

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHES
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie mécanique

Option : Construction mécanique

Thème :

Etude et conception d'un bateau à propulsion par hélices

Dirigée par :

Mr: OULD OUALI Mohand

Réalisé par :

GUETTAL Lyes

Promotion : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, monsieur Ould Ouali Mohand, pour sa disponibilité, ses encouragements, sa bienveillance et pour le suivis qu'il m'a prodigués durant tout mon travail.

Je voudrais remercier les membres de jurys qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier et évaluer avec attention mon travail.

Je remercie également tous le corps professoral et administratif du département de génie mécanique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grand efforts pour assurer une formation de qualité pour tous leurs étudiants.

Un grand merci à l'ensemble de ma famille et plus particulièrement à mes parents et ma sœur pour leur amour, leur confiance, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel qui m'a permis de réaliser les études pour lesquelles je me destine et par conséquent ce mémoire.

Enfin, je remercie mes amis et tous mes camarades qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A ma sœur, ma grand-mère, mes oncles, mes tantes et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments difficiles lors de la réalisation de ce travail.

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

A tous ceux que j'aime

Table des matières

1	Chapitre 1 : Notions fondamentales sur les navires et leurs systèmes de propulsion :	2
1.1	Généralités sur les bateaux :	2
1.1.1	Introduction :	2
1.1.2	Histoire :	2
1.1.3	L'évolution de la construction navale :	2
1.1.4	Les catégories de bateaux selon leurs usages :	3
1.2	Les matériaux utilisés dans la fabrication des bateaux :	5
1.2.1	L'acier :	5
1.2.2	Alliage d'aluminium :	6
1.2.3	Le Bois :	7
1.2.4	Les matériaux composites :	8
1.3	Les catégories de bateaux selon le nombre de coque	8
1.3.1	Les monocoques :	8
1.3.2	Multicoques :	12
1.4	Caractéristiques de la coque du navire : (2)	13
1.5	La propulsion :	16
1.5.1	La propulsion humaine :	17
1.5.2	Le remorquage :	17
1.5.3	La propulsion vélique :	18
1.5.4	La propulsion à réaction hydrojet	19
1.5.5	La propulsion motorisée :	20
1.5.6	Les propulsions utilisant l'énergie électrique :	20
1.5.7	La propulsion nucléaire :	22
1.5.8	La propulsion à réaction	22
1.5.9	La propulsion magnétohydrodynamique (MHD)	22
1.5.10	La propulsion solaire	23
1.5.11	Le tout électrique	23
1.6	Conclusion :	23
2	Procédés de fabrication de la coque d'un bateau :	24
2.1	Introduction :	24
2.2	Procédé de fabrication en Bois : (7)	24

2.2.1	La construction traditionnelle	25
2.2.2	La construction moderne :	26
2.3	Procédé de fabrication en aluminium :	29
2.3.1	Fabrication :	29
2.3.2	L'utilisation de l'aluminium en construction navale :	31
2.3.3	Sur le matériau :	31
2.3.4	Sa construction :	32
2.3.5	Usage :	32
2.3.6	Fin de vie et recyclage :	32
2.4	Procédé de fabrication de bateau en acier	32
2.4.1	Le découpage :	32
2.4.2	Soudage et assemblage :	33
2.4.3	La mise en peinture et les enduits de finition :	33
2.4.4	L'armement	34
2.4.5	Les essais et épreuves	35
2.5	Procédé de fabrication en matériaux composites : (9)	36
2.4.6	Construction des moules :	36
2.4.7	Cirage :	37
2.4.8	Lustrage :	37
2.4.9	Application de gelotât :	37
2.4.10	Stratification ou moulage :	37
2.4.11	Démoulage :	39
2.4.12	La finition :	39
2.5	Flottabilité et stabilité d'un bateau :	39
2.5.1	Qu'est-ce que la flottabilité :	39
2.5.2	La poussée d'Archimède et son principe :	40
2.5.3	La stabilité :	42
2.5.4	Théorème d'Euler :	46
2.5.5	Stabilité longitudinale :	54
2.6	Le système propulsif d'un bateau : (2)	54
2.6.1	Le système de propulsion hors-bord :	55
2.6.2	Le système de propulsion en-bord :	55

