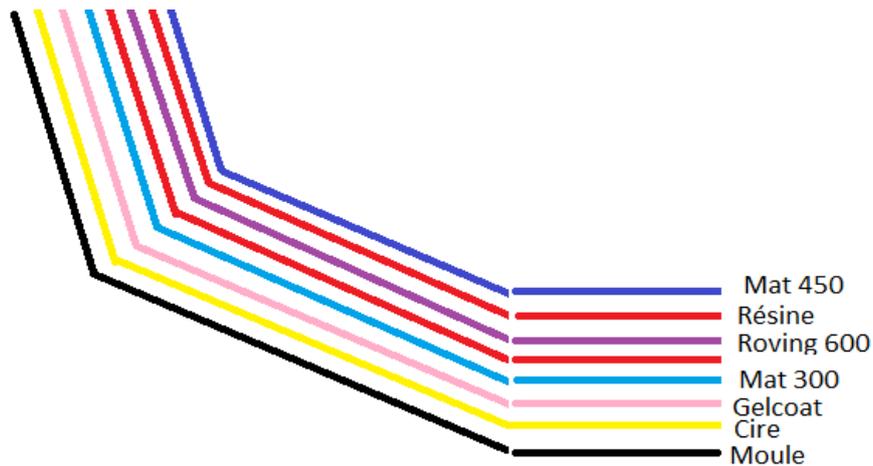


Figure 15: Exemple de stratification.

➤ Le démoulage et la finition

L'opération de démoulage de la pièce ne peut s'effectuer qu'après durcissement du matériau, c'est à dire lorsque l'on a une polymérisation avancée de la résine après une journée de la stratification. Pour l'opération de démoulage, on enfonce des coins en bois ou en plastique sur le bord de l'ensemble stratifié-moule. Après on utilise de l'air comprimé passé à travers un trou de démoulage pour les séparer définitivement. Puis on retire la pièce à l'aide de l'équipement de levage.

Une fois le démoulage terminé, on peut passer à la finition. Voici quelques opérations effectuées lors de la finition :

- Le sciage : on utilise une scie sauteuse ou une scie à main pour effectuer l'ébarbage.
- Le limage : le PRVT se lime comme l'aluminium une fois durci. Pour éviter d'écailler la surface, des coups de lime doivent être donnés à partir de la surface du gelcoat et non l'inverse.
- Le ponçage : on utilisera une meule à gros grains car cette dernière s'encrassera moins facilement.

I-4- Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les différents types de bateau, les divers matériaux existant en construction navale ainsi que le mode opératoire concernant la construction en PRVT. Cela va nous servir de bonne base pour entamer des études plus approfondies sur la conception de ce projet.

PARTIE II : CAHIER DES CHARGES

II-1- Introduction

Comme tout projet, il est nécessaire d'établir un cahier des charges bien défini avant de commencer pour mieux cerner le projet en question. Ce chapitre explique avant toute étape de conception, le contexte de notre domaine d'étude ainsi que les conditions dans lesquelles le navire doit naviguer.

II-2- Les forces appliquées à un navire et les types de propulsion

II-2-1- Les forces appliquées à un navire

Il est très important de connaître les forces extérieures qui agissent sur un bateau pour déterminer les caractéristiques mécaniques qu'un bateau devra avoir. Quand on parle de forces extérieures, on doit tenir compte de l'équilibre au repos du navire et de l'équilibre de ce dernier quand il est en mouvement sur l'eau.

a) Forces appliquées à un navire au repos :

Un navire, au repos, est soumis à deux (02) forces qui sont :

- le poids du navire : \vec{P}
- la poussée d'Archimède : \vec{D}

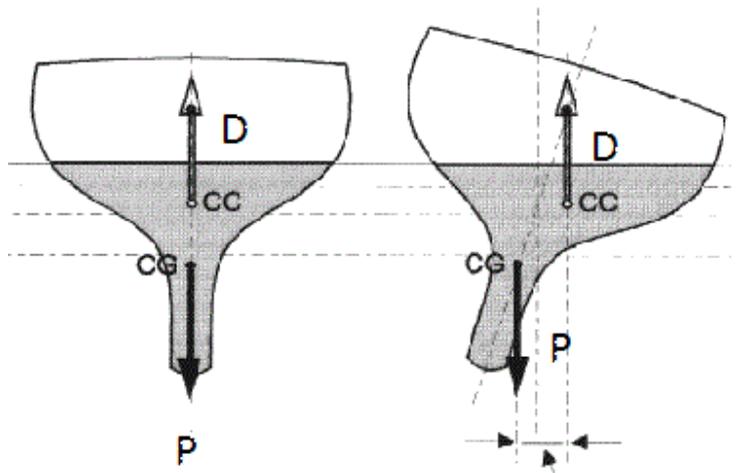


Figure 16: Forces appliquées à un bateau en équilibre.

b) Forces appliquées à un navire en mouvement :

Plusieurs forces extérieures agissent sur un navire en mouvement. Dans notre cas, les forces agissant sur le navire sont :

- le poids du navire : \vec{P}
- la poussée d'Archimède : \vec{D}
- la poussée : \vec{F}

- la résistance de l'air : \overline{Ra}
- la résistance aux appendices : \overline{Rp}
- la force hydrodynamique : \vec{Q} Elle peut se décomposer de deux façons :
 - suivant la ligne de flottaison $\begin{cases} \overline{Qf} \\ \overline{Qn} \end{cases}$
 - Avec :
 - ❖ \overline{Qf} : Composante de frottement
 - ❖ \overline{Qn} : Composante normale
 - suivant la surface stable de l'eau $\begin{cases} \overline{R} \\ \overline{Rz} \end{cases}$
 - Avec :
 - ❖ \overline{R} : Trainée
 - ❖ \overline{Rz} : Portance

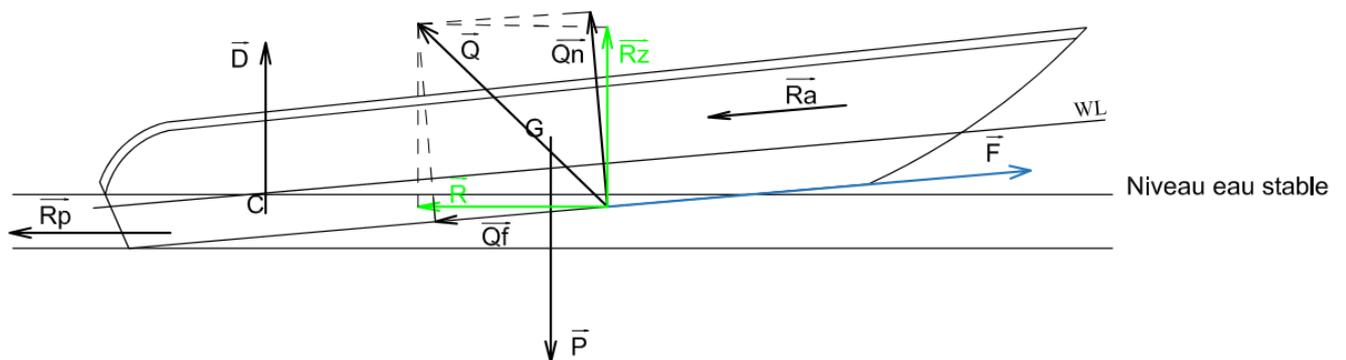


Figure 17: Forces appliquées à un bateau en mouvement rapide.

II-2-2- Les types de propulsion

Un navire, comme nous l'avons vu précédemment, est soumis à une force qui s'oppose à son mouvement. Pour vaincre cette « résistance à l'avancement », il faut donc lui fournir une certaine énergie, d'où l'utilisation d'un moyen de propulsion. La propulsion désigne l'ensemble des systèmes qui permettent aux navires de se déplacer. Elle est effectuée par un propulseur entraîné par un moteur.

a) Le moteur

En général, il existe deux types de moteurs : les moteurs hors-bords et les moteurs en fixe ou in bord.

- Le moteur hors-bord

Un moteur hors-bord est monté sur la traverse du bateau, à l'extérieur de la coque à la poupe (l'arrière) du bateau. Le carter d'engrenages d'un moteur hors-bord et son hélice sont immergés pendant le fonctionnement, mais peuvent être levés hors de l'eau lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ceci prévient une corrosion ou des salissures marines évitables, et les rend idéaux pour l'usage en eau salée ou en eau douce.

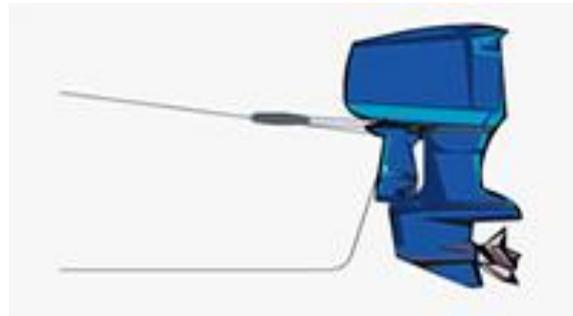


Figure 18: Un moteur hors-bord.

- Moteur en bord ou in-bord

Pour les moteurs in-bord, le moteur et la transmission sont montés dans la coque du bateau, sous le pont. Un arbre de transmission traverse la coque, et une hélice y est fixée pour la propulsion. La conduite se fait à l'aide d'un gouvernail.

Transférant la puissance du moteur jusqu'à l'hélice, les transmissions équipant les in-bord existent dans de multiples configurations. Une diversité permettant ainsi de choisir le meilleur système en fonction de la coque et du programme de navigation. Voici quelques exemples de configurations de transmission:

- ❖ V-drive

Cette configuration présente un arbre de transmission partant vers l'avant, puis renvoyé vers l'arrière par l'intermédiaire d'un renvoi d'angle. Permettant de reculer le moteur au maximum, ce type de d'installation moins fréquent aujourd'hui trouve encore sa place sur les bateaux de ski nautique.

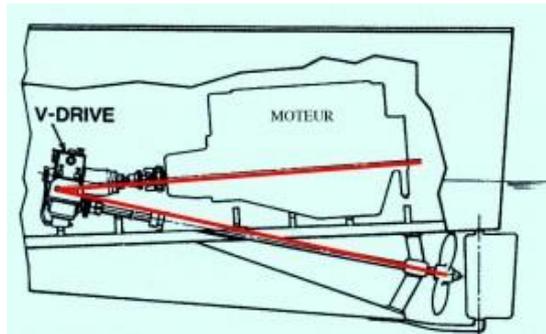


Figure 19: Transmission V-drive.

❖ Z-drive

Cette transmission traversant le tableau arrière se fait par l'intermédiaire de deux renvois d'angles intégrés dans une embase servant aussi de gouvernail.



Figure 20: Transmission en Z-drive.

❖ Pod-drive

Provenant des gros navires de commerce, ce système désormais adapté aux unités de plaisance se compose au minimum de deux embases traversant verticalement le fond de la coque. Dotées d'un grand angle de giration et contrôlées par joystick, ces embases amènent les manœuvres à portées de tous.



Figure 21: Transmission en pod-drive.

b) Le propulseur

Le propulseur peut se présenter sous de multiples formes. Il peut être :

- une force naturelle (courant d'un fleuve entraîné par la gravité),
- une force extérieure animale (halage) ou mécanique (remorqueur ou pousseur) ;
- un système mécanique embarqué transformant une énergie extérieure : une voile utilisant la force du vent,
- un système mécanique embarqué transformant une énergie embarquée : un aviron utilisant la force musculaire,
- une hélice ou un autre système (roue à aubes, treuil) entraîné par un moteur.

Mais l'hélice est le propulseur qui équipe la quasi-totalité des navires. Elle mérite alors qu'on lui accorde une attention particulière.

- Définition

Une hélice est, par définition, un appareil de propulsion, de traction ou de sustentation, constitué par des pales dont les surfaces sont disposées régulièrement autour d'un moyeu actionné par un moteur et appliqué aux navires, aux torpilles, aux aéronefs.

- Les caractéristiques d'une hélice
 - ❖ Les dimensions

Les dimensions à retenir quand on parle d'hélice sont le diamètre, le pas de construction, le nombre de pales et le nombre de tours qu'elle effectue par minute. En effet, ces derniers permettent de déterminer la poussée de l'hélice ainsi que l'usage pour lequel elles sont destinées.

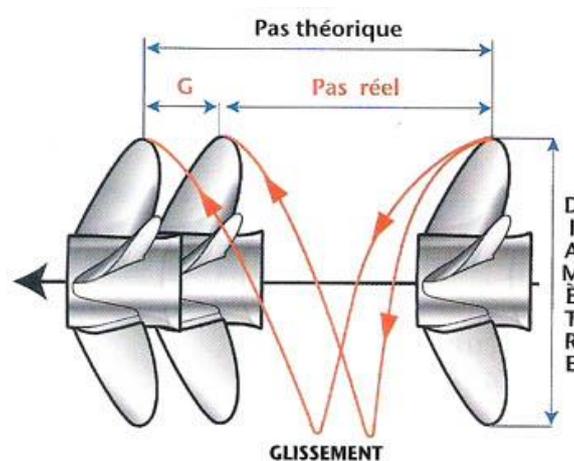


Figure 22: Les caractéristiques d'une hélice.

❖ La poussée d'une hélice

La poussée se détermine par la formule suivante :

$$P = 28,35 * d^3 * n^2 * 10^{-10}$$

Avec P : Poussée,

p : pas de l'hélice,

d : diamètre [m],

n : nombre de tour par minute [tr /mn],

- Phénomène liés au rendement de l'hélice :

❖ La cavitation

La cavitation est un phénomène contrariant la poussée de l'hélice. Il y a cavitation dans le cas où les pales de l'hélice aspirent de l'air par effet vortex ou ventilation (notamment lorsque le régime moteur est trop haut sur le tableau arrière pour un moteur hors-bord), ou si la distance entre la surface de l'eau et l'extrémité haute des pales est trop faible (pour une ligne d'arbre). Les pales se retrouvent soumises à une pression trop importante par rapport à leur surface, ce qui crée une dépression d'où il y a un phénomène de cavitation.

❖ Les diverses formes

Selon leur usage, le nombre de pales et les formes seront différentes :

Nombre de pales	Utilisations	Avantages d'utilisation
2	sur des petits voiliers	Limite la traînée lorsque le moteur est à l'arrêt
3	Sur les unités moyennes	Possède un bon rendement en statique (force) et en dynamique (puissance)
4	sur les voiliers et les bateaux à moteur	Possède les mêmes caractéristiques que les hélices à trois pales mais elle est plus silencieux
5	gros navires et sous-marins	Possède un coefficient de remplissage élevé et est plus équilibrée.

Tableau 3: Nombre de pales des hélices et utilisations

II-3- Cahier des charges

II-3-1- Zone d'exploitation

a) Localisation

La vedette rapide sera utilisée entre la ville de Morondava (latitude : 20°17'19" Sud, longitude : 44°19'04" Est) dans la région Menabe dans la partie Ouest de Madagascar, et la ville d'Antsiranana (latitude 12° 16' 00" Sud, longitude en degrés 49° 17' 00" Est) dans la région Diana, dans la partie Nord de l'Ile, à des fins caritatives. Elle naviguera dans le Canal de Mozambique. Cette embarcation aura pour mission de transporter les autorités dans le but d'apporter leurs aides et soutiens aux habitants de cet axe après passage des cataclysmes naturels tels que les cyclones.

En effet, chaque année, notre île connaît une période cyclonique entre le mois de Janvier et le mois d'Avril et en moyenne, elle est traversée par environ 8 à 10 cyclones qui laissent parfois de nombreux dégâts derrière eux. C'est pour cette raison que les autorités locales ont pris la résolution de construire une flotte pour pouvoir aller évaluer sur place les dégâts et les besoins des populations sinistrés.



Figure 23: Zone d'exploitation.

b) Situation géographique :

Cette zone d'exploitation est composée par :

➤ Le relief terrestre

- le bassin du Nord dominé par des massifs volcaniques et calcaires karstifiés (qui est un processus de formation d'un karst, relief calcaire au sol très perméable, avec circulation souterraine des eaux) de faible étendue, avec une petite plaine argileuse côtière,

- le grand bassin de l'Ouest descendant en pente douce vers l'Ouest avec des paysages de cuesta, qui est une forme de relief dissymétrique, dans les massifs gréseux (roche détritique, issue de l'agrégation et la cimentation de grains de sable) et volcaniques du crétacé, les plateaux calcaires du jurassique et de l'Ouest, et des plaines argileuses et sableuses,
- le bassin du sud, pénéplaine continentale descendant en pente douce vers le sud, dominée par des dunes anciennes et récentes le long de la côte.

Il se trouve que le transport maritime soit plus avantageux que le transport terrestre dans cette zone vu que la voie principale qui relie les deux villes extrêmes de la zone d'exploitation passe par la capitale, ce qui en fait un assez long détour, d'une distance d'environ 1750 km, d'où l'importance de l'exploitation de la voie maritime.

➤ Le relief marin

La zone d'exploitation se trouve au bord du Canal de Mozambique. Le Canal de Mozambique, d'une surface voisine de 1 500 000 kilomètres carrés, s'étend sur près de 1 600 kilomètres entre 12° S et 26° S. Son relief marin est caractérisé par :

- des grands fonds, dont la profondeur peut atteindre 4000 mètres
- les hauts fonds traversiers
- un bassin d'une profondeur de 3600 mètres
- un seuil dans sa partie centrale d'une profondeur maximale de 2800 mètres.

Il est à remarquer que la température marine du Canal de Mozambique est aux environs de 22° à 28° C.

La carte suivante montre les détails du relief marin de cette zone.

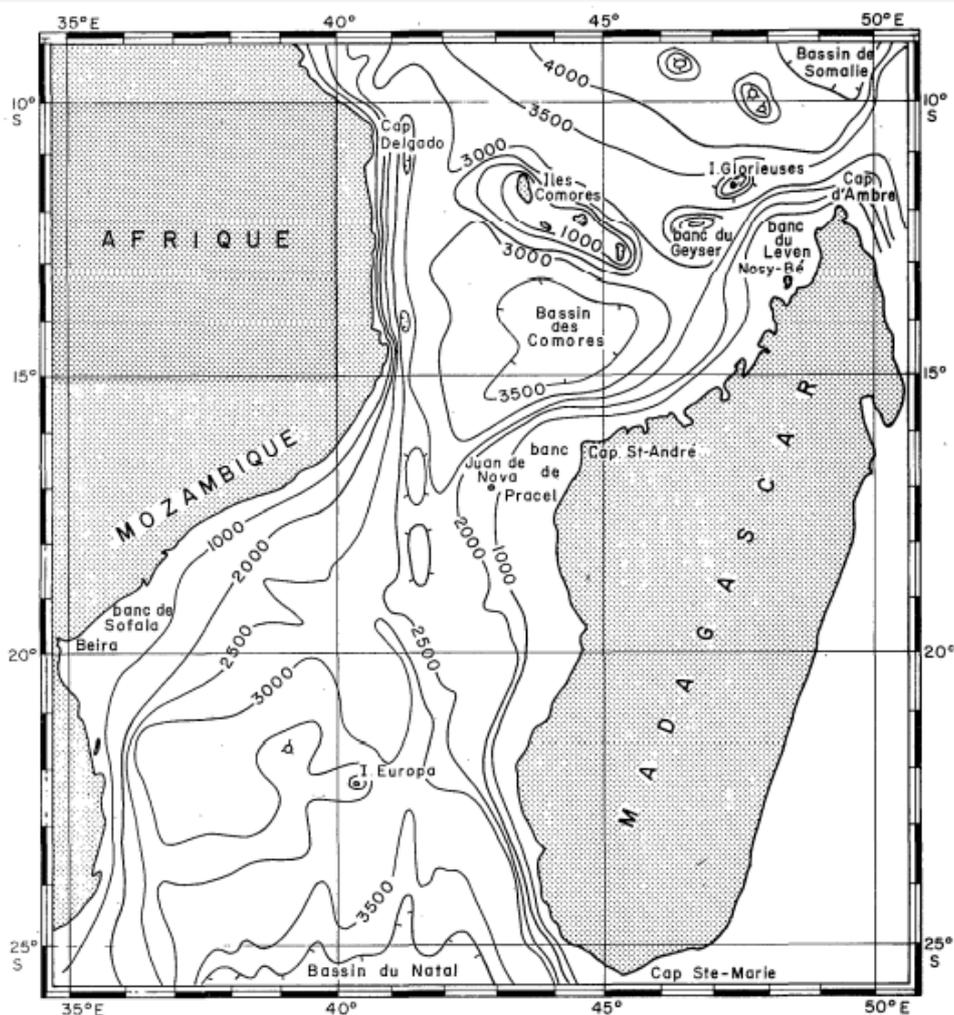


Figure 24: Relief marin du Canal de Mozambique.

c) Conditions climatiques :

Le climat de cette région est caractérisé par un été chaud et sec. La pluviométrie annuelle normale diminue du Nord au Sud en passant de 1,50m à 0,40m. Le maximum de précipitations s'observe en Janvier. La saison sèche est particulièrement bien marquée et s'étend de Mai à Octobre. La température moyenne annuelle varie entre 24°C et 27°C. Le maximum absolu a été observé à Maevatanana (40°C).

➤ Morondava :

Les données suivantes montrent les statistiques basées sur les données météo obtenues à partir des observations réelles de la station météo à Morondava entre Aout 2005 et Janvier 2016, tous les jours de 7h à 19h. Elles donnent les détails sur la direction du vent, la vitesse moyenne du vent et la température moyenne de l'air.

Mois de l'année	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Direction du vent	↘	↙	↖	↖	↗	↗	↖	↖	↖	↗	↗	↖	↖
Probabilité du vent >= 4 Beaufort (%)	53	36	16	27	19	26	52	42	52	56	66	39	40
Vitesse du vent moyenne (kts)	12	10	8	9	8	9	12	13	12	12	13	11	10
Temp. de l'air moyenne (°C)	28	28	31	29	27	28	26	26	27	27	29	30	28

Figure 25 : Données statistiques de vent de Morondava.

La vitesse moyenne annuelle du vent en nœuds, noté kts, dans la région de Morondava est de 10 kts (knots ou nœuds). Sa vitesse minimum tout au long de l'année est de 8 kts, en mois de Mars et de Mai, tandis que la vitesse maximum du vent est de 13 kts en mois d'Août et Novembre.

La température moyenne annuelle de l'aire est de 28 °C. Elle est maximum en Mars, elle atteint les 31°, alors qu'elle est minimum en mois de Juillet-Août avec une valeur de 26°C.

Le graphe suivant donne la direction des vents.

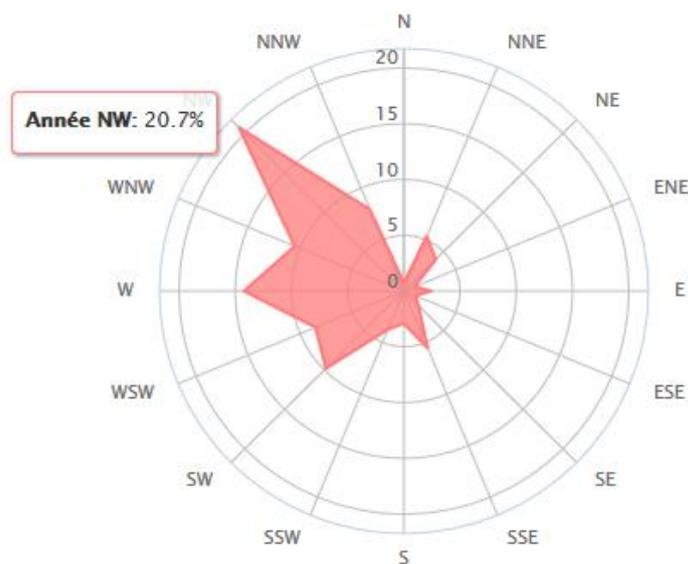


Figure 26: Distribution de la direction du vent en %.

➤ Antsiranana

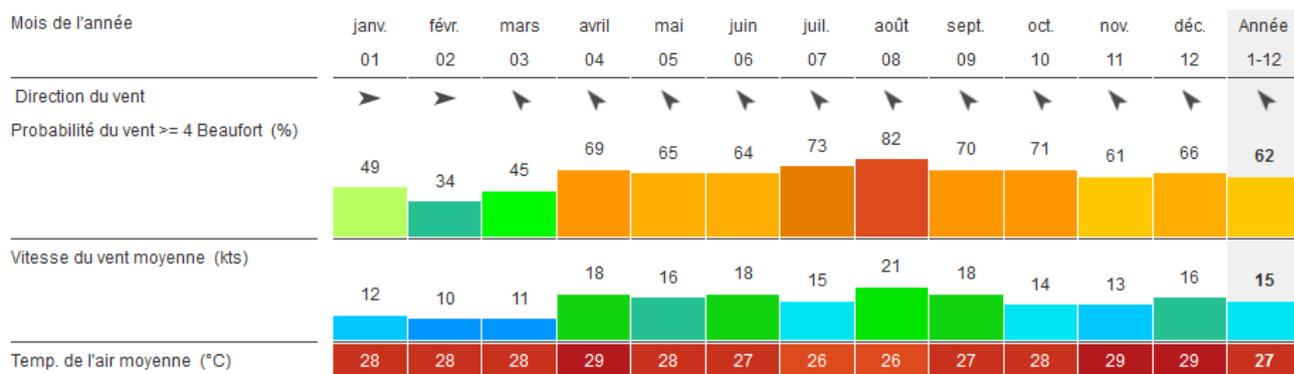


Figure 27: Données statistiques de vent d'Antsiranana.

La vitesse moyenne annuelle du vent est de 15 kts. Elle varie entre 10 kts, en Février, à 21 kts en Août.

La température moyenne annuelle de l'air est de 27° C. Elle possède une valeur maximale de 29° C contre 26°C en Juillet-Août.

Le graphe suivant donne la direction des vents.

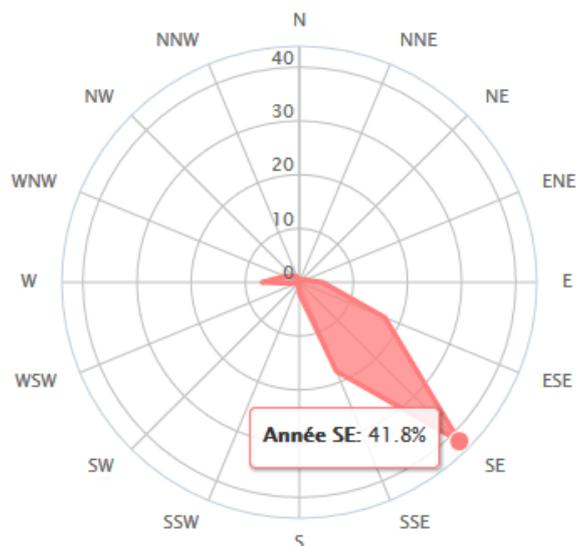


Figure 28 : Distribution de la direction du vent en %.

d) Situation démographique et économique :

Comme la zone d'exploitation s'étend sur tout le littoral Ouest de Madagascar, nous allons considérer ses deux extrémités.

➤ Situation démographique :

- Morondava

Morondava s'étend sur environ 46 000 km². Cette ville couvre environ 9 000 km² et comprend 120 000 personnes. La densité de population est faible, quelques habitants au km² seulement.

- Antsiranana

Antsiranana possède une superficie de 43 406 km². Elle a une population de 1 465 606 habitants. La densité de la population est au environ de 34 habitants/km².

➤ Situation économique :

- Morondava :

Du point de vue économique, la pêche est l'activité principale de la région de Morondava, en particulier les crustacés. Morondava est aussi un chantier naval avec atelier mécanique. Aux alentours de la ville, le riz, le maïs, le manioc et le coton et la canne à sucre sont cultivés, et on procède à l'élevage des zébus.

Un gisement pétrolier a été localisé dans la région et se prolonge jusqu'à Bemolanga et Tsimiroro, mais après des recherches infructueuses par diverses sociétés pour en démontrer la rentabilité, les activités d'exploitation pétrolière ont été abandonnées.

- Antsiranana :

La province de Diego ou Faritany d'Antsiranana, est souvent présentée comme étant la province la plus « riche » de Madagascar. Cette appréciation est due à l'originalité de ses deux régions économiques

- ❖ à l'est, la région SAVA (Sambava, Antalaha, Vohémar, Andapa) où l'on trouve : du riz dans la cuvette d'Andapa, du bois sur cette zone bien exposée aux pluies venant de l'Océan Indien, de la vanille à Antalaha, une cocoteraie parmi les plus importantes du monde (cocoteraie SOAVOANIO à SAMBAVA) qui se diversifie dans les produits biologiques, de l'élevage de zébus bien structuré à Vohémar.
- ❖ à l'Ouest, la région DIANA (Diego Suarez, Nosy Be, Ambanja et Ambilobe) où s'observent une grande variété d'activités: construction et réparation navale (SECREN) et conserverie de thon (PFOI) à Diego, importante production de sel de mer à, deux

sucreries, des cultures d'exportation (café, cacao, poivre vert et noir, anacarde, ...), des huiles essentielles, des saphirs et de l'or, un secteur touristique en plein essor.

II-3-2- Caractéristiques et descriptifs de la vedette rapide

a) Matériaux de construction : PRVT (Coque, pont et cabine)

Comme nous l'avons précisé dans les précédents chapitres, le PRVT marque la construction nautique moderne par ses particularités qui sont la légèreté et la rigidité. De plus, ce matériau s'acquiert à un prix abordable par rapport aux autres matériaux composites. A cela s'ajoute le fait que la réalisation du bateau sera assurée par la société POLYMA, qui se spécialise dans le domaine de la construction navale en PRVT. De ce fait, la vedette sera construite en PRVT.

b) Carène : Carène en V, semi planante.

La forme de la coque d'un navire, qu'elle soit une coque à déplacement, une coque semi-planante ou planante, ne se choisit pas au hasard. En effet, le choix de la forme de la coque dépend d'un nombre appelé coefficient de Froude Fr un architecte anglais.

Par définition :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g^3 \sqrt{v}}}$$

Tel que :

V : Vitesse du bateau [m/s],

v : Volume de carène immergé dans l'eau [m³],

g : Accélération de la pesanteur,

Chaque valeur du Nombre de Froude correspond à un caractère de navire bien précis :

Valeur de Fr_v	Régime de vitesse du navire
$Fr_v < 1,34$	Lent
$1,34 \leq Fr_v \leq 3$	Intermédiaire
$Fr_v > 3$	Rapide

Tableau 4: Nombre de Froude et caractère du navire

c) Les dimensions de bases :

Longueur hors tout : $L_{ht} = 13 \text{ m}$

Longueur à la flottaison : $L_{WL} = 11,50 \text{ m}$

Maître bau (largeur) : $B = 3,60 \text{ m}$

Tirant d'eau : $T = 0,50 \text{ m à } 0,75 \text{ m}$

La figure suivante nous montre les dimensions de base de la vedette à construire.

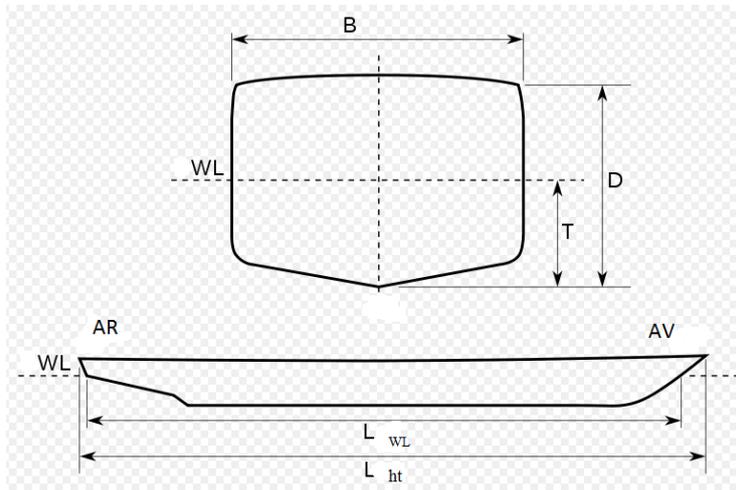


Figure 29: Dimensions d'un navire.

d) Charge :

• Définitions :

- Le déplacement en lège est le poids réel d'un navire une fois terminé et prêt pour le service, mais vide, c'est-à-dire sans consommables (eau, carburant, etc...).
- Le port en lourd est la masse totale de fret en tonnes que le navire peut transporter à son tirant d'eau maximum admissible (y compris le carburant, l'eau douce, les provisions, l'équipage, etc...).

• Données :

- Déplacement en lège, hors motorisation 5 à 6 tonnes
- Charges utiles : 4 à 6 tonnes

e) Insubmersibilité :

Par définition, le mot insubmersibilité signifie « qui ne peut pas couler ». C'est à dire que le bateau avec l'équipage réglementaire ne coulent pas en cas d'accidents entraînant la fissure de la coque.

L'insubmersibilité d'un bateau s'obtient par différents procédés de fabrication tels que :

- des caissons étanches,

- le cloisonnement de la coque,
- des volumes de matière plastique expansée ou polystyrène,
- des réserves de flottabilité...

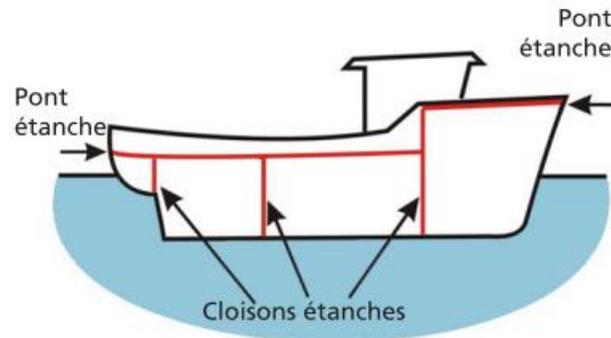


Figure 30: Cloisons d'étanchéité.

Dans notre cas, des cloisons d'abordages placés à l'avant et à l'arrière du bateau assurent l'insubmersibilité. A cela s'ajoute les matières plastiques et les polystyrènes contenus dans les renforts.

f) Structure :

➤ Varangages :

Cette opération consiste en la pose des varangues. Une varangue est une des pièces de charpente d'un bateau, servant, dans les fonds, de liaison transversale entre la quille et les membrures.

➤ Longrinages :

Le longrinage a pour but l'utilisation d'une longrine qui est un élément de structure ayant la forme d'une poutre et orientée horizontalement, supportant des forces mécaniques importantes. La figure suivante nous montre les éléments de structure précédemment énoncés:

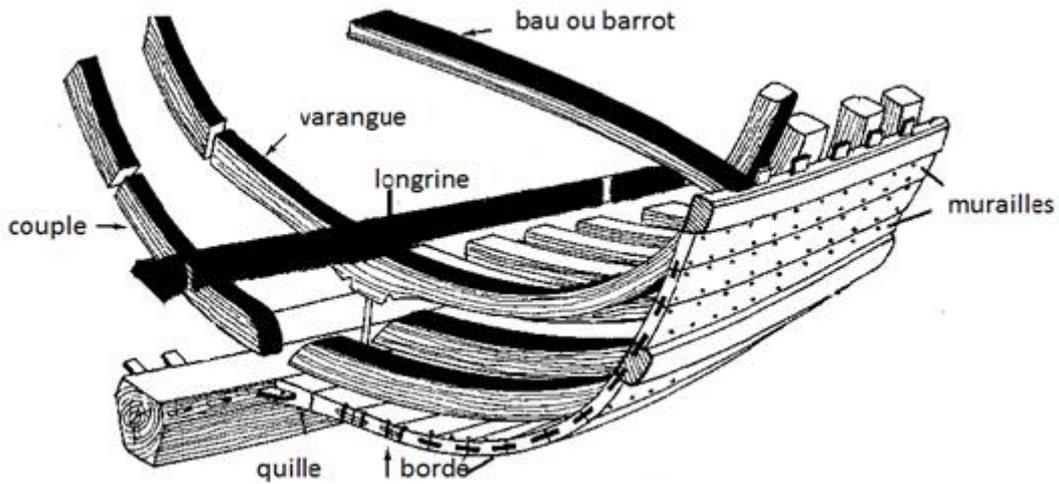


Figure 31: Varangues et longrines.

- g) Motorisation :
Moteur In Board 2*280 Cv à embase Z-drive.
- h) Vitesse : 18 nœuds à 22 nœuds
- i) Réservoir carburant Gasoil.

II-3-3- Configuration d'aménagement et accessoires

- a) Durée du trajet

La vedette rapide effectuera un programme de transit de 12 heures, le temps de trajet possible étant de 5 jours.

- b) Aménagement

L'intérieur sera aménagé en :

- une (01) couchette avec lit double du propriétaire,
- une (01) couchette avec lit simple,
- un (01) carré ou salon convertible en couchettes doubles,
- une (01) cuisine,
- une (01) toilette avec douche,
- une (01) timonerie ou poste de pilotage en bas et une autre dans le Flybridge.

- c) Personnes à bord

En tout, la vedette rapide sera conçue pour embarquer 12 personnes à bord, dont 8 passagers et 4 membres d'équipage.

- d) Electronique de navigation embarquée et électrique

Le navire sera muni d'équipement électronique de pointe. Cela assure la sécurité pendant le trajet et facilite la navigation.

➤ Equipements électroniques

Concernant les équipements électroniques, on peut citer :

- la VHF ou radio maritime : elle inclut l'ensemble des moyens radioélectriques civils utilisés en mer pour communiquer, de navire à navire ou avec des stations côtières, pour la sécurité, la gestion des flottes ou les communications personnelles.
- le sondeur : c'est un appareil servant à mesurer la profondeur de l'eau. Ils sont généralement acoustiques. La profondeur est déduite de la mesure du temps de trajet d'un signal acoustique réfléchi par le fond.
- le speedomètre : c'est une jauge ou un dispositif installé sur un bateau pour mesurer et afficher les vitesses instantanées.
- le GPS, pour "Global Positioning System", est un système de géolocalisation utilisant des signaux satellites pour identifier une position sur une carte.

➤ Equipement électrique

- Les feux de navigations : ce sont des lumières de signalisation maritime, émises par un bateau quand ce dernier voyage de nuit. La position et les caractéristiques d'un feu sont précisément définies, afin que le feu soit identifiable par les marins.

Les différents types de feux de navigation sont :

- les «feux de côté» : vert à tribord et rouge à bâbord, visibles sur $112^{\circ}5$ vers l'avant,
- le «feu de poupe» blanc : visible sur 135° à l'arrière,
- en supplément pour les bateaux à moteur uniquement, un feu dit «feu de tête de mât» : visible sur 225° vers l'avant.

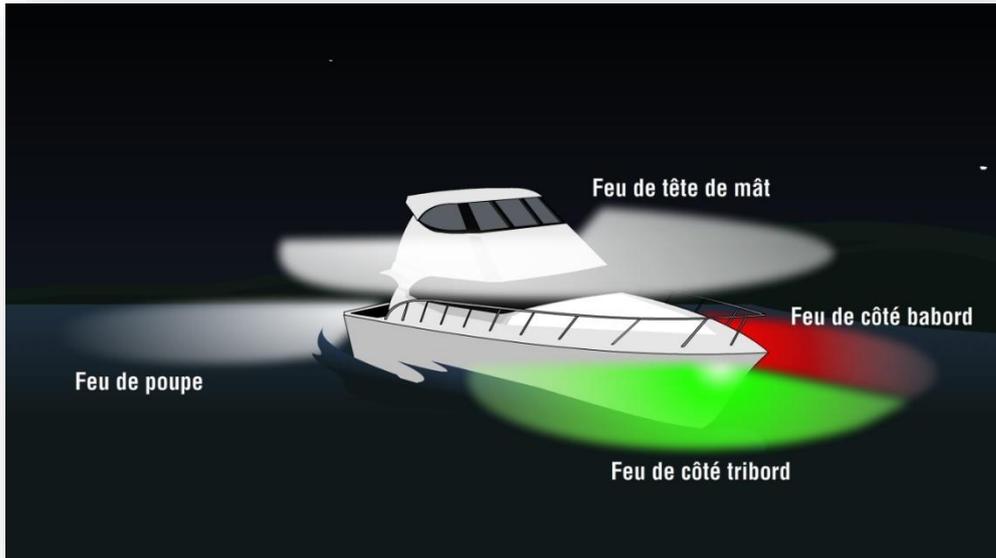


Figure 32: Feux de navigation.

- les pompes de cales : une pompe de cale permet d'évacuer l'eau du bateau. Son fonctionnement est très simple, elle aspire l'eau dans le bateau pour l'envoyer à l'extérieur du bateau.

e) Armement de sécurité et armement complémentaire

Pour prendre la mer en toute sécurité, il est obligatoire d'avoir un certain nombre d'équipements liés à la sécurité comme les bouées et les gilets de sauvetage.