2.6.3	Choix du moteur :	55
2.6.4	Le système de transmission :	56
2.6.5	Sélection du diamètre de l'arbre :	56
2.6.6	Choix de l'hélice :	57
2.7	Conclusion :	61
3	Etude et conception :	62
3.1	Introduction à la conception de la coque :	62
3.2	Dimensions principales :	62
3.3	Cahier de charge :	64
3.3.1	Caractéristiques et de descriptif :	64
3.3.2	Conception de la coque :	66
3.4	Etude de la flottabilité et la stabilité :	70
3.4.1	Etude de la flottabilité	70
3.4.2	Etude de la stabilité :	70
3.4.2.1	<i>Stabilité transversale</i>	70
3.5	Moteur, arbre de transmission et hélice :	73
3.5.1	Choix de l'arbre de transmission :	74
3.5.2	Choix de l'hélice :	74
3.6	Présentation de la coque :	77
3.7	Simulation :	79
3.8	Conclusion :	81

Listes des figures

Figure 1: navire de guerre	3
Figure 2: porte-conteneurs algérien.....	4
Figure 3: navire de pêche	4
Figure 4: yacht de plaisance	5
Figure 5: Fabrication de bateau en acier.....	6
Figure 6: fabrication de bateau en aluminium.....	7
Figure 7: fabrication de bateau en bois.....	7
Figure 8: fabrication d'une barque en matériaux composites	8
Figure 9: monocoque.....	9
Figure 10: coque à déplacement	9
Figure 11:coque à fond rond	10
Figure 12: coque à fond plat.....	11
Figure 13: coque en V	11
Figure 14: coque en V profond.....	12
Figure 15: multicoque	12
Figure 16: différents dimensions d'un bateau.....	14
Figure 17: mesure de longueur.....	15
Figure 18: bateau viking à propulsion humaine	17
Figure 19: remorquer.....	18
Figure 20: bateau à propulsion vélique	19
Figure 21: scooter de mer avec propulsion a réaction hydrojet.....	19
Figure 22: moteur hors-bord électrique.....	21
Figure 23: bateau en bois.....	25
Figure 24: moule coque de bateau.....	36
Figure 25: flottabilité d'un corps	40
Figure 26: illustration sur la poussée d'Archimède :	41
Figure 27:représentation de la poussée d'Archimède sur un bateau.....	42
Figure 28:centre de gravité d'un bateau.....	43
Figure 29: déplacement du centre de la carène.....	45
Figure 30: intersection de deux flottaison isocarène	47
Figure 31:couple de redressement	48
Figure 32: soufflage de la coque	49
Figure 33: inclinaison d'un bateau.....	50
Figure 34: courbe de stabilité	51
Figure 35:inclinaison sur tribord	52
Figure 36: courbe de stabilité " poids déplacé différent"	52
Figure 37: déplacement d'un poids du point A à un point B	53
Figure 38: carène liquide	54
Figure 39: système de transmission d'un moteur dans un bateau.....	56

Figure 40: Nomogramme du Diamètre de l'arbre (en pouce) par rapport à la puissance du moteur (en HP/100 RPM). 57

Figure 41:diamètre et pas d'une hélice 58

Figure 42: Rake d'une hélice 60

Figure 43: procédure de conception d'une coque 67

Figure 44: version finale num°1 77

Figure 45: vue num°2 78

Figure 46: vue num° 78

Figure 47: simulation a la densité du fluide 79

Figure 48: simulation a la densité du fluide, cut maximal..... 80

Listes des tableaux

Tableau 1: caractéristiques des fibres de renforcement :.....	64
Tableau 2: nombre de Froude correspondant à chaque navire.....	65
Tableau 3: couple de redressement selon l'angle d'inclinaison	73

Listes des symboles

L : Longueur

LHT : Longueur hors tout.