Les armements complémentaires sont :

- les amarres : ils servent à attacher le bateau dans les ports,
- les cordages : c'est l'ensemble des filins qui sont utilisés pour les manœuvres des bateaux, les amarres,...
- Lignes de chaînes, orin et ancre : ils sont destinés à stabiliser des bateaux à un endroit spécifique sur les fonds rocheux, vaseux ou sableux ou dans les ports.

f) Homologation

L'homologation du projet est prise en charge par l'APMF Madagascar ou Agence Portuaire, Maritime et Fluviale. L'APMF est une organisation qui favorise le développement de la navigation fluviale et maritime par réalisation d'infrastructure portuaire. Elle engage des actions destinées à permettre le développement pérenne du transport fluvial et maritime, surtout sur le plan commercial et sur le plan sécuritaire.

Concernant les navires, les missions de l'APMF sont de:

- délivrer les titres des navires dès leurs projets de construction,
- tenir à jour les bases de données des navires circulant dans les eaux territoriales Malagasy,
- appliquer les normes de sécurité et de sûreté des navires,
- normaliser les chantiers navals.

II-4- Conclusion

Ce chapitre s'est tourné vers un côté plutôt mécanique et vers une étude axée sur ce qui régit le mouvement d'un navire. Il nous a informés sur les données précises du cahier des charges. Ces données réunies vont nous permettre d'aborder les détails techniques de la conception du bateau dans ce qui suit.

PARTIE III : FLOTTABILITE ET STABILITE

III- 1 Introduction

Après avoir vu les détails concernant les caractéristiques du navire ainsi que les conditions dans lesquelles il va naviguer, le présent chapitre nous présentera les détails techniques et les dossiers de calculs. Il mettra aussi en relief l'étude de la stabilité et de la flottabilité qui sont deux éléments clés assurant la sécurité à bord d'un navire.

III- 2 Plans de conception

Plusieurs plans sont nécessaires pour la conception d'un navire. Ces plans illustrent les étapes de la construction, ainsi que tous les éléments importants à tenir en compte pour assurer la solidité du navire une fois terminé.

III- 2- 1 Le plan des formes

a) Définition

Le plan des formes représente les formes de la coque du navire et met en évidence son profil hydrodynamique. Ce dernier facilite l'avancement du navire car il permet un écoulement laminaire de l'eau sur la carène.

b) La méthode de conception des plans

Comme nous disposons déjà du moule, les plans ont été conçus grâce à la méthode par relevés. Cette méthode consiste à mesurer les dimensions des diverses parties du navire en partant du moule. Les valeurs ainsi recueillies nous permettront par la suite d'effectuer le tracé du plan des formes.

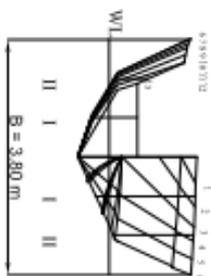
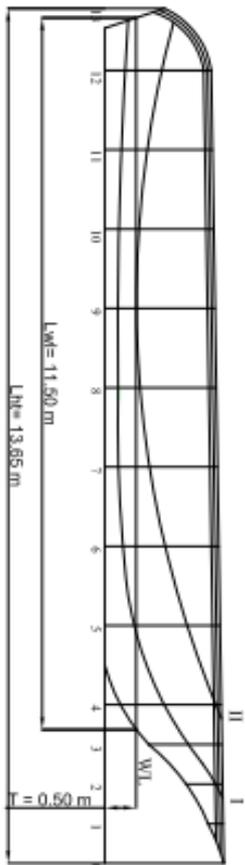
III- 2- 2 Le plan de structure ou plan de construction

Ce plan met en évidence les renforts que l'on ajoute à la coque pour que cette dernière soit plus résistante face aux sollicitations des forces qui agissent sur elle. En effet, comme le bateau subit des mouvements dus à son passage dans l'eau, ces mouvements doivent être maîtrisés afin de réduire les dégâts qu'ils pourraient causer aux installations. Ceci justifie l'ajout de ces renforts. Les éléments de renforts utilisés sont des varangues et des longrines.

III- 2- 3 Le plan d'ensemble

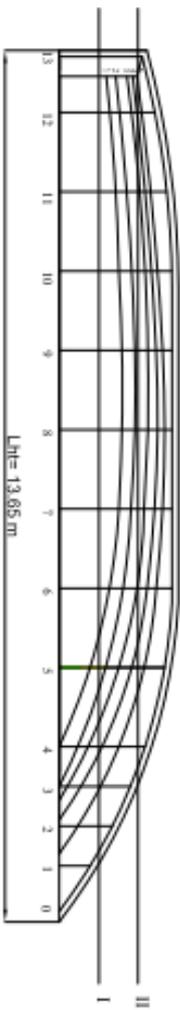
La forme générale du navire une fois terminé, est représentée par le plan d'ensemble. Ce plan illustre aussi la disposition des espaces intérieurs ainsi que l'aménagement et les divers compartiments.

III-2-4 Le plan des réservoirs d'eau et de carburant



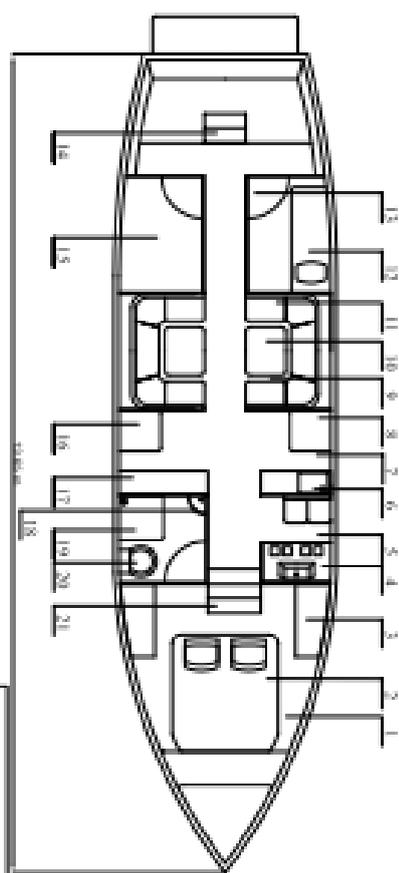
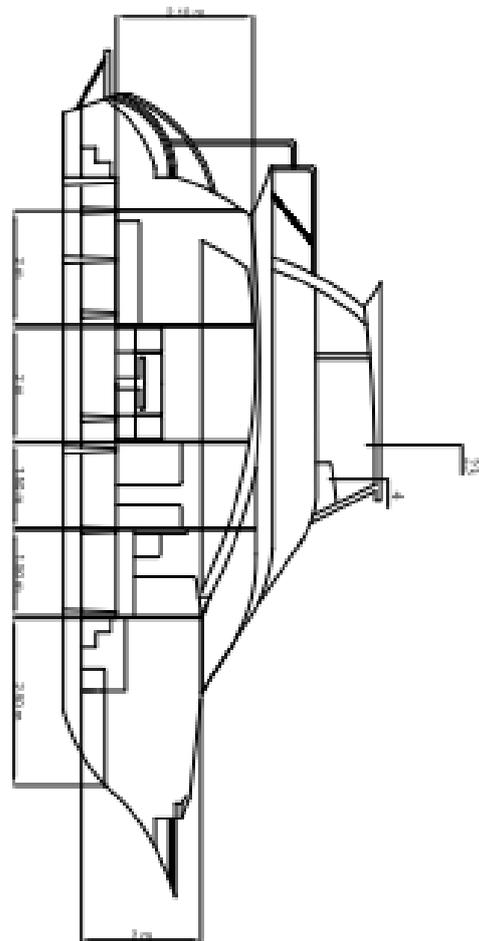
Caractéristiques principales:

- Longueur hors tout Lht = 13,65 m
- Longueur à la Rotaison Lwl = 11,50 m
- Maître bau (largeur) : B = 3,60 m
- Tirant d'eau : T = 0,50 m à 0,75 m
- Moteur 2*300 CV
- Vitesse V = 18 à 22 noeuds
- Déplacement Δ = 5,75 t



PLAN DES FORMES

Echelle = 1 : 68	ESPA
RAVAKA	
24-07-2016	P.01

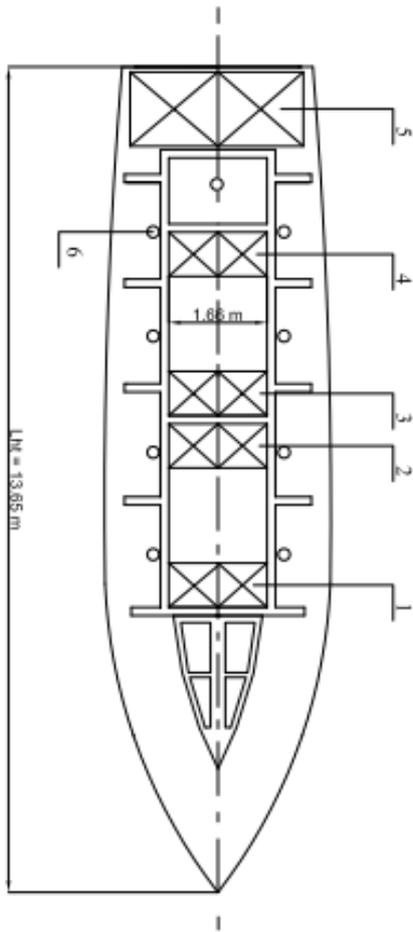
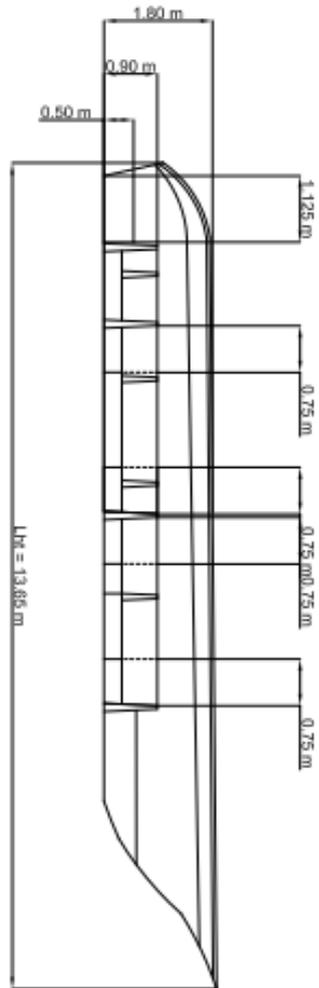


Caractéristiques principales

Longueur hors tout (LH) = 13,65 m
 Longueur à la flottaison (LFL) = 11,50 m
 Maître bau (largeur) : B = 3,60 m
 Tirant d'eau : T = 0,90 m à 0,75 m
 Moteur : 2x200 CV
 Vitesse V = 18 à 22 nœuds
 Déplacement Δ = 5,75 t

PLAN D'AMÉNAGEMENT

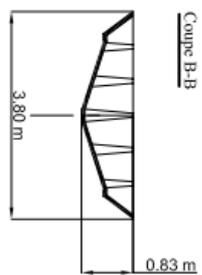
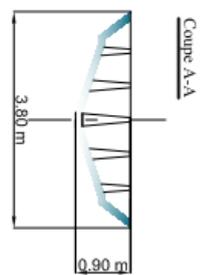
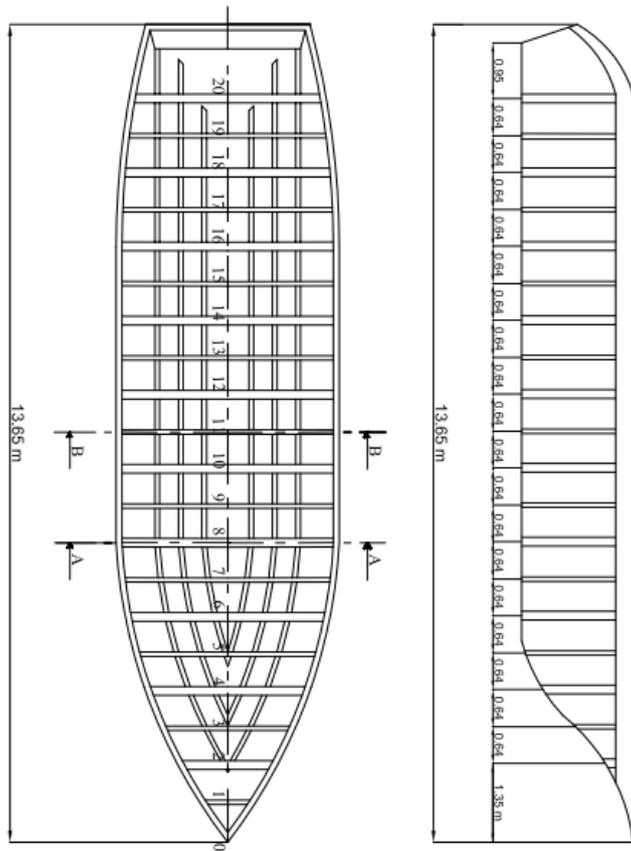
Échelle : 1 : 60	ESPA
RAYACA	
24-07-2016	P.02



6	9	Réserves de flottabilité
5	2	Compartiments moteurs
4	2	Réservoirs d'eau usée
3	2	Compartiments groupes
2	2	Réservoirs d'eau potable
1	2	Réservoirs à carburant
REP. NB.		

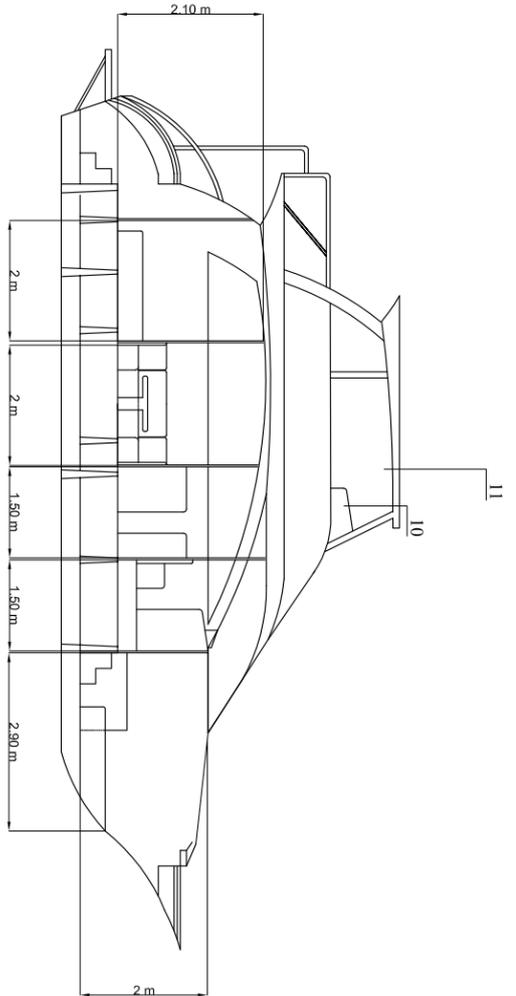
PLAN DES RESERVOIRS

Echelle = 1 : 68	ESPA
RAVAKA	
24-07-2016	P-03



PLAN DE STRUCTURE

Echelle = 1 : 68	ESPA
RAVAKA	
24-07-2016	P.04



Caractéristiques principales:

Longueur hors tout Lht = 13,65 m

Longueur à la flottaison Lwl = 11,50 m

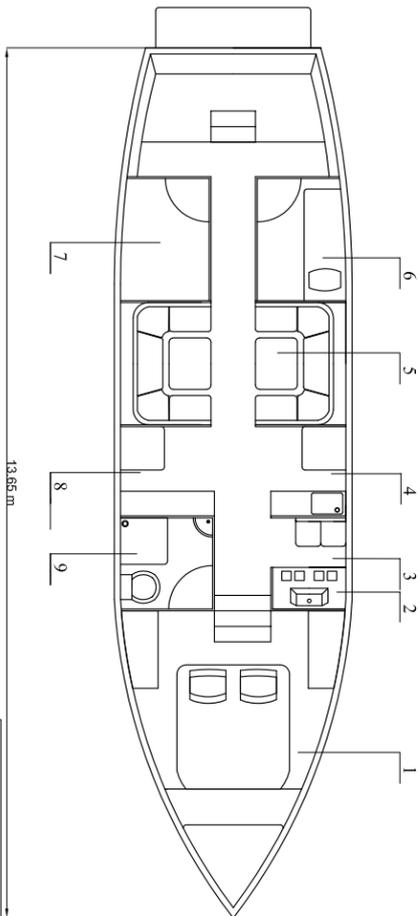
Maitre bau (largeur) : B = 3,60 m

Tirant d'eau : T = 0,50 m à 0,75 m

Moteur 2*300 Ch

Vitesse V = 18 à 22 noeuds

Déplacement Δ = 5,75 t



11	Flybridge
10	Timonerie
9	Toilettes
8	Bar
7	Rangement
6	Couche simple
5	Carré
4	Cuisine
3	Timonerie
2	Table de commande
1	Couche double
REP	Désignation

PLAN D'AMENAGEMENT

Echelle = 1 : 68	ESPA
RAVAKA	
24-07-2016	P.04



III- 3 Devis de poids et centre de gravité

III-3-1 Définitions

Le déplacement est, par définition, le poids du volume d'eau déplacé par la carène du navire qui flotte.

- Le déplacement en lège est le poids du bateau sans approvisionnement ni chargement.
- Le déplacement en charge, quant à lui, représente le poids du navire prêt à appareiller, c'est-à-dire que c'est poids du navire avec les chargements nécessaires pour naviguer.

III-3-2 Devis de poids

Le devis de masse d'un navire est l'un des outils de base pour l'étude du côté technique de la construction d'un bateau. La stabilité du navire dépend directement de cette valeur. Pour avoir le devis de masse le plus précis possible, on prend un à un chaque élément constituant du bateau.

Les points importants à traiter sont :

- la coque et le plancher : cette section prendra en compte les éléments de bordés et le plancher dans chaque pièce.
- Les renforts : les varangues et les longrines destinées pour renforcer la coque seront détaillées dans cette partie.
- Le Fly bridge,
- L'aménagement : chaque pièce sera considérée séparément afin d'avoir une valeur plus précise concernant le poids du navire.
- Les réservoirs : cela concerne les réservoirs d'eau potable et d'eau usé, de carburant,
- Les équipements mécaniques : l'ancre et les chaînes.
- La propulsion : elle concerne les deux moteurs avec le système de direction et les hélices y compris.
- L'accastillage : ceci concerne tous les éléments du pont comme le plat-bord et les balcons.

Le tableau suivant met en évidence le devis de masse de la coque, du plancher et des renforts.