LPP : Longueur entre perpendiculaire

PPav : La perpendiculaire avant

PPar : La perpendiculaire arrière

PPm : perpendiculaire milieu

B : Largeur

C : creux

T : Tirant d'eau

F : Franc bord

Δ : Déplacement

V : Vitesse

P : la densité de l'eau

g : l'accélération due à la gravité

∇ : le volume sous l'eau

Fr : Nombre de Froude

∇ : volume sous l'eau

C_B : coefficient de bloc

C_M : coefficient de la section médiane

C_p : coefficient prismatique longitudinal

C_{vp} : coefficient prismatique verticale

C_{wp} : coefficient du plan d'eau

F_A : La poussée d'Archimède

G : Centre de gravité

Introduction générale :

Un bateau est un moyen de transport capable de flotter sur l'eau et de s'y déplacer, dirigé par ses occupants. Il répond aux besoins du transport maritime ou fluvial, et permet diverses activités telles que le transport de personnes ou de marchandises, la guerre sur mer, la pêche, la plaisance, ou d'autres services tels que la sécurité des autres bateaux.

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.

De ce fait, pour concevoir un bateau il faudrait passer par différentes phases d'un cahier des charges ou l'architecte naval crée un premier schéma en prenons plusieurs paramètres en compte, évaluer les dimensions, les espaces et le déplacement selon l'usage et l'utilité finale.

L'objectif de ce mémoire est d'expliquer toutes les généralités et les phases importante pour procéder à la fabrication en faisant les bons choix, que sa sois pour les matériaux, les caractéristiques géométrique, la propulsion, et les différents éléments indispensables telles que la flottabilité du bateau et sa stabilité, et finir par une étude en expliquant toutes les étapes nécessaires.

Chapitre I

Notions fondamentales sur les navires et leurs systèmes de propulsion

1 Chapitre 1 : Notions fondamentales sur les navires et leurs systèmes de propulsion :**1.1 Généralités sur les bateaux :****1.1.1 Introduction :**

Avant d'aborder l'étude et la conception détaillée d'un bateau à propulsion par hélices, il est nécessaire de présenter les bases générales de la construction navale. Ces notions constituent un cadre technique indispensable à la compréhension des choix de conception relatifs à la structure, aux matériaux et aux systèmes de propulsion du navire.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des principaux types de bateaux, en mettant en évidence leur classification selon l'usage et la configuration de la coque. Les matériaux couramment utilisés dans la construction navale sont également abordés, ainsi que les caractéristiques générales de la coque, qui jouent un rôle déterminant dans le comportement hydrodynamique, la stabilité et les performances du bateau.

Enfin, les différents systèmes de propulsion navale sont exposés afin de situer la propulsion par hélices parmi les solutions existantes. Cette présentation permet d'introduire les concepts nécessaires et de préparer les développements analytiques et les études de dimensionnement qui seront traités dans les chapitres suivants.

1.1.2 Histoire :

L'invention du bateau remonte à plusieurs milliers d'années, et correspond au besoin que l'homme a très tôt eu de pouvoir se déplacer sur l'eau, qu'il s'agisse de rivière ou de mer.

Les premiers bateaux ont été construits au Néolithique, à partir de troncs d'arbres évidés à l'aide d'outils en pierre (pirogue monoxyle) mais d'autres types de bateaux (de type skiff) ont été conçus. Il semblerait aussi que des radeaux s'appuyant sur des outres ou des amphores, inspirés pour le transport de ces derniers ou non, émergent au Moyen-Orient. En Mésopotamie, en Égypte ou en Crète selon l'interprétation que l'on fait de certaines gravures... Une découverte récente en Crète indiquerait que l'homme ait navigué il y a 120 000 ans. Ces premiers bateaux ont une fonction simple, qui est de pouvoir se déplacer sur l'eau, essentiellement pour la chasse et la pêche.

1.1.3 L'évolution de la construction navale :

Utilisé depuis des temps immémoriaux pour le transport des hommes et des marchandises, ou encore comme engin de combat, le navire a connu des évolutions lentes jusqu'à l'apparition de la machine à vapeur et de la construction mécanique, et ce n'est guère qu'au milieu 19^e siècle que la construction navale est devenue progressivement une véritable industrie.

La révolution industrielle déclenche par contre une explosion des différenciations. Le besoin d'avoir des bateaux de plus en plus efficaces pour les missions qui leur sont confiées, la fin des conflits systématiques pour la suprématie maritime, l'augmentation des capacités financières des puissances industrielles, engendrent une prolifération de bateaux à usage de plus en plus

spécialisé, autant dans les domaines de la pêche et du commerce que dans le domaine militaire ou de la croisière. On voit également apparaître des navires très spécialisés dans des fonctions nouvelles, comme les bateaux de sauvetage, les navires scientifiques, les bateaux pompiers.

1.1.4 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 (1) :

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.



Figure 1: navire de guerre

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.



Figure 2: porte-conteneurs algérien

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.



Figure 3: navire de pêche

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.



Figure 4: yacht de plaisance

1.2 Les matériaux utilisés dans la fabrication des bateaux :

Si les éléments constitutifs d'un navire en bois sont identiques à ceux d'un navire en acier ou en fer, alors les méthodes de construction diffèrent quelque peu en raison de la nature des matériaux.

1.2.1 L'acier :

Bien que l'art de la construction navale remonte à des siècles, ce n'est que dans les années 1940 que l'acier est devenu le matériau de référence pour la construction navale. Son introduction dans l'industrie était le résultat du besoin de navires solides, mais rapides, pendant la Seconde Guerre mondiale. Au fil des années, les matériaux en acier utilisés pour la construction des navires ont été affinés pour mettre l'accent sur la durabilité en haute mer et la résistance à la rouille. L'acier allie une résistance impressionnante à une malléabilité, presque tous les navires construits aujourd'hui ont une coque en acier. Les coques en acier à haute résistance permettent aux navires de transporter un poids énorme sans chavirer. En plus de la coque, l'acier est

généralement utilisé dans d'autres composants structurels d'un navire, notamment les cloisons, les plats-bords et les mâts.



Figure 5: Fabrication de bateau en acier

1.2.2 Alliage d'aluminium :

Avec une structure en acier, les navires sont suffisamment solides pour résister aux dommages causés par une exposition et un contact constants avec l'océan. Cependant, l'acier est lourd et une trop grande quantité peut avoir un impact sur la capacité d'un navire à rester à flot. Pour les zones d'un navire qui ne sont pas en contact avec l'océan, l'aluminium est principalement utilisé. Bien qu'il ne soit pas aussi durable que l'acier, l'aluminium est toujours incroyablement solide et pèse jusqu'à 60 fois moins. De plus, il est naturellement résistant à la rouille. C'est pourquoi, pour les composants de navires non structuraux, l'aluminium est couramment utilisé. Par exemple, l'équipement, les réservoirs de carburant, les accessoires de stockage et les conteneurs d'expédition sont généralement en aluminium.



Figure 6: fabrication de bateau en aluminium

1.2.3 Le Bois :

La méthode de construction traditionnelle en bois consiste à construire l'intégralité de son bateau en bois, en utilisant des planches de différentes dimensions. Elles sont soit assemblées les unes à côté des autres ou légèrement superposées pour nous donner une construction à clins, ainsi il y a différents types de bois et de façon de faire comme le contreplaqué qui consiste à assembler des feuilles de bois entre elles avec une colle qui peut supporter l'eau. Le bois moulé, le strip planking... etc



Figure 7: fabrication de bateau en bois

1.2.4 Les matériaux composites :

Réduire les émissions polluantes et la consommation de carburant, gagner en légèreté et en durabilité sans compromettre les performances... les constructeurs du secteur maritime s'intéressent de plus en plus aux avantages d'une construction à base de matériaux composites (polymères renforcés de fibres de carbone, etc.), à l'heure où l'industrie navale est encore caractérisée par un recours massif à l'acier.

Cette nouvelle génération de navires plus durables concerne aussi bien la navigation de plaisance que les transports maritimes ou la Défense. Pour rappel, un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Les matériaux composites hautes performances présentent des propriétés mécaniques spécifiques. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.