	Désignation	c	n	m _i [kg/m ²]	m [kg]	e [m]	S [m ²]	m _g [kg]	m _R [kg]	m _{MPU} [kg]	m _t [kg]
01	Peak avant	Gelcoat	1			0,006	6,887	7,714	41,32		55,41
		Mat 300	2	0,3	2,066						
		Mat 450	1	0,45	1,549						
		Roving 800	1	0,8	2,755						
02	Peak arrière	Gelcoat	1			0,006	7,634	9,161	45,8		67,565
		Mat 300	2	0,3	4,580						
		Mat 450	1	0,45	3,435						
		Roving 600	1	0,6	4,580						
03	Tableau arrière	Gelcoat	1			0,008	2,794	3.129	16,76	8,941	27,802
		Mat 300	2	0,3	0,838						
		Mat 450	2	0,45	1,257						
		Roving 600	1	0,6	1.676						
04	Bouchains	Gelcoat				0.012	9,016	10,098	54,1		105,675
		Mat 300	4	0.3	10,82						
		Mat 450	4	0.45	16,23						
		Roving 800	2	0.8	14,426						
05	Sur-pavois	Gelcoat	1			0.01	6,205	6,95	37,23		64,043
		Mat 300	2	0,3	3,723						
		Mat 450	4	0,45	11,17						
		Roving 800	1	0,8	4,964						

-	Désignation	c	n	m _i [kg/m ²]	m [kg]	e [m]	S [m ²]	m _g [kg]	m _R [kg]	m _{MPU} [kg]	m _t [kg]
06	Pont	Gelcoat				0,006	30,5	34,16	183	146,4	427,61
		Mat 300	2	0,3	18,3						
		Mat 450	2	0,45	27,45						
		Roving 600	1	0,6	18,3						
		Mousse	1								
07	Fond de carène	Gelcoat				0,12	3,628	4,063	21,76		40,937
		Mat 300	2	0,3	2,77						
		Mat 450	4	0,45	6,53						
		Roving 800	2	0,8	5,805						
08	Murailles	Gelcoat	2			0,009	58,167	130,2	349	93,067	781,667
		Mat 300	4	0,3	69,8						
		Roving 600	1	0,6	34,9						
		Rovimat	2	0,9	104,7						
		Mousse	1								
09	Varangues	Mat 300	1	0,3	5,715	0,004	19,05		114,3	30,49	170,5
		Mat 450	1	0,45	8,57						
		Roving 600	1	0,6	11,43						

	Désignation	c	n	mi [kg/m ²]	m [kg]	e [m]	S [m ²]	m _g [kg]	m _R [kg]	m _{MPU} [kg]	m _t [kg]
10	Varangue de redressage secondaire	Mat 300	1	0,3	3,048	0,004	10,16		60,96	8,67	83,346
		Mat 450	1	0,45	4,572						
		Roving 600	1	0,6	6,096						
		Mousse				0,08					
11	Longrines	Mat 300	1	0,3	2,442	0,004	8,14		48,84	6,94	66,769
		Mat 450	1	0,45	3,663						
		Roving 600	1	0,6	4,884						
		Mousse				0,08					
12	Cloisons	Mat 300	1	0,3	10,05	0,004	35		210		291,8
		Mat 450	1	0,45	15,75						
		Roving 600	1	0,6	21						
13		Mat 300	1	0,3	5,715	0,004					
		Mat 450	1	0,45	18,072						
		Roving 600	1	0,6	24,096						
14	Flybridge	Mat 300	1	0,3	11,84	0,004	37,88		227,2		278,88
		Mat 450	1	0,45	17,04						
		Roving 600	1	0,6	22,72						

	Désignation	c	n	m_i [kg/m ²]	m [kg]	e [m]	S [m ²]	m_g [kg]	m_R [kg]	m_{MPPU} [kg]	m_t [kg]
15	Parquet du Flybridge	Mat 300	1	0,3	5,448	0,004	18,16	20,33	108,9	46,48	200,48
		Mat 450	1	0,45	8,172						
		Roving 600	1	0,6	10,89						
		Mousse				0,08					
Masse totale 1			2 996,76								

Tableau 5: Devis de masse de la coque, du plancher et des renforts

Avec :

- c : composition en fibre,
- n : nombre de couches d tissus utilisées,
- m_i : masse surfacique de la fibre [kg/m²],
- m : masse de fibre [kg],
- e : épaisseur de l'élément [m],
- S : surface de l'élément [m²],
- m_g : masse de Gelcoat utilisé [kg],
- m_R : masse de résine [kg],
- m_{MPPU} : masse de remplissage en mousse Polyuréthane [kg],
- m_t : masse totale de l'élément [kg]

Le tableau suivant exprime le devis de masse de l'aménagement du bateau ainsi que la motorisation.

N°	Désignation	Eléments	Masse de l'élément [kg]	Masse totale de la pièce [kg]
01	Couchette du propriétaire	Lit deux places	70	90
		Penderie	10	
		Table	10	
02	Timoneries (02)	Table de commande	10	23
		Siège deux places	13	
03	Toilette			56
04	Cuisine	Gazinière	38	46
		Evier et payasse	8	
05	Bar	Table	12	54
		Frigidaire	42	
06	Carrés (02)	Sièges	52	72
		Tables	20	
07	Couchettes simple	Lit une place	35	65
		Table	10	
08	Pièce de rangement	Etagères	20	
09	Portes	Porte en acier	23,1	397,8
		Encadrement porte	43,2	
Masse totale 2		738,8		

Tableau 6: Devis de masse de l'aménagement du bateau ainsi que la motorisation

Quant au tableau suivant, il concerne les équipements mécaniques, l'accastillage et la propulsion.

N°	Eléments de structure	Désignation	Nombre	Masse unitaire [kg]	Masse totale [kg]
01	Accastillages	Plat-bord			22,75
		Main courante			387,5
02	Propulsion	Moteurs	02	662	1 324
		Batteries	02	13	26
03	Eléments mécaniques	Ancre	01		16
		Chaines			15
04	Groupe électrogène	Groupe de 6,6 kVA	01		77
04	Les réservoirs		06		12
05	Verre (Plexiglass)				112,73
Masse totale 3					1 982,98

Tableau 7: Devis de masse des équipements mécaniques, de l'accastillage et de la propulsion

D'où la masse totale du navire

$$M = \text{Masse totale 1} + \text{Masse totale 2} + \text{Masse totale 3}$$

$$M = 2\,996,76 \text{ kg} + 738,8 \text{ kg} + 1\,915,98 \text{ kg}$$

$M = 5\,728,54 \text{ kg}$

III-3-3 Recherche du centre de gravité

Le centre de gravité d'un navire est le point d'application de la résultante de toutes les forces appliquées. Sa position reste constante lorsque le navire est en mouvement. Il se détermine à partir du théorème barycentrique.

a) Référence :

Le système de référence adopté pour les calculs est un repère orthonormé (O, X, Y, Z), l'origine du repère se trouvant au milieu de la ligne de base longitudinale du bateau. Ce système est illustré par la figure suivante :

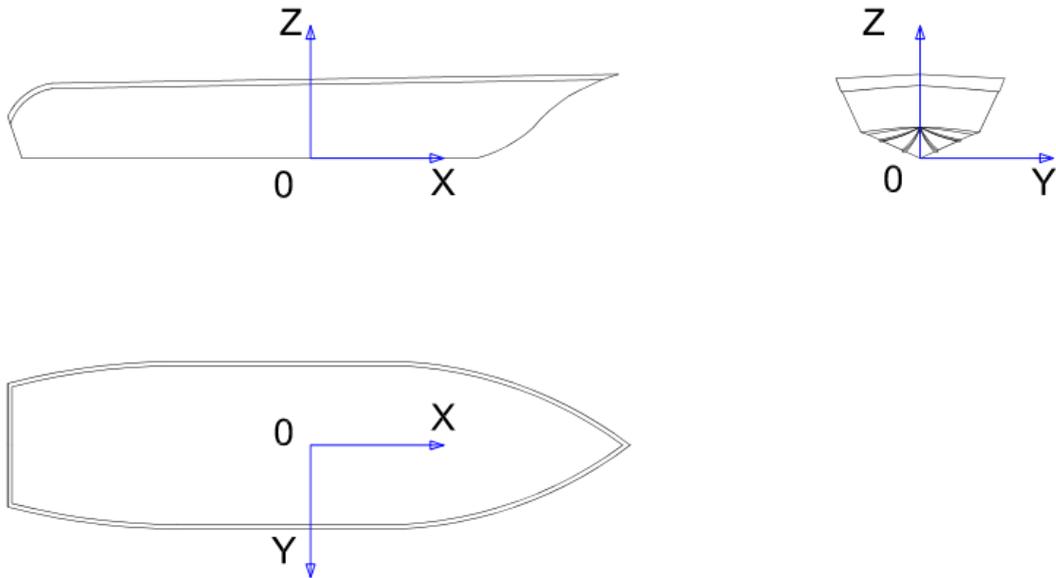


Figure 33: Référentiel.

b) Détermination :

Pour ce qui suit, le bateau sera assimilé à un système de n points pondérés. Autrement dit, on aura :

$$(S) = \{(G_1, m_1) ; (G_2, m_2) ; (G_3, m_3) ; (G_i, m_i) ; \dots ; (G_n, m_n)\}$$

Tel que :

- G_i : le centre de gravité de l'élément i,
- M_i : la masse de l'élément.

Les coordonnées du centre de gravité est défini par la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^N m_i \overrightarrow{GP_i} = \vec{0}$$

En développant le premier membre de l'égalité, appliquant le théorème de Chasles aux vecteurs $\overrightarrow{GP_i}$ avec O un point du système (origine d'axes), on obtient la relation:

$$\sum_{i=1}^N m_i (\overrightarrow{OP_i} - \overrightarrow{OG}) = \vec{0}$$

$$\sum_{i=1}^N m_i \overrightarrow{OP_i} = \sum_{i=1}^N m_i \overrightarrow{OG}$$

On note par M la masse totale du système et elle est égale à la somme discrète de celle des points constituants :

$$M = \sum_{i=1}^N m_i$$

Donc, l'expression précédente devient :

$$\sum_{i=1}^N m_i \overrightarrow{OP_i} = M \overrightarrow{OG}$$

D'où on déduit la formule donnant la position du centre de gravité G du système par rapport à O :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \overrightarrow{OP_i}}{M}$$

Après projection sur les axes du référentiel choisi, on a les coordonnées suivantes :

$$\begin{pmatrix} X_G = \frac{\sum_{i=1}^N m_i X_i}{M} \\ Y_G = \frac{\sum_{i=1}^N m_i Y_i}{M} \\ Z_G = \frac{\sum_{i=1}^N m_i Z_i}{M} \end{pmatrix}$$

Tels que (X_G, Y_G, Z_G) et (X, Y, Z) sont respectivement les coordonnées de G et P_i ; les termes $m_i X_i$, $m_i Y_i$ et $m_i Z_i$ représentent les moments statiques du système.

Le tableau suivant montre les différentes valeurs des moments statiques de chaque élément de structure, ainsi que la détermination du centre de gravité.

Désignation	Masse P_i [kg]	Coordonnées [m]			Moments statiques [kg.m]		
		X_i	Y_i	Z_i	$P_i \cdot X_i$	$P_i \cdot Y_i$	$P_i \cdot Z_i$
Tableau arrière	27,802	-6,825	0	0,475	-189,748	0	13,20595
Varangue 1	18,95	-5,555	0	0,8	-105,267	0	15,16
Varangue 2	18,95	-4,275	0	0,8	-81,0112	0	15,16
Varangue 3	18,95	-2,995	0	0,8	-56,7552	0	15,16
Varangue 4	18,95	-1,715	0	0,8	-32,4992	0	15,16
Varangue 5	18,95	-0,435	0	0,8	-8,24325	0	15,16
Varangue 6	18,95	0,845	0	0,8	16,01275	0	15,16
Varangue 7	18,95	2,125	0	0,8	40,26875	0	15,16
Varangue 8	18,95	3,405	0	0,8	64,52475	0	15,16
Varangue 9	18,95	4,685	0	0,8	88,78075	0	15,16

Désignation	Masse P _i [kg]	Coordonnées [m]			Moments statiques [kg.m]		
		X _i	Y _i	Z _i	P _i . X _i	P _i . Y _i	P _i . Z _i
Var. Sec. 1	9,25	-4,915	0	0,8	-45,4637	0	7,4
Var. Sec. 2	9,25	3,635	0	0,8	33,62375	0	7,4
Var. Sec. 3	9,25	-2,355	0	0,8	-21,7837	0	7,4
Var. Sec. 4	9,25	-1,075	0	0,8	-9,94375	0	7,4
Var. Sec. 5	9,25	0,205	0	0,8	1,89625	0	7,4
Var. Sec. 6	9,25	1,455	0	0,8	13,45875	0	7,4
Var. Sec. 7	9,25	2,705	0	0,8	25,02125	0	7,4
Var. Sec. 8	9,25	3,955	0	0,8	36,58375	0	7,4
Var. Sec. 9	9,25	5,205	0	0,8	48,14625	0	7,4
Pont	427,61	0	0	0,9	0	0	384,849
Plafond	335,276	0	0	2	0	0	670,552
Parquet Fly	200,48	0	0	2,1	0	0	421,008
Flybridge	278,88	0	0	3,95	0	0	1101,576
Moteur 1	662	-6,036	-0,71	0,25	-3995,83	-470,02	165,5
Moteur2	662	-6,036	0,71	0,25	-3995,83	470,02	165,5
Groupe	77	0	0	0,45	0	0	34,65
Rés. Eau	2	0	0	0,45	0	0	0,9
Rés. Eau usée	2	0	0	0,45	0	0	0,9
Rés. Carburant	2	0	0	0,45	0	0	0,9
Couchette 1	90	0	0	0,2	0	0	18
Couchette 2	45	-3,765	-1,06	0,2	-169,425	-47,7	9
Timonerie 1	23	1,42	-1,21	1,62	32,66	-27,83	37,26
Timonerie 2	23	2,66	0,65	3,88	14,95	14,95	89,24
Carrés (02)	144	0	0	0,33	0	0	47,52
Toilette	56	1,38	1,06	1,5	77,28	59,36	84
Cuisine	46	0,2	-1,12	0,54	9,2	-51,52	24,84
Bar	54	-0,15	1,06	0,54	-8,1	57,24	29,16
Porte 1	66,3	-5,3	0	0,95	-351,39	0	62,985
Porte2	66,3	-4,37	0,73	0,95	-289,731	48,399	62,985
Porte 3	66,3	-4,37	-0,73	0,95	-289,731	-48,399	62,985

Désignation	Masse P_i [kg]	Coordonnées [m]			Moments statiques [kg.m]		
		X_i	Y_i	Z_i	$P_i \cdot X_i$	$P_i \cdot Y_i$	$P_i \cdot Z_i$
Porte 4	66,3	1,8	0,85	0,95	119,34	56,355	62,985
Porte 5	66,3	2,62	0,85	0,95	173,706	56,355	62,985
Porte 6	66,3	2,62	-0,85	1,85	173,706	-56,355	122,655
Somme des moments statiques					-8681,59	60,855	3939,181
Coordonnées de G					-1,59	0,0106	0,687

Tableau 8: Moments statique de chaque élément de structure

Les coordonnées de G sont alors :

$$X_G = - 1,59 \text{ m}$$

$$Y_G = 0,01 \text{ m}$$

$$Z_G = 0,687 \text{ m}$$

III- 4 Flottabilité

III-4-1 Définition

La flottabilité est, par définition, la possibilité du navire de se tenir en équilibre dans la position verticale par rapport à la surface de l'eau.

III-4-2 Détermination du déplacement et du volume de carène

Il existe plusieurs méthodes pour connaître la surface immergée d'un bateau. On peut citer les trois méthodes suivantes :

- la méthode de trapèzes,
 - la méthode de Tchebychev,
 - la méthode de Simpson.
- La méthode de Tchebychev :

La méthode de Tchebychev est celle utilisée pour la détermination des aires pour les petites et moyennes embarcations. Cette méthode consiste à diviser la surface à calculer en tranches de différentes largeurs. Elle permettra d'obtenir des résultats plus précis.

Le tableau suivant nous montre les coefficients de Tchebychev :

Nombre d'ordonnées	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉
2	0,211	0,789							
3	0,146	0,500	0,854						
4	0,103	0,406	0,594	0,897					
6	0,067	0,289	0,367	0,633	0,711	0,933			
7	0,058	0,236	0,338	0,500	0,662	0,764	0,942		
9	0,044	0,199	0,236	0,416	0,500	0,584	0,764	0,800	0,956

Tableau 9: Coefficients de Tchebychev

III-4-3 Aires des couples

a) Calcul des aires des couples :

Pour le cas de la vedette rapide nous prendrons 5 divisions, d'où les coefficients de Tchebychev :

Nombre d'ordonnées	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
5	0,083	0,312	0,500	0,687	0,916

Tableau 10: Coefficient de Tchebychev pour 5 divisions

Par définition, on a : $x_i = K_i * T$

Tel que T : est le tirant d'eau, $T = 0,5$ m, on aura les valeurs de x suivantes pour chaque coefficient :

I	1	2	3	4	5
K_i	0,083	0,312	0,500	0,687	0,916
$x_i = K_i * T$	0,0415	0,156	0,25	0,3435	0,458

Tableau 11: Valeur de x pour chaque coefficient de Tchebychev

La valeur de y_i se déduit sur le plan à partir de ceux de x_i , et la surface immergée du couple se détermine par la formule suivante :

$$S = \frac{T}{n} \sum_{i=0}^n y_i$$

Comme les couples n°1, n°2 et n°3 se trouvent au-dessus de la ligne de flottaison, ils n'ont pas d'intersection avec les lignes de divisions donc leurs surfaces n'entrent pas dans le calcul de déplacement.

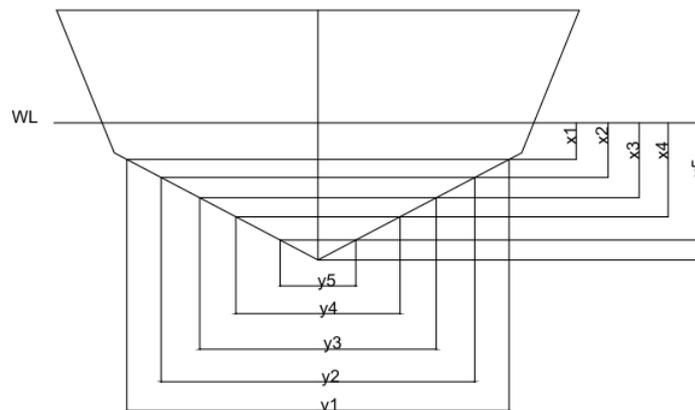


Figure 34: Coordonnées de l'aire immergée d'un couple.

On a alors le tableau suivant :

Couples	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Divisions	Ordonnées aux divisions									
1	0,070	0,123	0,181	0,203	0,245	0,239	0,233	0,219	0,206	0,140
2	0,263	0,464	0,800	0,897	0,930	0,899	0,876	0,825	0,775	0,529

3	0,422	0,743	1,095	1,204	1,450	1,403	1,366	1,297	1,211	0,849
4	0,580	1,021	1,504	1,667	1,756	1,697	1,659	1,565	1,478	1,166
5	0,773	1,379	2,006	2,055	2,131	2,071	2,018	1,904	1,805	1,555
$\sum y_i$ [m]	2,108	3,73	5,586	6,026	6,512	6,309	6,152	5,81	5,475	4,239
Si [m ²]	0,2108	0,373	0,5586	0,6026	0,6512	0,6309	0,6152	0,581	0,5475	0,4239

Tableau 12: Ordonnées aux divisions

b) Courbe des aires des couples :

Les valeurs des surfaces de tous les couples étant ainsi déterminées, on peut en faire une reproduction graphique sous forme de la courbe des aires. Par définition, la courbe des aires des couples est la représentation graphique de l'évolution des volumes immergés de la carène.

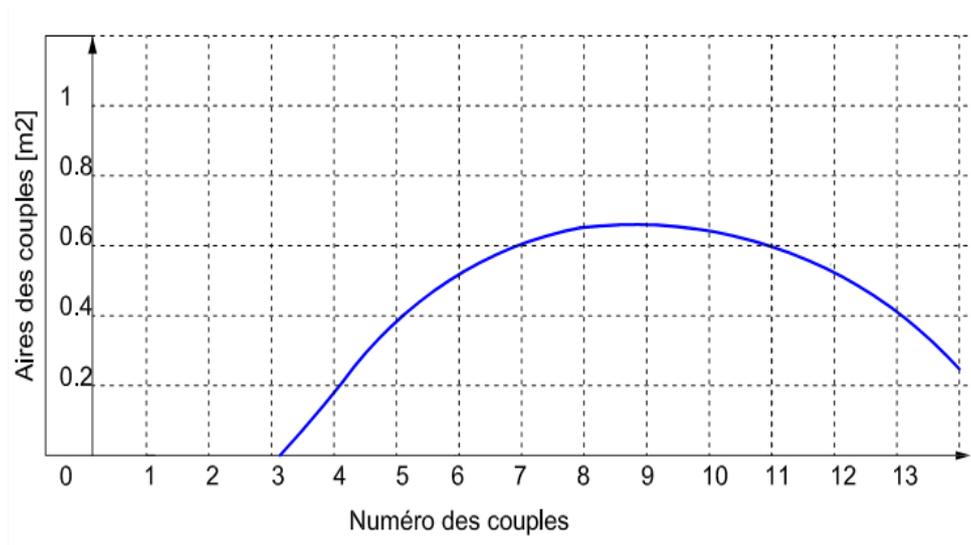


Figure 35: Courbe des aires des couples.

La courbe de la vedette rapide indique une surface immergée plus importante dans la partie arrière du navire. De ce fait, la résistance à l'avancement diminue. Les valeurs de l'aire des couples sont assez élevées au niveau des couples n°8, n°9 et n°10. La valeur maximale est de 0,6512 m², pour le couple n° 08.

c) Calcul du volume de la carène

Le volume de la carène d'un navire est égal au produit de la valeur moyenne des surfaces ou aires des couples par la longueur à la flottaison.

$$V = S_m * L_{WL}$$

Tel que :

L_{wl} : longueur à la flottaison

S_m : surface moyenne des couples sur les 5 divisions.

Comme on a utilisé la méthode de Tchebychev à 5 divisions, le tableau suivant nous montre les surfaces respectives des couples à chaque division ainsi que la valeur moyenne.

N° couple	Aire à chaque division [m ²]
1	0,166
2	0,546
3	0,606
4	0,606
5	0,516
Somme [m ²]	2,44
Valeur moyenne S_m [m ²]	0,488

Tableau 13: Aires des couples

Le volume de la carène est donc :

$$V = 0,488 * 11,50$$

$V = 5,612 \text{ m}^3$

d) Calcul du déplacement

Le déplacement est le poids du volume d'eau déplacé par la carène. Il est égal au produit du volume de la carène par la densité d l'eau (eau de mer ou eau douce).

$$\Delta = V * a$$

Tel que :

- En eau douce, $a = 1$
- En eau de mer, $a = 1,026$.

Dans notre cas, comme la vedette rapide naviguera en mer, le déplacement est égal à

$$\Delta = 5,612 * 1,026$$

$$\Delta = 5,75 \text{ t}$$

III-4-4 Aires des lignes d'eau

Précédemment, nous avons calculé le volume de carène ainsi que le déplacement à partir des aires des couples. Ce paragraphe servira de vérification aux valeurs que nous avons calculées.

a) Calcul des aires des lignes d'eau

On procède de la même façon que pour les aires de couples pour déterminer l'aire des lignes d'eau. Les valeurs de x_i sont obtenues à partir des coefficients de Tchebychev.

On a le tableau de valeurs suivant pour la ligne d'eau n°1:

i	1	2	3	4	5
Ki	0,083	0,312	0,500	0,687	0,916
$x_i = Ki * \lambda_1$ [m]	0,913	3,432	5,5	7,557	10,076
yi[m]	1,639	1,91	2,012	1,844	0,749

Tableau 14: Valeur de xi pour la ligne d'eau n°1

L'aire S₁ se détermine de la manière suivante :

$$S_1 = \frac{\lambda_1}{n} \sum_{i=0}^n y_i$$

Tel que :

λ_1 : longueur de la ligne d'eau n°1, $\lambda_1 = 11$ m

n : nombre de division, n = 5.

S₁ = 17,93 m²

On procède de la même façon pour chaque ligne d'eau et on obtient le tableau suivant :

Longueur de la ligne d'eau	$\lambda_1=11$ m		$\lambda_2=11,50$ m		$\lambda_3=11,75$ m	
Ordonnées aux divisions	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]
	0,913	1,639	0,945	1,881	0,975	1,962
	3,342	1,91	3,588	2,167	3,666	2,323
	5,5	2,012	5,75	2,254	5,875	2,425
	7,557	1,844	7,900	2,029	8,072	2,204
	10,076	0,749	10,499	0,796	10,763	1,063
Surface [m ²]	17,93		20,90		23,44	

Longueur de la ligne d'eau	$\lambda_4=12,07$ m		$\lambda_5=12,93$ m		$\lambda_6=13,53$ m	
Ordonnées aux divisions	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]
	1,00	2,310	1,073	2,909	1,122	3,219
	3,76	2,763	4,034	3,241	4,22	3,514

	6,035	2,830	6,465	3,363	6,765	3,608
	8,29	2,584	8,88	3,063	9,295	3,462
	11,056	1,059	11,84	1,322	12,393	1,513
Surface [m ²]	27,87		35,94		41,17	

Les lignes d'eau considérées sont celles situées au-dessous de la ligne de flottaison.

Longueur de la ligne d'eau	$\lambda=10,25\text{m}$		$\lambda=11,154\text{m}$		$\lambda=11,50\text{m}$	
Ordonnées aux divisions	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]	x[m]	y[m]
	0,85	0,49	0,925	1,124	0,975	1,962
	3,19	0,725	3,480	1,420	3,666	2,323
	5,12	0,73	5,577	1,266	5,875	2,425
	6,86	0,55	7,662	1,02	8,072	2,204
	9,38	0,175	10,217	0,146	10,763	1,063
Surface [m ²]	4,028		10,013		20,90	

Tableau 15: Ordonnées aux divisions pour chaque ligne d'eau

b) Courbe des aires des lignes d'eau

On obtient alors la courbe des lignes d'eau suivante :

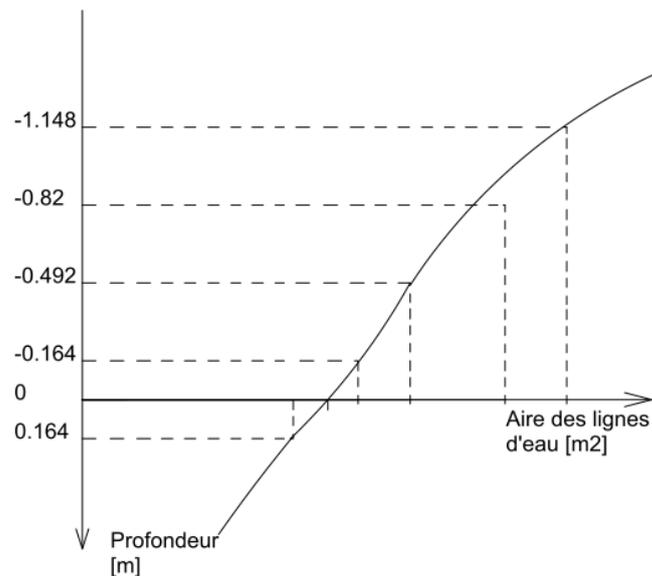


Figure 36: Aire des lignes d'eau.

Ce diagramme nous donne un aperçu sur les surfaces horizontales immergées du bateau, l'origine de l'axe des profondeurs étant la ligne de flottaison du bateau.

Mesure du volume de la carène :

$$V = 11,228 * 0,5$$

$$V = 5,614 \text{ m}^3$$

Calcul du déplacement

$$\Delta = V * a$$

$$\Delta = 5,614 * 1,026$$

$$\Delta = 5,76 \text{ t}$$

III-4-5 Le centre de carène

Le centre de carène, noté C, est le centre de gravité du volume d'eau déplacé par la carène. Il est aussi appelé centre de poussée du fait que c'est le point d'application de la poussée d'Archimède, qui fait flotter le navire dans l'eau. Les précédents calculs nous ont permis de déterminer ses coordonnées, en utilisant les aires des couples et les lignes d'eau ainsi que les coefficients de Tchebychev dans le tableau suivant. Et comme C se trouve sur le plan de symétrie longitudinale, alors $Y_C = 0$.

Pour déterminer les coordonnées du centre de carène, on adopte le référentiel suivant puisque seule la partie immergée dans l'eau est considérée pour les déterminer.

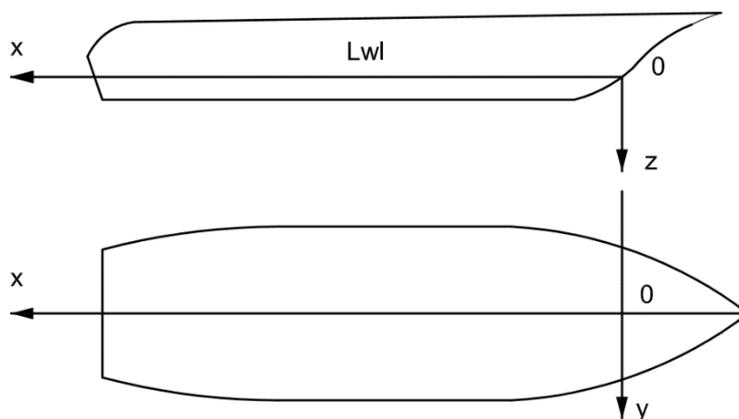


Figure 37: Référentiel pour la détermination du centre de carène

Le tableau suivant nous donne les aires des couples et les aires des lignes d'eau pour chaque division. Cela nous permettra de déterminer les coordonnées de C. Les aires des couples donneront la valeur de X_C tandis que les aires des lignes d'eau celle de Z_C .

Division N°	Coefficient K	Couples		Lignes d'eau	
		Aire S	Aire*K _i KS	Aire S	Aire*K _i KS
1	0,083	0,166	0,013778	2,108	0,174964
2	0,312	0,546	0,170352	3,75	1,17
3	0,5	0,606	0,303	5,558	2,779
4	0,687	0,606	0,416322	6,026	4,139862
5	0,916	0,516	0,472656	6,512	5,964992
Somme de S = Σ		2,44		23,954	
Somme de KS = M			1,374		14,2269

Tableau 16: Aire des couples et des lignes d'eau

Les coordonnées de C se déterminent de la façon suivante :

$$X_C = \frac{M_C * L_{WL}}{\Sigma_C}$$

$$Z_C = \frac{M_L * T}{\Sigma_L}$$

Telle que :

M_C : Somme de KS des couples

Σ_C : Somme de S des couples

M_L : Somme de KS des lignes d'eau

Σ_L : Somme de S des lignes d'eau

L_{WL} : Longueur à la flottaison

T : Tirant d'eau.

Les coordonnées du centre de carènes sont les suivantes :

$$X_C = 6,47 \text{ m}$$

$$Y_C = 0$$

$$Z_C = 0,296 \text{ m}$$

III-5 Stabilité

III-5-1 Définition

La stabilité se définit comme étant la tendance d'un navire à revenir à sa position initiale après avoir été incliné par les forces extérieures. La stabilité représente l'élément principal des qualités marines d'un navire. En d'autres termes, la stabilité est associée à la sécurité mais n'est pas pour autant opposée aux performances du navire.

III-5-1 Stabilité transversale du navire

Soit P le poids du navire et D la poussée d'Archimède. Quand le navire est sous l'action d'un moment inclinant M_i , la section transversale du navire tourne autour de l'axe longitudinal de la surface de flottaison correspondante. Ce déplacement se traduit par une rotation d'un angle θ , que l'on appelle angle de gîte. Pour la section longitudinale, ce déplacement se traduit par une rotation d'un angle Ψ , appelé assiette. Le poids P et la poussée d'Archimède D forment un couple de force, appelé couple de redressement M_r . C'est ce couple qui fait revenir le navire à sa position initiale dès que l'action de M_i cesse.

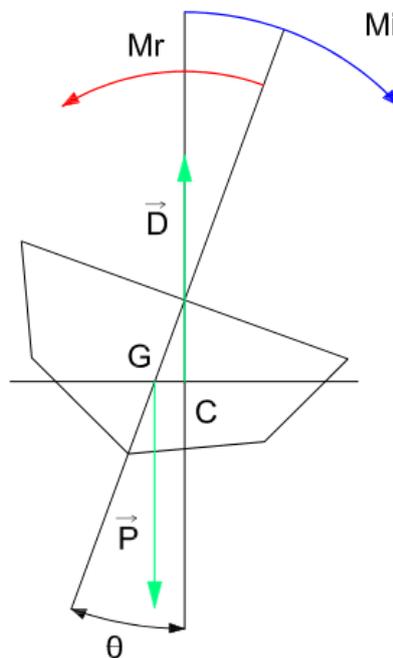


Figure 38: Angle de gîte θ .

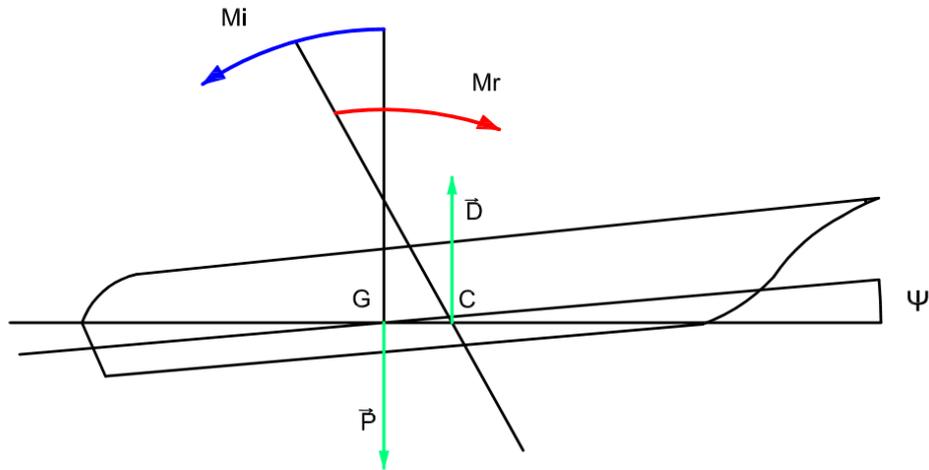


Figure 39: Assiette Ψ .

a) Formule métacentrique de stabilité

Le lieu géométrique des centres de carènes, à chaque inclinaison du navire, est ce qu'on appelle courbe des centres de carènes. Le centre de courbure de cette courbe est appelé métacentre. La détermination du métacentre est très importante puisque sa position par rapport au centre de gravité G détermine si le navire sera stable ou non.

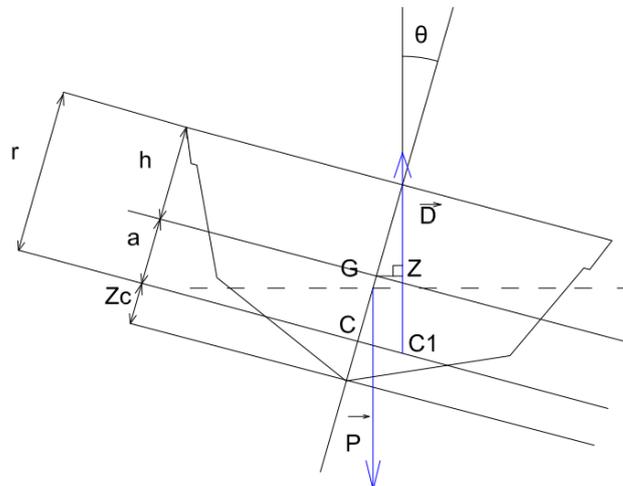


Figure 40 : Rayon métacentrique.

Avec :

r : rayon métacentrique. C'est la distance entre le métacentre et le centre de carène,

h : hauteur métacentrique. C'est la distance entre le centre de gravité et le métacentre, appelé GM

GZ : bras de levier de la stabilité statique,

$a = C_0G$: distance entre le centre de gravité et le centre de carène à la position initiale.

Le couple de redressement M_r s'écrit alors :

$$M_r = D * GZ$$

Or, $GZ = h \sin \theta$ d'où

$$M_r = D * h \sin \theta$$

La hauteur métacentrique peut aussi s'exprimer par la relation suivante :

$$h = r - a$$

D'où l'expression du moment redresseur :

$$M_r = D(r - a) \sin \theta$$

Tel que :

M_r : moment redresseur [kN.m],

D : poussée d'Archimède [kN],

r : rayon métacentrique [m],

θ : angle de gîte ou angle d'inclinaison [°]

b) Calcul du rayon métacentrique

Compte tenu des conditions dans lesquelles le bateau va naviguer, on n'utilise la formule métacentrique que dans les faibles inclinaisons, et l'hypothèse est que nous considérons des inclinaisons et des flottaisons isocarènes. Autrement dit, pour l'étude de la stabilité, on suppose que lors de l'inclinaison, le poids du navire et le volume de la partie immergée restent constants.

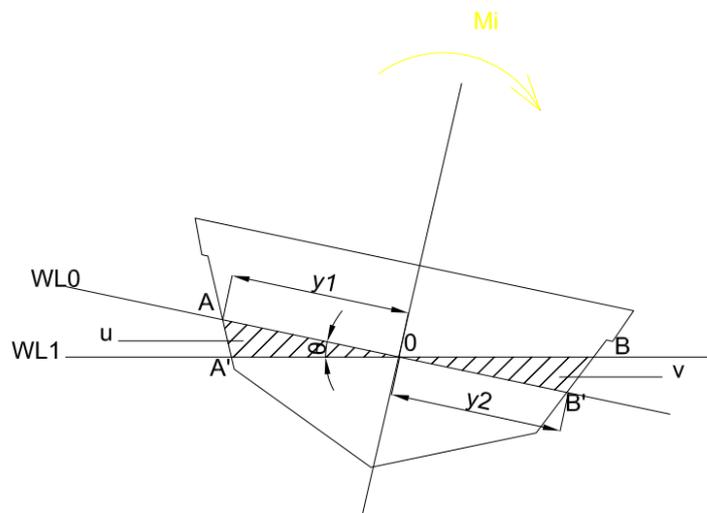


Figure 41: Volume émergent et immergent de la carène.

Le triangle AOA' représente l'onglet émergent tandis que BOB' représente l'onglet immergent. Considérons l'onglet émergent représenté par le volume u.

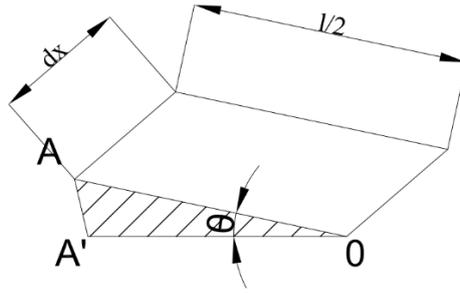


Figure 42: Volume élémentaire du.

Le volume élémentaire, sur une longueur dx du navire est :

$$d_u = S(AOA')dx$$

$$d_u = \frac{1}{2}y_1 * y_1 \tan \theta dx$$

Et comme on est en faibles inclinaisons, c'est-à-dire à de faibles angles, alors $\sin \theta = \tan \theta = \theta$.

On peut écrire alors : $d_u = \frac{1}{2}l * l * \theta dx$

Le volume sera : $u = \frac{1}{8}l^2 \theta x$, x étant la longueur de la section considéré.

Le moment de redressement de l'élément de volume u est

$$m = \frac{GZ}{3} * v = \frac{l}{3} * v$$

$$\text{Donc } m = \frac{l^3 * \theta * x}{24}$$

Le moment résultant des deux onglets AOA' et BOB' est $m_r = 2 * m$

En égalisant ce moment résultant avec le moment de la carène entière, tel que V étant le volume de la carène, on aura l'équation : $2m = r\theta * V$

$$\text{D'où : } \frac{l^3 * \theta * x}{24} * 2 = r\theta * V$$

Finalement, on aura la valeur de $r = \frac{l^3 * x}{12 V}$

En intégrant sur toute la longueur à la flottaison L_{WL} du navire, on aura : $r = \frac{\Sigma l^3}{12 V} * \frac{L_{WL}}{n}$

Avec n : nombre d'éléments considérés.

Comme les couples 1,2 et 3 se trouvent au-dessus de la ligne de flottaison, ils ne seront pas considérés.

N°	Largeur à la flottaison [m]	l^3 [m ³]
04	0,34	0,0393
05	1,26	2,0003
06	1,84	6,2295
07	2,14	9,8003
08	2,24	11,2394
09	2,24	11,2394
10	2,14	9,8003
11	2,04	8,4896
12	1,86	6,4348
13	1,72	5,0884
	Somme	70,3616

Tableau 17: Largeur à la flottaison à chaque division

D'où : $r = 1,302$ m

c) Position du métacentre

On sait que le rayon métacentrique est la distance entre le centre de carène et le métacentre, c'est-à-dire $r = MC$. La figure suivante illustre la position du métacentre par rapport à la ligne de flottaison.

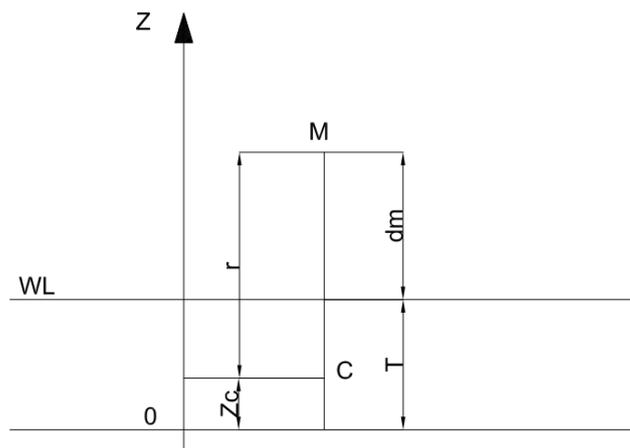


Figure 43: Position du métacentre.

On a : $dm = r - (T - Zc)$

Tel que

dm : distance du métacentre par rapport à la ligne de flottaison

r : rayon métacentrique

T : tirant d'eau

Zc : cote de C suivant l'axe 0Z

De ce fait, $dm = 1,302 - (0,75 - 0,297)$

D'où $dm = 0,849$ m

Le métacentre se trouve donc à une distance de 0,849 m au-dessus de la ligne de flottaison.

III-5-2 Stabilité pour les grandes inclinaisons

Pour les faibles inclinaisons, le rayon métacentrique ne varie pas à de différentes valeurs de l'angle de gîte. Et de ce fait, la courbe des centres de carène décrit un arc de cercle. Mais pour les grandes inclinaisons, c'est-à-dire, à des valeurs élevées de l'angle de gîte, les rayons métacentriques diffèrent sensiblement. Le poids du navire reste inchangé même si les volumes sont différents pour les flottaisons menés par le point d'intersection du plan longitudinal médian et de la ligne de flottaison WL.

a) Courbe des centres de carènes

Afin de calculer et tracer les courbes de stabilité, il est nécessaire de connaître la position du centre de carène et du métacentre à ces mêmes inclinaisons. Dans notre cas, on a choisi de mesurer les carènes inclinées pour des intervalles d'angles d'inclinaison de $\theta=10^\circ$.