Figure 8: fabrication d'une barque en matériaux composites

1.3 Les catégories de bateaux selon le nombre de coque

1.3.1 Les monocoques :

Comme l'indique son nom c'est un bateau qui ne possède qu'une seule coque, qui est la structure qui permet à ce dernier de flotter sur l'eau. C'est la forme la plus courante des bateaux et leur coût revient moins cher pour sa simplicité de mise en œuvre et sa facilité à concevoir. Comme on peut distinguer plusieurs types.

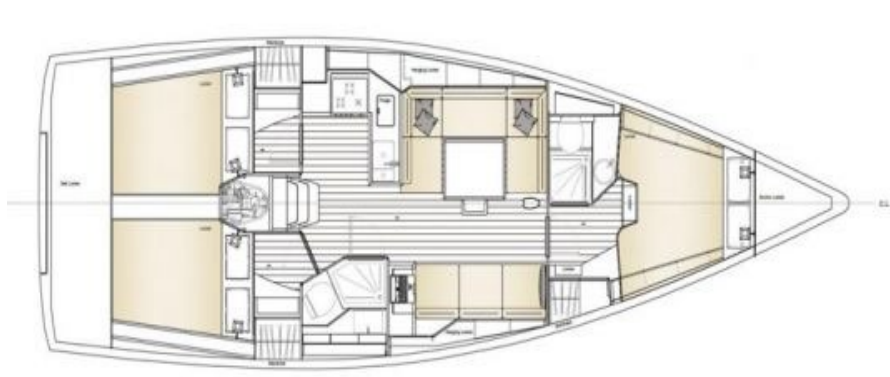


Figure 9: monocoque

1.3.1.1 Les coques à déplacement :

Les coques à déplacement, parfois appelées carènes à déplacement, reposent sur l'eau et font bouger celles-ci en se déplaçant. Cela génère une grande résistance, de sorte que les bateaux à coque à déplacement ont tendance à être plus lents. La résistance de l'eau augmente à mesure que la vitesse augmente, créant ainsi une sorte de limite de vitesse intégrée appelée vitesse de la coque ou vitesse de déplacement. Les coques à déplacement ont tendance à avoir un fort tirant d'eau. Cela signifie qu'une plus grande partie de la coque du bateau est dans l'eau, ce qui le rend plus facile à manier dans les vagues et les conditions difficiles. La plupart des voiliers, des bateaux de croisière et des cargos qui doivent traverser des océans ont des coques à déplacement pour cette raison.

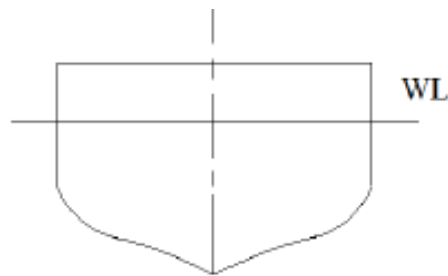


Figure 10: coque à déplacement

1.3.1.2 Coques à fond rond :

La plupart des coques à déplacement sont conçues avec un fond rond, car la forme arrondie offre le moins de résistance à l'eau et la déplace efficacement. Les coques à fond rond offrent une navigation très douce et confortable. Leur principal inconvénient est l'instabilité : les bateaux à fond rond ont tendance à se balancer et à chavirer. Une quille profonde (souvent présente sur les voiliers) peut contribuer à améliorer la stabilité.

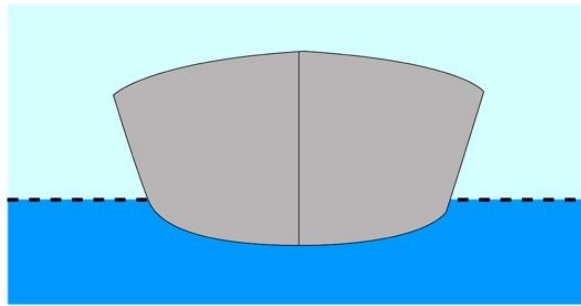


Figure 11:coque à fond rond

1.3.1.3 Les coques planantes :

Les coques planantes, ou carènes planantes, se trouvent généralement sur des bateaux plus petits et plus légers, conçus pour la vitesse. Les coques planantes déplacent l'eau lorsqu'elles se déplacent lentement, mais à mesure qu'elles accélèrent, la forme de la coque et la vitesse s'associent pour générer de la portance, permettant au bateau de sortir de l'eau et d'effleurer la surface. Les bateaux à coque planante peuvent se déplacer beaucoup plus rapidement que ceux qui déplacent l'eau, mais ils sont moins stables et plus facilement affectés par les rafales de vent.