La surface de flottaison S_i se détermine avec la formule :

$$S_i = \frac{L}{n} * (\Sigma a + \Sigma b)$$

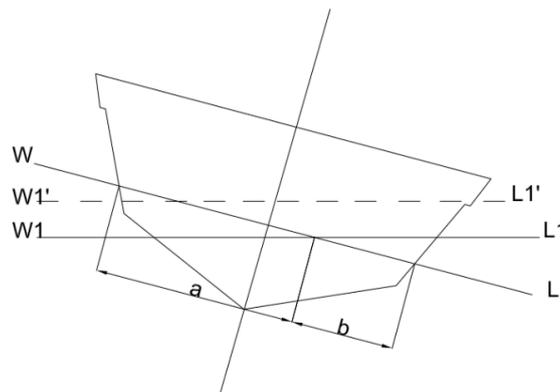


Figure 44: Flottaison auxiliaire et isocarène.

Tel que : $W'L'_1$ est appelé flottaison auxiliaire

W_1L_1 est appelé isocarène.

Le volume compris entre ces deux lignes de flottaison forme ce qu'on appelle couche de correction. Cette couche a une épaisseur e, telle que :

$$e = \frac{1}{2} \eta * \Delta\theta$$

L'abscisse du centre de flottaison η se détermine par la formule suivante :

$$\eta = \frac{1}{2} * \frac{\Sigma a^2 - \Sigma b^2}{\Sigma a^2 + \Sigma b^2}$$

Le rayon métacentrique relatif à l'angle θ est :

$$r_i = \frac{1}{3} * \frac{L}{n} * \frac{1}{V} * (\Sigma a^3 + \Sigma b^3) - S_i * \frac{\eta^2}{V}$$

Tel que :

η : abscisse du centre de gravité de la flottaison,

$\Delta\theta$: angle entre les deux flottaisons voisines,

$L = L_{WL}$: longueur à la flottaison,

V : volume de la carène.

Le tableau suivant montre la surface de flottaison à 10° .

N° couple	Onglet immergent			Onglet émergent		
	a	a2	a3	b	b2	b3
1	0,682	0,465124	0,10062508	0,581	0,337561	0,03846421
2	0,967	0,935089	0,81763382	0,865	0,748225	0,41888677
3	1,006	1,012036	1,03654434	0,906	0,820836	0,5530561
4	1,058	1,119364	1,40253596	0,975	0,950625	0,8590683
5	1,146	1,313316	2,26520601	1,043	1,087849	1,28737731
Somme	4,859	4,844929	5,62254521	4,37	3,945096	3,15685269

Tableau 18: Surface de flottaison à 10°

D'où :

$$S_i = 21,2267 \text{ m}^2$$

$$\eta = 0,051 \text{ m}$$

$$r_i = 0,981 \text{ m}$$

Nous procédons de la même manière pour chaque angle $\theta_{(i+1)} = \theta_i + 10$, et nous obtenons le tableau suivant :

Valeur de θ [°]	S_i [m ²]	η_i [m]	r_i [m]
10	21,2267	0,051	0,767
20	21,141	0,078	0,865
30	20,327	0,610	0,981

Valeur de θ [°]	Si [m ²]	η_i [m]	ri [m]
40	20,228	0,0568	1,094
50	21,39	0,009	1,152
60	21,55	0,02	1,12
70	21,36	0,002	1,088
80	21,46	0,014	1,08
90	21,52	0,103	0,808

Tableau 19: Surface de flottaison pour chaque angle

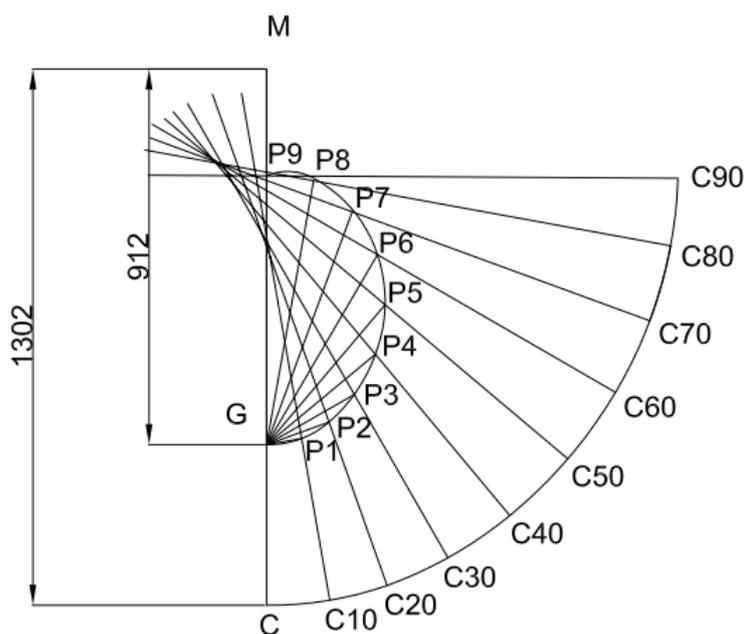


Figure 45: Diagramme polaire.

b) Moment de stabilité

Le moment de stabilité ou moment de redressement est le couple qui tend à ramener le navire à sa position verticale initiale, c'est-à-dire à une inclinaison $\theta = 0$.

Par définition : $M = P * d$

Tel que M : Moment de stabilité,

P : Poids du navire,

d : le bras de levier.

Or $d = (h - a) \sin \theta$

D'où finalement : $M = (h - a) \sin \theta$

Le tableau suivant met en évidence la valeur du bras de levier, de la hauteur métacentrique et du moment redressant pour chaque angle de gîte.

Angle de gîte θ [°]	Bras de levier d [m]	Hauteur métacentrique h [m]	Moment statique M [tm]
10	0,156	0,858	0,785
20	0,297	0,872	1,707
30	0,400	0,762	2,3
40	0,489	0,662	2,811
50	0,475	0,576	2,173
60	0,452	0,507	2,599
70	0,378	0,455	2,173
80	0,288	0,420	1,656
90	0,259	0,398	1,489

Tableau 20: Moment statique, bras de levier et hauteur métacentrique

c) Courbe de stabilité

La courbe de stabilité représente, pour chaque angle de gîte, la valeur du bras de levier de redressement ainsi que le moment statique pour cet angle.

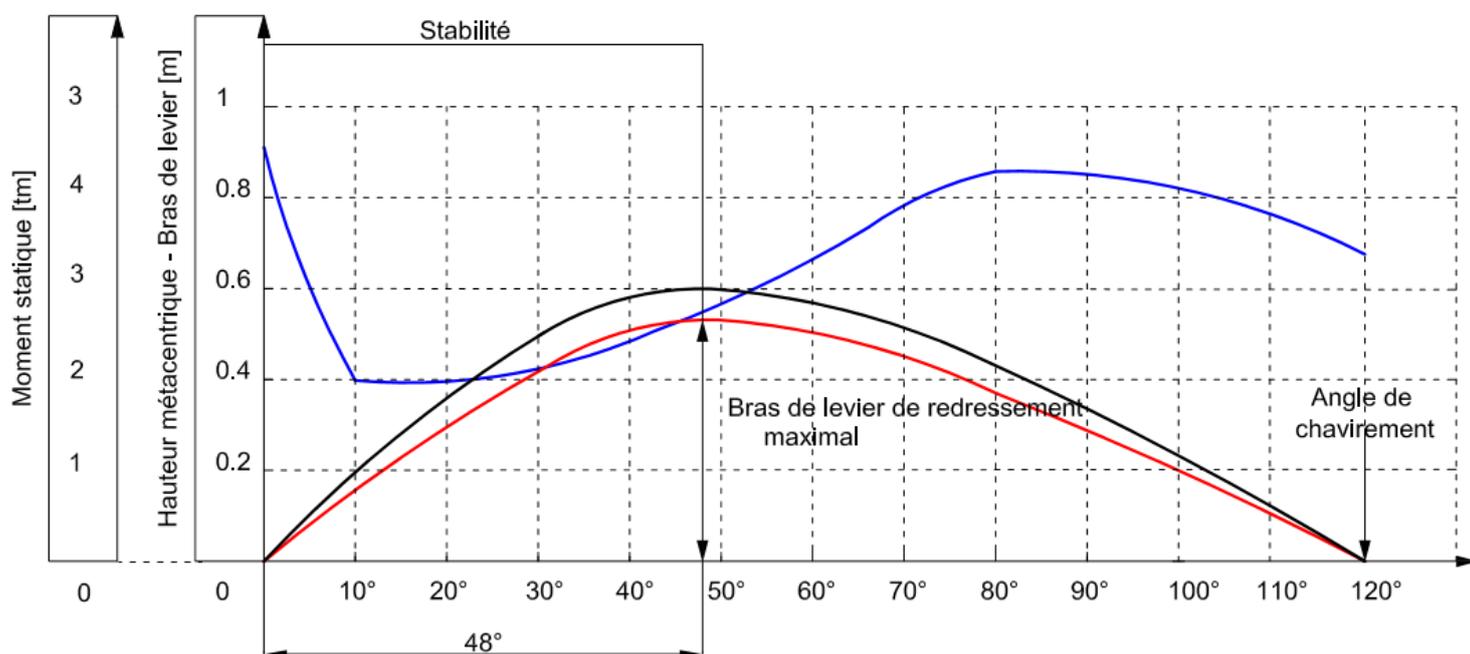


Figure 46: Courbe de stabilité.

Tel que :

- : Hauteur métacentrique [m]
- : Moment de redressement [tm]

— : Bras de levier [m]

Cette courbe met en évidence le point de chavirage, qui est le point où la courbe coupe l'axe horizontal. La courbe montre aussi le bras de levier de redressement maximal. Dans notre cas, le point de chavirage est de 120° et le bras de levier de redressement maximal se trouve à un angle de gîte de 48° . C'est l'angle limite de stabilité statique. Pour cette valeur de θ , le moment est maximal. Il est égal à $3,1 \text{ tm}$.

d) Angle critique de stabilité et valeur du moment de redressement

L'angle critique de stabilité dynamique est l'angle de gîte θ_c qui est égal à :

$$\theta_c = \frac{\theta_{max}}{2}$$

D'où $\theta_c = 24^\circ$.

Les valeurs se trouvant en dessous de cet angle, c'est-à-dire les angles entre 0° et 24° , sont ceux conseillés pour la vedette rapide.

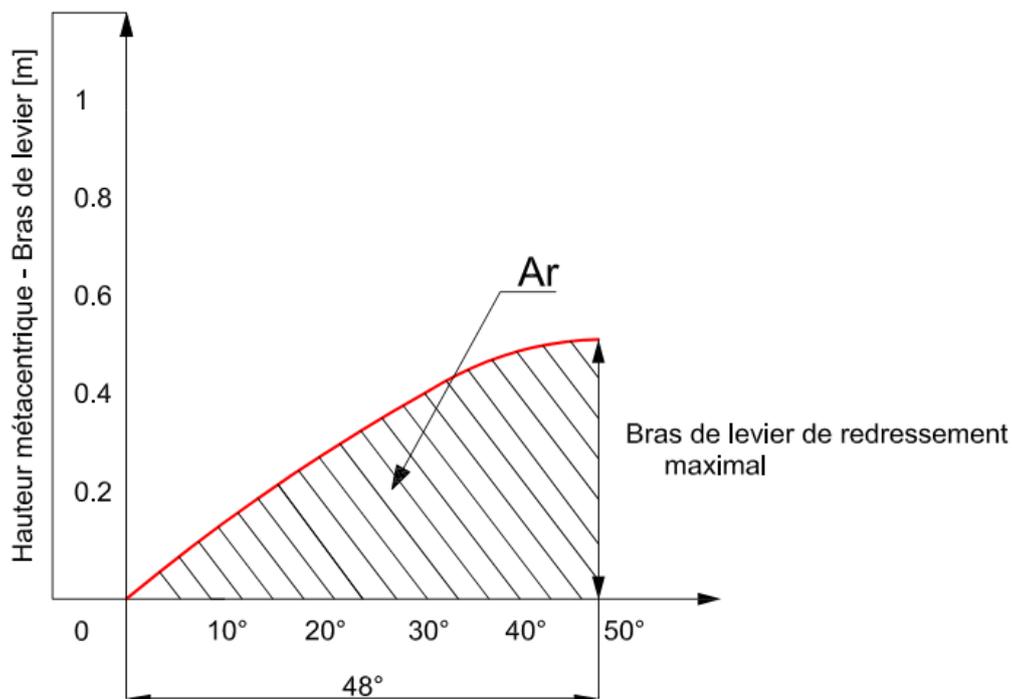


Figure 47: Moment redresseur.

La surface Ar délimitée par la courbe, le bras de levier de redressement et l'axe horizontal représente la valeur du moment redresseur Mr .

e) Travail du moment redresseur et du moment inclinant

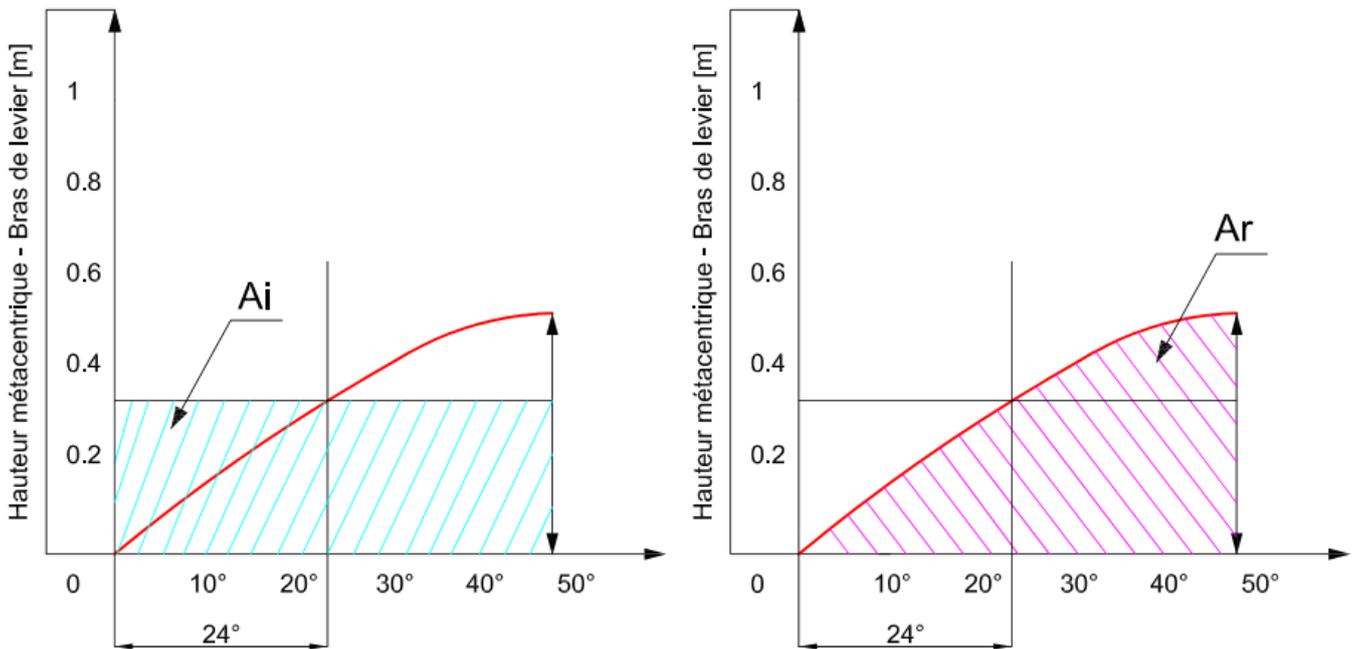


Figure 48: Valeur du moment redressant et du moment inclinant.

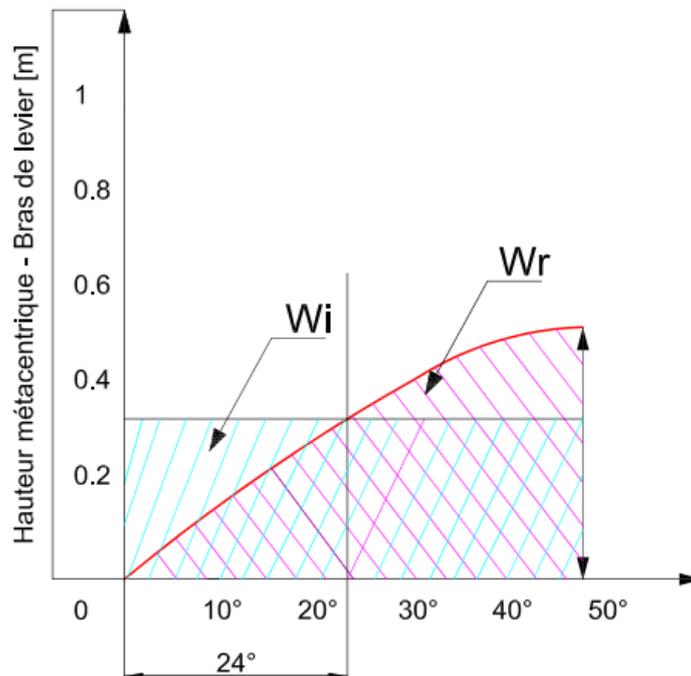


Figure 49: Moment de stabilité dynamique

L'aire hachurée en bleu représente la valeur du moment inclinant, tandis que celle en rose est celui du moment redresseur. Depuis la valeur critique de l'angle de gîte, on a pu déterminer le travail W_r du moment redresseur ainsi que le travail W_i du moment inclinant. Pour que le navire soit stable, il faut que $W_r = W_i$.

III-7 Echantillonnage de la structure et principes de construction

Avant de pouvoir naviguer, un navire professionnel doit être certifié par une société de classification internationale. De ce fait, les normes de construction doivent suivre celles que ces bureaux imposent. Dans notre cas, l'échantillonnage de la structure ainsi que les principes de construction suivent le règlement du bureau Veritas pour la classification des Navires.

III-7-1 Echantillonnage de la structure

a) Echantillonnage des bordés

Les épaisseurs minimales des bordés monolithiques ne doivent pas, en principe, être inférieures aux valeurs suivantes :

- $1,5\sqrt{L + 10}$: pour le bordé de fond et de bouchain,
- $1,25\sqrt{L + 10}$: le bordé de muraille,
- $\sqrt{L + 10}$: pour les autres bordés.

Des valeurs inférieures peuvent être acceptées sous réserve d'une étude justificative soumise à la Société.

Structure des fonds

- Structure des bordés de fond

La largeur du bordé de la quille plate, en mètre [m], ne doit pas être inférieure à $0,6 + 0,01L$.

- Structure du double fond
 - La hauteur du double fond ne doit pas être, en principe, inférieure à $0,1\sqrt{L}$.
 - Des carlingues latérales doivent être prévues. En principe, leur écartement ne doit pas dépasser 4,2 m.
 - Pour les navires inférieurs à 40 m dont les fonds sont raidis transversalement, des raidisseurs longitudinaux reliés aux varangues doivent être prévus entre les carlingues dans la région milieu du navire. L'écartement moyen entre les éléments longitudinaux ne doit pas dépasser 1,4 m.

Structure des murailles

La largeur du carreau, en mètre, ne doit pas être inférieure à $b = 0,715 + 0,425 \frac{L}{100}$

Structure des ponts

- Echantillonnage des bordés
 - Sauf indications contraires, l'épaisseur de la gouttière, en m, ne doit pas être inférieur à celle du bordé de pont adjacent.

- Lorsqu'une extrémité d'une longue superstructure se trouve à moins de 0,25 L de la perpendiculaire milieu, l'épaisseur de la gouttière doit être augmentée de 40% sur une longueur sensiblement égale au sixième de la longueur L du navire, de part et d'autre de l'extrémité, de la superstructure.
- Lorsqu'une extrémité d'une longue superstructure se trouve à plus de 0,25 L de la perpendiculaire milieu, l'épaisseur de la gouttière doit être augmenté de 30% sur une longueur sensiblement égale au sixième de la longueur du navire, de part et d'autre de l'extrémité et de la superstructure.
- Lorsqu'une extrémité d'une courte superstructure se trouve à plus de 0,3 L de la perpendiculaire milieu, l'épaisseur de la gouttière doit être augmenté de 15% sur une longueur sensiblement égale au sixième de la longueur du navire, de part et d'autre de l'extrémité et de la superstructure.

b) Echantillonnage des raidisseurs

- Pour l'échantillonnage d'une hiloire, sa portée l doit être mesurée :
 - ❖ entre cloisons transversales, si l'hiloire peut être considérée comme porteuse, c'est-à-dire, si sa hauteur est au moins 1,5 fois celle des barrots sur l'axe,
 - ❖ entre barrots, si l'hiloire est intercostale et ne sert qu'à prévenir le déversement des barrots.
- Pour l'échantillonnage d'un barrot, sa portée l doit être mesurée :
 - ❖ de muraille à muraille, s'il n'existe pas d'hiloirs pouvant être considérées comme porteuses ou de cloisons longitudinales,
 - ❖ de muraille à cloison, de muraille à hiloire, de cloison à cloison ou d'hiloire à hiloire, s'il existe des cloisons longitudinales ou des hiloirs dont l'échantillonnage et la portée sont tels que l'on puisse les considérer comme porteuses.

 Cloisons

- Dispositions générales

En cas de double fond, des varangues doivent être prévues en dessous de chaque cloison transversale plane.

- Echantillonnage des bordés

L'échantillonnage des bordés doit être déterminé conformément aux articles 11-052 et 11-053.

Superstructures et roufles

- Echantillonnage des bordés

L'échantillonnage des bordés doit être déterminé conformément aux articles 11-052 et 11-053.

- Echantillonnage des raidisseurs
 - ❖ L'échantillonnage des raidisseurs doit être déterminé conformément à l'article 11-054, en tenant compte des prescriptions 11-059-42 à 11-059-45.
 - ❖ L'échantillonnage des raidisseurs des parois des superstructures et des roufles peut ne pas dépasser celui des raidisseurs de parois de l'étage immédiatement en dessous, en tenant compte des écartement et portées respectifs.

III-7-2 Principes de construction

a) Dispositions générales

- En règle générale, l'écartement des couples ne doit pas dépasser :
 - ❖ 0,61 m en avant de la cloison d'abordage et en arrière de la cloison de presse-étoupe,
 - ❖ 0,70 m au droit de la région comprise entre la cloison d'abordage et 0,2L en arrière de la perpendiculaire avant.
- Les cloisons et autres renforts importants doivent être fixés à la structure adjacente par cornière de part et d'autre du montage équivalent.

La masse au m² du stratifié formant chaque cornière ne doit pas être inférieure à 50% de la masse du plus léger des deux éléments à assembler, ni à 900g/ m² de mat ou équivalent.

De plus la largeur des semelles de cornières doit être réalisée selon les principes donnés par la figure 11-06-I du règlement.

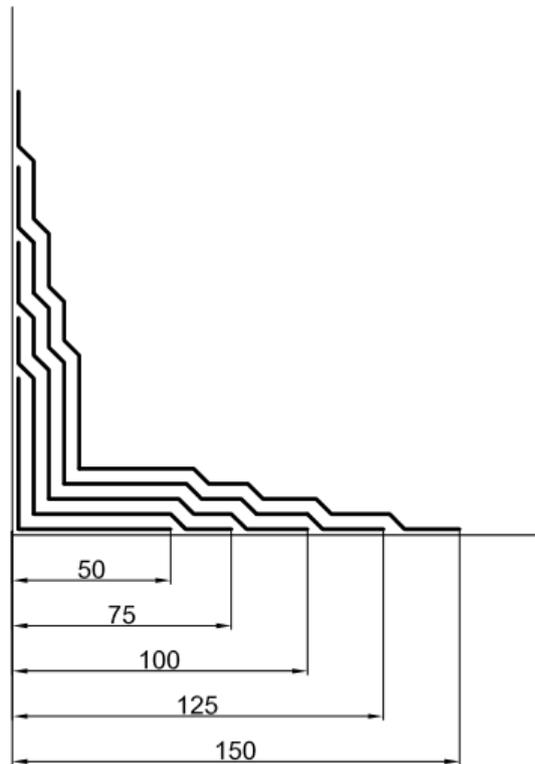


Figure 11-06-I

b) Bordés

- Liaison Pont-coque

- ❖ Cette liaison doit être étudiée vis-à-vis de la flexion représentée sur la figure 11-06-IV, due aux charges verticales sur pont et aux charges horizontales sur bordé, et vis-à-vis du cisaillement dû à la flexion longitudinale.
- ❖ En principe, la liaison doit prévenir un décollement éventuel dû à la flexion locale et assurer la continuité longitudinale. Son épaisseur doit être suffisante pour que les contraintes de cisaillement soient acceptables.

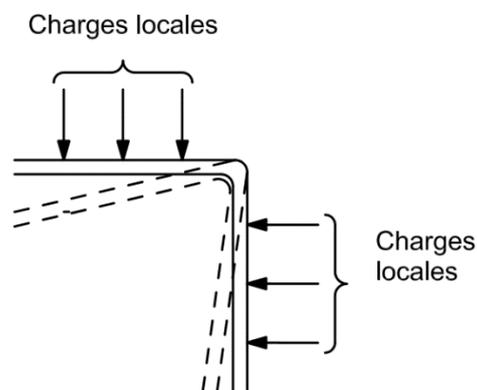


Figure 11-06-IV

- ❖ Les figures 11-06-V à 11-06-VIII donnent des exemples de liaisons pont-coque possibles :

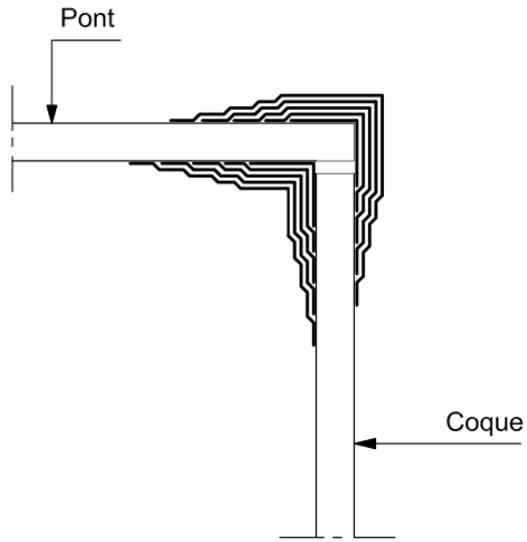


Figure 11-06-V

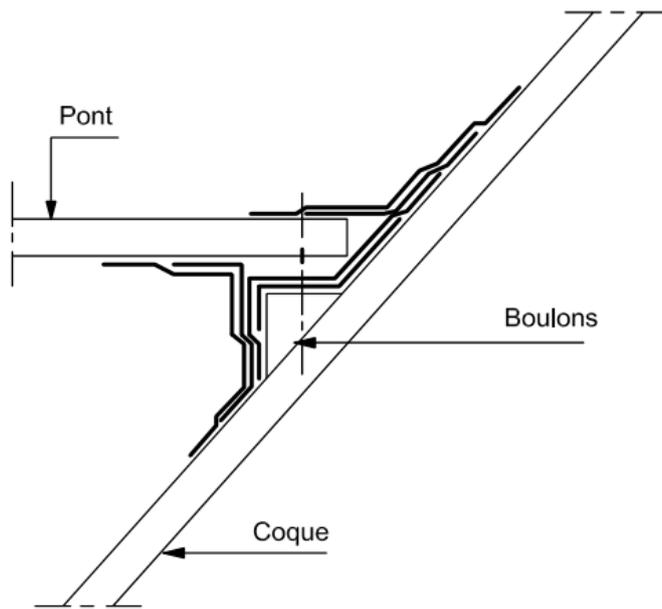


Figure 11-06-VI

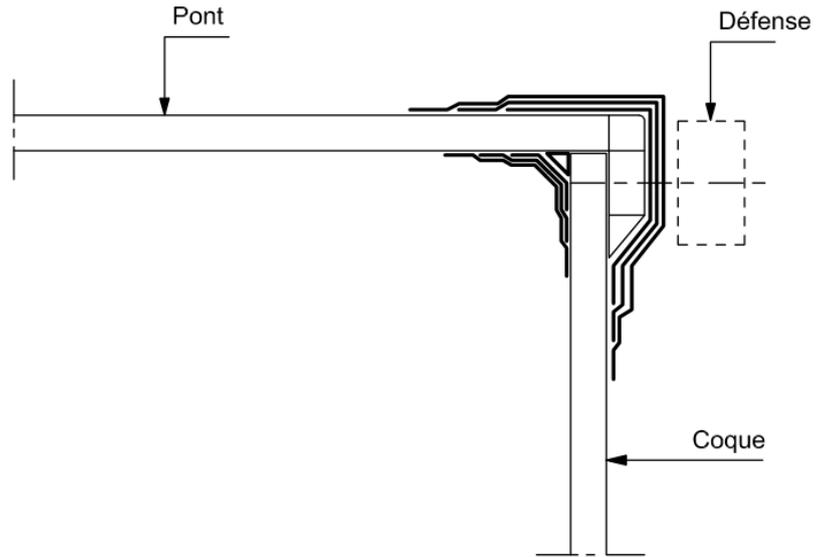


Figure 11-06-VII

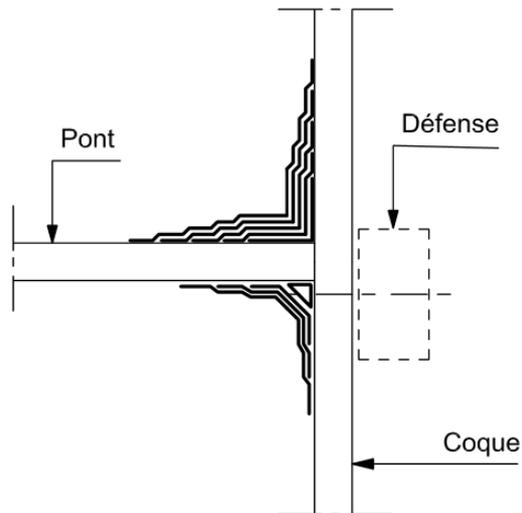


Figure 11-06-VIII

c) Liaison cloison-coque

- ❖ Dans certains cas, cette liaison doit être réalisée de manière à répartir, sur une longueur de coque suffisante, l'effort local exercé par la cloison. Les figures 11-06-IX et 11-06-X donnent des solutions possibles. L'échantillonnage des cornières est déterminé en fonction des charges sollicitant la liaison.

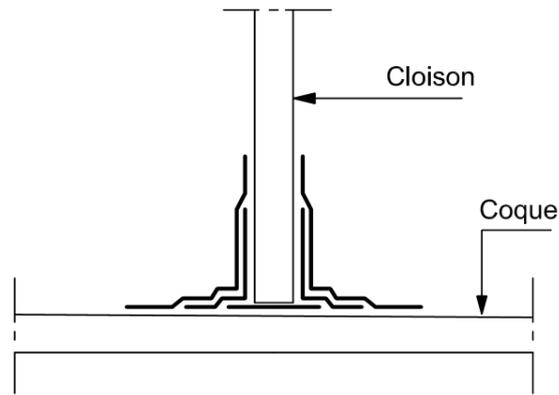


Figure 11-06-IX

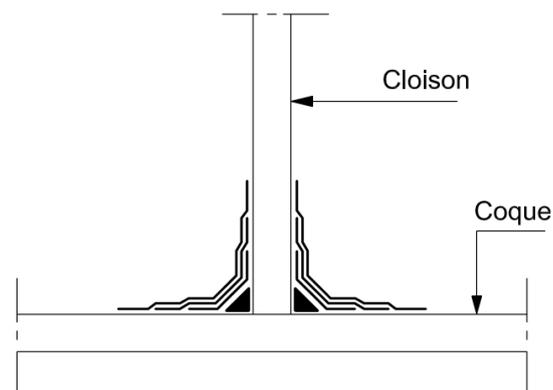


Figure 11-06-X

- ❖ Le chantier doit porter une attention particulière aux liaisons des cloisons de caisses à liquide intégrées avec la structure.

III- 8 Conclusion

Cette partie nous a permis d'effectuer les études scientifiques ainsi que les calculs nécessaires pour la construction d'un bateau en PRVT, afin de vérifier les données dans le cahier des charges. Dans la dernière partie, nous allons aborder l'étude d'impact environnemental et la rentabilité économique.

PARTIE 4 : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET RENTABILITE ECONOMIQUE

IV -1 ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

IV -1- 1 Introduction

Un projet doit être en harmonie avec l'environnement où il est implanté, d'où la nécessité de faire une étude d'impacts environnementaux. Ce dernier est un outil de référence permettant de mieux identifier les enjeux environnementaux que nous faisons face lors de la réalisation d'un projet. C'est aussi un outil de prise de décision face aux impacts potentiels ou effets des actions d'un projet. Ces impacts peuvent être positifs donc à maximiser, ou négatifs donc à minimiser.

IV -1-2 Les différentes étapes de l'étude d'impacts environnementaux

Cette étude ne s'arrête pas à l'analyse de l'environnement naturel mais intègre aussi des dimensions sociales et économiques.

a) Le contexte du projet

Le projet en question, ou la conception de la vedette rapide, sera destiné pour le transport des autorités locales. Ils vont apporter leurs soutiens moraux et matériels aux habitants de la région concernée, surtout après les catastrophes naturelles. De ce fait, la vedette transportera en plus de ses passagers des vivres et des médicaments destinés à cet effet.

Le projet dans sa totalité est la création d'une flotte formée par trois bateaux dont la vedette rapide en fait partie. La vedette sera classifiée dans la catégorie de bateau de plaisance.

Le choix de la voie maritime est plus judicieux par rapport à celui de la voie terrestre vue l'état actuel et parfois même l'absence de routes dans quelques régions de notre île. Comparée à la voie aérienne, la voie maritime est plus économique.

b) Le milieu récepteur

Le milieu récepteur du projet est la partie Ouest de Madagascar, entre la ville la ville de Morondava (latitude : 20°17'19" Sud, longitude : 44°19'04" Est), et la ville d'Antsiranana (latitude 12° 16' 00" Sud, longitude en degrés 49° 17' 00" Est) comme nous l'avons déjà vu dans le cahier des charges. La voie d'accès sera donc le canal de Mozambique.

c) Description et analyse des variantes du projet

Dans ce projet, l'utilisation du matériau composite, plus précisément le Polyester Renforcé de Verre textile, en tant que matériau de construction navale a été mise en valeur. En effet, ce matériau a révolutionné le domaine du nautisme car elle permet de construire une large variété de navire et de créer des embarcations dont la seule limite est l'imagination. Le tableau suivant nous donnera les points importants concernant les matériaux de construction navale.

Matériaux de construction	Recyclage	Points forts	Points faibles
Aluminium	Facilement recyclable	-Légèreté (2,7 t/m ³) -Facilité de réparation -Fort allongement à la rupture : $1 < \Delta\%(\text{Alu}) < 20$	-La transformation de la bauxite (minerais d'aluminium) en aluminium consomme une très grande quantité d'énergie électrique -Problème d'électrolyse
Acier	Presque entièrement recyclable	-Résistance à la rupture élevée -Dureté	-Résiste mal à la corrosion. -Très lourd (jusqu'à 9 t/m ³) donc consomme plus de carburant.
Bois	Recyclable	-Ressource renouvelable (forêt) -Très léger (Ex : le teck a une masse volumique de 0,86t/m ³) surtout le contreplaqué	-temps de main d'œuvre important : d'où le coût est élevé. -Exploitation de forêts de manière non durable
Composite	Non recyclable	-Coût peu élevé -Léger : 2,5 t/m ³ à 2,6 t/m ³ -Maintenance faible -Malléable, facile à modifier	-Dépend de la disponibilité en pétrole, résine, et en fibre de verre.

Tableau 21: Description des matériaux de construction navale

Bref, tous les matériaux de construction ont des avantages et des inconvénients, mais le PRVT a été choisi parmi ces matériaux de construction pour les nombreux atouts du côté mécanique qu'il possède. Il est assez rigide pour supporter la force houlomotrice des vagues et assez léger pour permettre au bateau d'atteindre une vitesse élevée.

d) Analyse de l'impact de la variante retenue : le PRVT et l'environnement

➤ Les différentes sources de pollution marine

Avant d'entamer la relation entre le PRVT et l'environnement, il est d'abord utile de connaître quelles sont les différentes sources de la pollution marine. Le tableau suivant nous donnera les pourcentages de ces différentes sources.

Source de pollution marine	Pourcentage
Déversement d'origine terrestre	44%
Rejets atmosphériques	33%
Transport maritime	12%
Rejet en mer	10%
Exploration et exploitation pétrolière	1%

Tableau 22: Les diverses sources de pollution marine

Il est alors clair qu'une grande partie de la pollution marine provient d'activités humaines terrestres (eaux usées, hydrocarbures, produits chimiques, rejets industriels,...). Le transport maritime quant à lui représente moins de danger, mais qui n'est pas à négliger pour autant, à savoir le transport des hydrocarbures, les activités portuaires, les accidents tels que les marées noires, les dégazages et autres rejets, et la navigation de plaisance. Il n'est donc pas déraisonnable de conclure que la navigation de plaisance ne représente qu'une part mineure des 12%.

➤ Les impacts sur l'environnement de la conception de bateau en fibre de verre

Les matériaux composites sont difficilement et même rarement recyclables. Cette contrainte va à l'encontre du développement durable. Les principaux impacts de ce type de matériau sur l'environnement sont :

❖ L'émission des COV ou Composés Organiques Volatils

La famille des composés organiques volatils regroupe plusieurs milliers de composés (les hydrocarbures tels que le butane, le propane, l'éthanol, l'acétone, les solvants, ...) aux caractéristiques très variables. Ce sont des gaz et des vapeurs qui contiennent au moins un atome de carbone. Les origines des COV sont :

- **la combustion de gaz**, du bois et du charbon et l'émission à l'échappement et à l'évaporation de carburant dans le transport,

- les procédés industriels : tels que le raffinage, le stockage et la distribution des carburants,
- l'agriculture sylvicole par l'émissions directes de la végétation : terpènes, isoprènes des conifères et feuillus,
- **les produits de construction et décoration** comme les revêtements de sol et de mur, les faux plafonds, le bois aggloméré, la mousse urée-formol,
- **les activités d'entretien et de bricolage et de construction** comme l'utilisation de solvants, des boules de naphthaline, des désodorisants, des peintures, des colles...
- **les sources diverses** : on peut citer la fumée de tabac (la nicotine, le 3-éthénylpyridine), les photocopieuses, les humidificateurs d'air... .

En ce qui concerne notre cas, ces composés sont libérés dans l'atmosphère lors de l'utilisation des solvants pendant de la stratification des matériaux composites. En effet, ces solvants se trouvent en grande partie dans les vernis, les peintures et le gelcoat qui sont utilisés lors de la construction.

Ils se propagent assez rapidement à cause de leur volatilité et ont un impact direct sur la santé. Certains sont toxiques ou cancérigènes, et d'autres peuvent entraîner des problèmes respiratoires ou de irritations cutanées diverses. Les COV sont également responsables de la destruction d'ozone stratosphérique, et peuvent avoir une action directe sur les peuplements végétaux et sur les populations animales (mutations génétiques...).

❖ L'émission de gaz carbonique ou CO₂

Le gaz carbonique ou CO₂ est un gaz à effet de serre. Il est l'un des responsables du réchauffement climatique qui est un problème majeur de l'environnement. On ne peut pas lier directement l'émission de gaz carbonique à la construction de bateau en PRVT. Mais on peut dire que le transport maritime a une part de responsabilité dans le dégagement de ce gaz, c'est-à-dire qu'il en est le fruit. Toutefois, les bateaux sont les moyens de transports les moins polluants même si 90% du commerce mondiale s'effectue par voie maritime. Ils ont une valeur d'émission de CO₂ d'environ 40g/km. Cette valeur est assez faible comparée avec celle de l'avion qui se trouve entre 110g/km et 360g/km, ou encore celle des voitures comprise entre 110g/km et 618g/km (voitures camions).

e) Gestion des risques d'accident technologique

La construction navale est un secteur d'activité présentant de hauts risques d'accidents. Le personnel doit être au courant et conscient des risques encourus dans un chantier naval.

❖ Les risques

Les risques d'accident sur un chantier naval sont nombreux. La liste suivante nous donne un aperçu sur les risques les plus fréquents.