1.3.1.4 Coques à fond plat :

Les coques à fond plat sont conçues pour être posées sur l'eau et en déplacer très peu pendant la navigation. Les bateaux à fond plat peuvent aller assez vite en raison de la faible résistance, mais si l'eau est agitée, la coque se heurtera à chaque vague, ce qui rendra la navigation très inconfortable. Les bateaux à fond plat sont assez stables en ce sens qu'ils ne risquent pas de basculer ou de chavirer, mais le vent peut facilement les faire dévier de leur route en raison de leur très faible tirant d'eau. Les bateaux à fond plat sont généralement moins chers à construire et nécessitent moins de puissance pour fonctionner, car ils n'ont pas besoin d'être

soulevés pour frôler la surface de l'eau. Le fond plat maximise également l'espace à l'intérieur du bateau. Cependant, il est préférable de les utiliser sur des eaux calmes et intérieures, car ils peuvent être inconfortables et peu maniables dans des conditions de navigation plus hostiles.

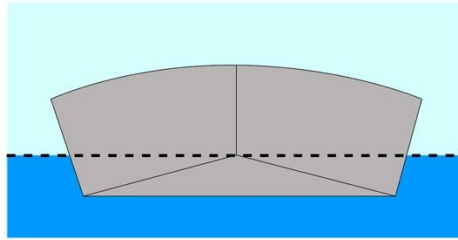


Figure 12: coque à fond plat

1.3.1.5 Coques en V :

Les coques en V sont conçues pour offrir une conduite plus souple en eau agitée que les bateaux à fond plat, mais il leur faut plus de puissance pour atteindre la même vitesse.

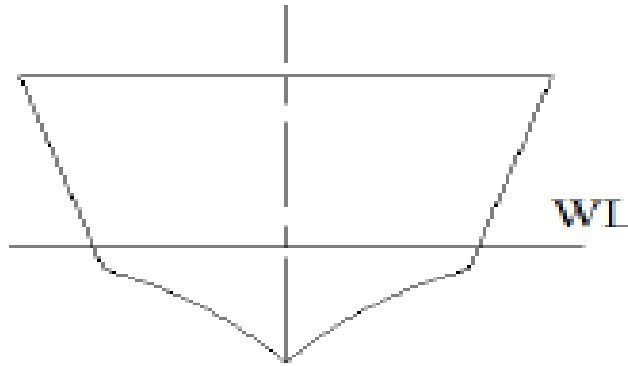


Figure 13: coque en V

1.3.1.6 Coques en V profond :

Ce type de coque a une forme en V profond qui va de la proue à la poupe. La forme de la coque agit comme une petite quille, offrant au bateau plus de stabilité et de maniabilité qu'un fond plat tout en maintenant des vitesses très élevées. Malheureusement, l'angle aigu de la coque entraîne une diminution de l'espace intérieur pour le rangement, l'équipement de sécurité du bateau et les aménagements.