- La résine chimique issue du pétrole est toxique et inflammable, d'où l'importance des considérations de sécurité lorsque l'on travaille avec ce matériau.
- Le risque d'inhalation de COV est assez élevé, surtout quand on n'utilise pas le procédé des moules fermés.
- Les gaz d'isocyanate libérés par la mousse en polyuréthane lors de sa polymérisation sont nocifs pour la santé s'ils sont inhalés.
- Les pièces en construction navale sont des fois de grandes dimensions, ce qui rend leur déplacement et manipulation difficiles. Cela peut entraîner des accidents causant de blessures graves ou même la mort.
- Les câbles électriques présentent un risque majeur dans le cas où ils sont en mauvais états car les produits utilisés pour la construction des bateaux en PRVT sont hautement inflammables, d'où il y a un risque d'incendie.

❖ Les mesures de sécurité

Garantir la sécurité des employés doit être la priorité pour chaque chantier naval. Les plus importants consignes de sécurité sont les suivants :

- une bonne ventilation est nécessaire pour maintenir les niveaux de particules volatiles, de fumées dangereuses et de poussière à un niveau acceptable, surtout lorsqu'on manipule de la résine polyester, du styrène et de l'acétone,
- Les employés doivent chacun être muni des équipements pour assurer sa sécurité personnelle : lunettes étanches pour la protection des yeux, casque anti-bruit pour préserver l'audition et masque anti-poussière pour protéger les poumons durant les opérations comme le meulage ou la manipulation des résines.
- L'utilisation des gants à manches longues pour appliquer la résine est conseillée.
- Il faut éviter le contact direct avec des solvants comme le styrène et l'acétone car ils peuvent être absorbés à travers la peau et pénétrer dans la circulation sanguine.
- Il devrait être interdit de fumer et de faire des feux dans un chantier naval pour éviter les risques d'incendies.

f) Solutions proposées

Pour faire face aux problèmes d'ordre environnemental, on se propose d'étudier deux types de solutions : des solutions au niveau de la technologie de construction en PRVT, et des solutions à long terme pour le transport maritime en général.

❖ Les solutions au niveau de la technologie de construction

Les solutions suivantes sont préconisées dans le but de protéger toute personne manipulant le PRVT comme matériaux de construction et de réduire les impacts que cette technologie peut avoir sur l'environnement.

- Les constructions en moule fermé

Ce type de moulage réduit le risque d'inhalation des COV et réduit le contact avec des produits potentiellement toxiques.

- L'écologisation des matières premières :

Les fibres naturelles, comme le chanvre, commencent à gagner du terrain même si leurs propriétés physiques sont assez faibles, elles peuvent être utilisées pour des fonctions de remplissage. Cela permettra au moins la réduction de l'utilisation des fibres synthétiques car les fibres naturelles sont biodégradables.

Plus récemment, les bio-résines ont commencé à apparaître sur le marché mais leur utilisation reste très limitée dans l'industrie nautique. En plus de leurs avantages environnementaux en fin de vie du bateau, les bio-résines réduisent la dépendance à la ressource pétrole. Par exemple, le propylène-glycol issu de la bio-glycérine, un produit dérivé de la production de biodiesel, peut être utilisé comme matière première de base dans les résines polyester.

- La réduction de la pollution sonore

La quasi-suppression des nuisances liées aux bruits des moteurs est possible avec l'utilisation de moteur électrique. Cela réduira aussi les vibrations.

❖ Les solutions à long terme pour le transport maritime

Dans le secteur du transport maritime, la notion de préservation de l'environnement aboutit au concept de développement durable. Le développement durable est, par définition, un développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs : donc on parle ici de solution à long terme. Bien que cela semble encore assez difficile, l'une des plus grandes solutions est de réduire la consommation en carburants, et même de changer les sources d'énergies actuelles pour adopter

des sources d'énergies propres et renouvelables. On parle ici de l'utilisation d'énergie photovoltaïque et d'énergie électrique. Par exemple, la société Naviwatt construit des embarcations à propulsion électrique et à énergies renouvelables ; le seul défi dans ce domaine reste le système de stockage d'énergie car le bateau doit emmagasiner assez d'énergie pour pouvoir naviguer même par temps couvert.

IV -2 RENTABILITE ECONOMIQUE

L'étude économique est une partie d'étude importante pour envisager le coût du projet de construction d'un bateau.

IV -2-1 Coût des matières premières

Le tableau suivant nous montre le coût des matières premières nécessaires pour la construction de notre Yacht de 13. 65 m.

Matières	Surface [m2]	Quantité [Kg]	Prix Unitaire	Prix total [Ar]
Gelcoat	124,831	202,346	33030	6683488,38
Mat 300	293,381	163,488	11010	1800002,88
Mat 450	293,381	143,46	10349	1484667,54
Roving 800	22,108	27,95	14166,2	395945,29
Roving 600	267,645	158,896	13946	2215963,62
Mousse		185,647	30000	5569410
Total				18149477,7

Tableau 23: Coût des matières premières

IV –2-2 Rentabilité du projet

La construction en PRVT est à faible coût de production par rapport à ceux construits par d'autres matériaux (acier, aluminium, etc.) : sa durée de mise en œuvre (soit environ 2 mois) ne nécessite généralement pas de technologie sophistiquée mais plus penchée vers un côté artisanal qui demande ainsi une compétence personnelle des ouvriers.

La rentabilité de ce projet se base sur la fiabilité et la qualité du bateau : un poids moindre avec une facilité d'entretien périodique et une durée de fonctionnement assez longue attirent de temps en temps le secteur de la pêche.

IV-3 Conclusion

Plusieurs paramètres sont à tenir en compte dans la construction d'un bateau. Chaque détail peut avoir une retombée sur le domaine économique et/ou environnemental. Le tout est donc de savoir réunir le respect de l'environnement, la faisabilité technique et la maîtrise du coût tout en veillant à satisfaire les besoins du client.

CONCLUSION GENERALE

En guise de conclusion, ce mémoire a revêtu le thème « CONSTRUCTION D'UN YACHT DE 13.65 m EN PRVT » dont son objectif est de transporter des représentants étatiques dans le but d'apporter leurs aides et soutiens aux habitants de cet axe lors des cataclysmes naturels tels que les cyclones. Sur ce, pour assurer la sécurité du yacht ainsi que les équipements il est nécessaire de calculer sa stabilité et sa flottabilité. D'après nos calculs et notre démarche scientifique ainsi qu'en tenant compte de l'hypothèse dans le cahier de charge on peut dire que notre Yacht est stable et sur.

Le passage de la construction traditionnelle en bois vers des techniques de construction moins conventionnelles ou des matériaux différents tels que le PRVT est rentable car le PRVT possède un poids léger et une durée de vie longue. De plus, malgré ses dimensions le Yacht est plus léger due à l'utilisation de ce matériau de construction.

Le risque de dégradation de l'environnement pour l'utilisation du PRVT est encore faible car la technologie de mise en œuvre et l'utilisation d'un tel matériau ne produit pas assez d'élément polluant comme le CO₂.

La rareté et le coût croissants de bois résistant ou d'autres matières premières comme l'acier, l'aluminium etc. pour la construction de bateaux ont affecté la construction navale. Sur ce, l'utilisation du PRVT pour produire un bateau comme le nôtre est bénéfique. La technique d'utilisation de moule pour produire de bateau est plus que rentable parce que cette méthode de construction emploie une main d'œuvre réduite.

Bref, la construction en PRVT est largement répandue dans divers pays, et surtout pour les bateaux de plaisance, d'après ces études techniques l'utilisation de ce matériau composite nous propose un grand avenir pour le développement de l'industrie nautique à Madagascar.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hussein RAMMAL, «*Conception et étude d'un bateau trimaran* », Mémoire d'ingénieur CNAM.
- [2] Dr. Ashish Diwanji, «*renforcement en fibre de verre guide de résistance chimique* », mars 2011.
- [3] CertainTeed Corporation, «*Isolants en fibre de verre pour bâtiments*», Code N° 30-26-029/.
- [4] L. Kenny, «*Fibre de verre en filament continu* ».
- [5] Rui Pedro Carreira, «*Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs*», Decathlon.
- [6] Akzo Nobel, «*l'osmose, Gelshield plus et produits associés*», International Peinture SA.
- [7] Cray Valley, «*le vieillissement des gel-coats polyester*», Total 2003.
- [8] CMS, «*Guide du stratifieur*».
- [9] Alcan marine, «*la tenue à la corrosion de l'Aluminium en milieu marin*», Juin 2003.
- [10] Musée nationale de la marine, Service culturel, «*la construction navale en bois aux XVII et XVIII siècles*», Paris 2005.
- [11] Eric A. Ogden et Jules Malrieux & D.R., «*la construction en alliage d'aluminium*».
- [12] Dr Boubakar, «*Matériaux composites*», AU. 2010-2011.
- [13] A. RASKIN., «*les résines composites*», Societe Francophone de Biomateriaux Dentaires, 2009-2010.
- [14] Thomas Fetzberger et Carola Kuhrau, «*propulsion de navires*», Revue ABB Industrietechnik 1997.
- [15] Eric A. Ogden et Jules Malrieux & D.R., «*Transmissions : Embases, waterjets et hélices de surface*».
- [16] Documents J-Y/pop-pop/moteur pop-pop, «*Propulsion d'un bateau par moteur pop-pop*», 26 mars 2005.
- [17] Philippe LOUSSOUARN, «*commande de z-drive sur 360° a micro-contrôleur pic pour radio-commande*».
- [18] Eric A. Ogden et Jules Malrieux & D.R., «*les principes de l'architecture navale*».

- [19] B. Piton, J-H Pointeau et J-S Ngoumbi., «*Atlas hydrologique du canal de Mozambique*», Paris 1981.
- [20] Republique de Madagascar ministere de l'eau «*etude de faisabilite des forages manuels identification des zone potentiellement favorables*».
- [21] Reymond, architecte et expert naval chargé de cours CEPM «*résumé à l'attention des constructeurs de bateaux*», 2006-2008.
- [22] Dominique Lavoille «*étude sur la flottabilité et la stabilité du navire*».
- [23] Francois Vivier, Architecte navale «*Koulmig 23*».
- [24] Bureau Veritas «*Règlement pour la classification des navires*» Ref. NR 220 DNC RO2 F Mars 1996.
- [25] J. SANS «*Stabilité d'un navire*» 26-11-2010.
- [26] Confédération Européenne des Industries Nautiques «*l'impact environnemental du nautisme*» Juin 2009 - seconde édition.
- [27] Réseau Environnement Humanitaire «*L'Etude d'Impact Environnemental*» Réunion du réseau : Janvier 2014.
- [28] P.M Guineheuc, C. Saint-Martin «*l'évaluation des impacts environnementaux*» septembre - octobre 2008.
- [29] P.Boucher «*Mots et expressions du vocabulaire marin* » 2000.
- [30] C.A.R.M.A «*Glossaire des materiaux composites renforces de fibres d'origine renouvelable* », Actualisation Decembre 2006.
- [31] G.T.C.C.N «*l'industrie de la construction navale : problème d'environnement et de changement climatique* », novembre 2010.

WEBOGRAPHIE

- [1] <http://www.culture-maritime.com>.
- [2] http://fr.hellokids.com/c_15128/lecture/reportages-pour-enfant/reportages-sur-des-themes-varies/differentes-sortes-de-bateaux.
- [3] <http://fr.discoverboating.ca>.
- [4] <http://jean.dahec.free.fr>.
- [5] <http://www.fao.org/3/a-t0530f/T0530F08.htm>.
- [6] <https://www.allboatsavenue.com>.
- [7] www.jph-lamotte.fr
- [8] <https://fr.deere.ca>
- [9] <https://cartebateau.com>
- [10] www.annumada.com
- [11] <http://internetcouncil.canalblog.com>
- [12] <http://www.bateaux-essais.com>
- [13] <http://www.connaissancedesenergies.org>
- [14] <http://www.moteurboat.com>
- [15] <http://www.meretmarine.com/fr>
- [16] <http://physio-geo.revues.org>
- [17] <http://www.persee.fr>
- [18] <https://www.windfinder.com>
- [19] <http://flottabilite-tpe-sainteanne.e-monsite.com>
- [20] <https://www.tc.gc.ca/fra/menu.htm>

ANNEXES

Annexe 1 : ECHELLE DE BEAUFORT ET ETAT DE LA MER

L'**échelle de Beaufort** est une échelle de mesure empirique, comportant 13 degrés (de 0 à 12), de la vitesse moyenne du vent sur une durée de dix minutes utilisée dans les milieux maritimes. Le degré Beaufort correspond à la vitesse moyenne du vent. Si cette vitesse peut être mesurée avec une bonne précision à l'aide d'un anémomètre, il est commode, en mer, d'estimer cette vitesse par la seule observation des effets du vent sur la surface de la mer.

Tableau d'équivalence entre les différentes unités de mesure du vent

Force	Nom	Symbole	Vitesse en nœuds	Vitesse en km/h	État de la mer	Effets à terre
0	<i>Calme</i>		moins de 1	moins de 1	La mer est comme un miroir.	La fumée monte verticalement. Les feuilles des arbres ne témoignent aucun mouvement.
1	<i>Très légère brise</i>		1 à 3	1 à 5	Quelques rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans aucune écume.	La fumée indique la direction du vent. Les girouettes ne s'orientent pas.
2	<i>Légère brise</i>		4 à 6	6 à 11	Vaguelettes ne déferlant pas.	On sent le vent sur le visage. Les feuilles s'agitent. Les girouettes s'orientent.

3	<i>Petite brise</i>		7 à 10	12 à 19	Très petites vagues. Les crêtes commencent à déferler. Écume d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars.	Les drapeaux flottent au vent. Les feuilles sont sans cesse en mouvement.
4	<i>Jolie brise</i>		11 à 16	20 à 28	Petites vagues, de nombreux moutons.	Les poussières s'envolent. Les petites branches plient.
5	<i>Bonne brise</i>		17 à 21	29 à 38	Vagues modérées, moutons, éventuellement embruns.	Le tronc des arbustes et arbrisseaux en feuilles balance. La cime de tous les arbres est agitée. Des vaguelettes se forment sur les eaux intérieures.
6	<i>Vent frais</i>		22 à 27	39 à 49	Crêtes d'écume blanches, lames, embruns.	On entend siffler le vent. Les branches de large diamètre s'agitent. Les parapluies sont susceptibles de se retourner.
7	<i>Grand frais</i>		28 à 33	50 à 61	Trainées d'écume, lames déferlantes.	Tous les arbres balancent. La marche contre le vent

						peut devenir difficile.
8	<i>Coup de vent</i>		34 à 40	62 à 74	Tourbillons d'écumes à la crête des lames, trainées d'écume.	Les branches sont susceptibles de casser. La marche contre le vent est presque impossible.
9	<i>Fort coup de vent</i>		41 à 47	75 à 88	Lames déferlantes grosses à énormes, visibilité réduite par les embruns.	Le vent peut légèrement endommager les bâtiments : envols de tuiles, d'ardoises, chutes de cheminées.
10	<i>Tempête</i>		48 à 55	89 à 102	Très grosses lames à longue crête en panache. Le déferlement en rouleaux devient intense et brutal. Visibilité réduite.	Dégâts importants aux bâtiments. Les toits sont susceptibles de s'envoler. Certains arbres sont déracinés.
11	<i>Violente tempête</i>		56 à 63	103 à 117	Les navires petits et moyens peuvent, par instant, être perdus de vue. La mer est complètement recouverte de bancs d'écume	Ravages étendus et importants.

					blanche. Visibilité réduite.	
12	Ouragan		égal ou supérieur à 64	supérieur à 118	L'air est plein d'écume et d'embruns. La mer est entièrement blanche du fait des bancs d'écume. Visibilité fortement réduite.	Dégâts très importants de l'ordre de la catastrophe naturelle.

Annexe 2 : LES DIFFERENTES PARTIES D'UN NAVIRE

- Définitions

La proue : c'est la partie avant du bateau.

La poupe : c'est la partie arrière du navire.

Le pont : plancher du navire dans les divers étages du navire qui préserve l'intérieur des eaux et de la pluie.

Le plat-bord : bordage horizontal qui recouvre la tête des allonges des couples, tout autour d'un navire.

Les murailles : parties droites de la coque du navire qui s'étendent verticalement, entre l'avant et l'arrière, de la flottaison jusqu'au plat-bord de chaque côté.

Le bordé : ensemble des bordages qui recouvrent les couples et qui constituent le revêtement extérieur de la coque du navire.

La coque : corps du navire formé par les murailles.

La carène : partie immergée de la coque.

L'étrave: pièce courbante et saillante de construction, de même largeur que la quille.

Le franc-bord : hauteur de bordé du navire depuis la quille jusqu'à la préceinte.

Tribord : partie droite du navire si l'on est face à la proue.

Bâbord : partie gauche du navire si l'on est face à la proue.

Les figures suivantes montrent les diverses parties d'un navire :

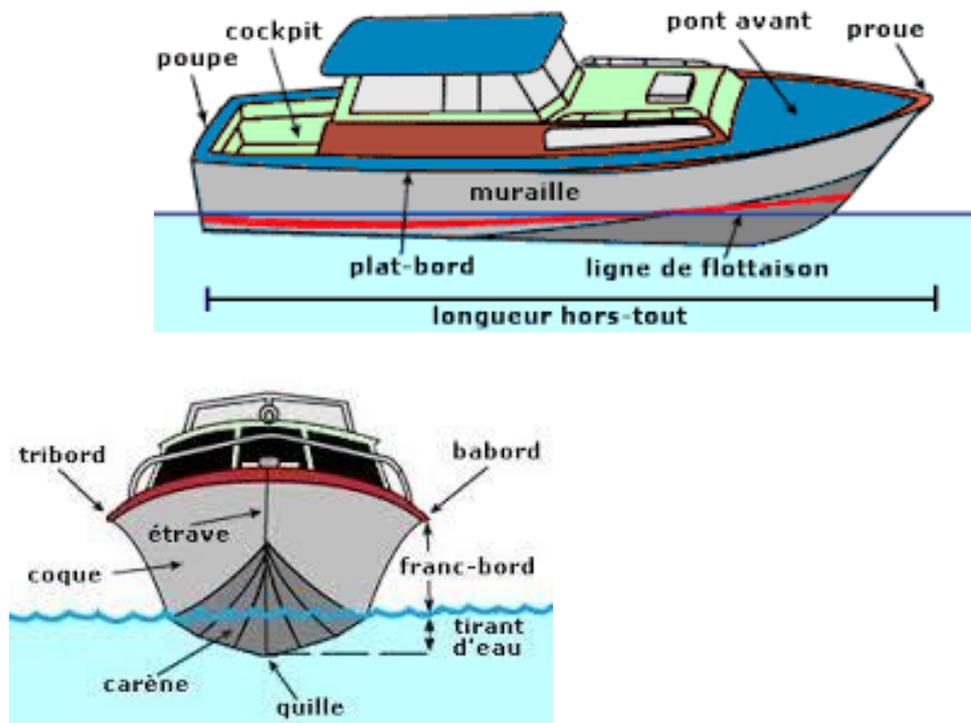


Figure : Les diverses parties du navire.

FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Nom : RASAMOELA

Prénom : Tolojanahary Ravakiniaina

Adresse: Lot 0910 B 152 Mahafaly Vatofotsy Antsirabe 110

Contact : 034 19 901 19

E-mail : *ravakiniainarasamoela@gmail.com*

Titre du mémoire :

« *CONCEPTION D'UN YACHT DE 13.65 m EN PRVT* »

Nombre de page :

Nombre de tableaux :

Nombre de figures :

Mots clés : Fibres de verre, PRVT, Yacht, matériaux composites, conception, flottabilité, stabilité, rentabilité, sécurité.

Directeur de mémoire :

Monsieur RATSARAZAKA Michel, Architecte Naval,

Monsieur JEAN GUY Gabriel, Directeur Technique de la POLYMA.

RESUME

Ce mémoire décrit la construction d'un Yacht de 13,65 m en PRVT. Le choix d'utilisation de ce matériau composite nécessite une forte analyse pour que le projet soit rentable et pour que le bateau en question accomplisse sa mission. De plus, la sécurité du bateau et des équipements doit être respectée afin que la construction suive les normes internationales selon le Bureau Veritas.

Le calcul de la stabilité et de flottabilité est très important en construction navale pour assurer l'utilisation du bateau tout en tenant compte l'étude d'impacts environnementaux.

ABSTRACT

This mémoire describes the construction of a PRVT Yacht 13.65 m. The choice of the use of this composite material requires strong analysis for the project to be profitable, so that way, the boat carries out its mission. In addition, the safety of the boat and equipment must be respected so the construction follows the international standards by Bureau Veritas.

The calculation of stability and buoyancy is very important in shipbuilding to ensure the use of the boat while taking into account the environmental impact studies.