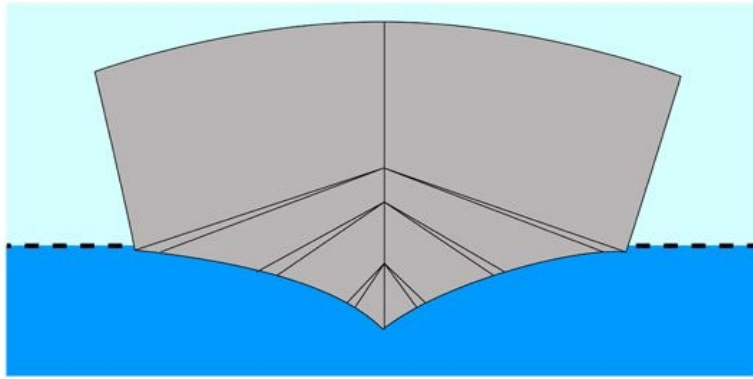


Figure 14: coque en V profond

1.3.1.7 Coques en V modifié :

Les coques en V modifié ont un fond plat à l'arrière qui prend progressivement la forme d'un V vers l'avant. La poupe plate assure la vitesse et la stabilité tandis que la proue en V améliore la maniabilité. Ce type de coque de bateau est le compromis ultime : il possède un peu de tout, mais n'excelle dans aucune catégorie.

1.3.2 Multicoques :

Les multicoques sont des bateaux dotés de deux ou trois coques distinctes. Ils ont tendance à être très larges, ce qui augmente la stabilité et offre un espace supplémentaire sur le pont, mais les rend moins maniables.



Figure 15: multicoque

1.3.2.1 Catamarans :

Les catamarans ont deux coques entre lesquelles s'étend un pont. Bien qu'il s'agisse de coques à déplacement, celles-ci ont un très faible tirant d'eau, ce qui signifie que seulement une petite partie du bateau est réellement dans l'eau. Cela en fait un excellent choix pour naviguer dans les eaux peu profondes et sur les récifs. Le principal inconvénient des catamarans est leur largeur, qui leur confère un très grand rayon de braquage et rend leur amarrage dans les marinas très coûteux.

1.3.2.2 Trimarans :

Il existe deux types de trimarans. L'un est similaire au catamaran, mais avec trois coques au lieu de deux. L'autre, souvent appelé trimaran pliable, possède une coque de déplacement principale et deux flotteurs ou pontons, un de chaque côté. Comme son nom l'indique, le principal avantage d'un trimaran repliable est que les flotteurs ou les pontons peuvent être repliés pour amarrer ou transporter le bateau.

1.3.2.3 Pontons :

Les pontons sont des flotteurs creux et étanches à l'air qui sont extrêmement flottants. Les bateaux pontons se composent généralement d'un large pont monté sur deux ou plusieurs pontons. Ce sont des multicoques planants qui flottent sur la surface de l'eau. Ils sont très stables, mais ont tendance à être lents et à manquer de maniabilité.

1.4 Caractéristiques de la coque du navire : (2)

La coque d'un navire est l'ensemble des structures, généralement métalliques, qui répondent aux quatre fonctions suivantes : matérialiser la carène, résister aux efforts en service (les éléments correspondants constituent la charpente) ; assurer la sécurité contre un envahissement par l'eau et contre la propagation d'un incendie (les éléments correspondants constituent le compartimentage de sécurité), loger les appareils, équipements et installations nécessaires pour satisfaire au programme de navigation en sécurité.

Les caractéristiques générales d'un navire sont mesurées de façon précise et font partie des spécifications techniques de la construction d'un navire. Elles déterminent les dimensions principales d'un navire et sont utilisées pour les différents calculs relatifs à l'épaisseur de l'ensemble des tôles ainsi que pour la plupart des échantillonnages des éléments structuraux primaires et secondaires, elle se définit par :

- **Ligne de flottaison ou bien la longueur de flottaison** : la ligne de flottaison désigne la ligne qui sépare la partie immergée de la coque d'un navire de celle qui est émergée. C'est une des caractéristiques essentielles utilisées en architecture navale. Elle désigne la longueur de la carène, c'est-à-dire la longueur de la coque au niveau de sa ligne de flottaison. La flottaison normale ou nominale est le plus souvent mesurée au « Déplacement en charge » effectif du navire. L'intersection de la coque avec la surface peut être difficile à établir pour les navires aux formes arrière compliquées. La connaissance de ces règles est nécessaire pour concevoir et utiliser des navires car il faut maîtriser leur ligne de flottaison à vide, ainsi que la charge maximale qu'ils pourront supporter avant que cette ligne de flottaison soit trop proche du haut de la coque.

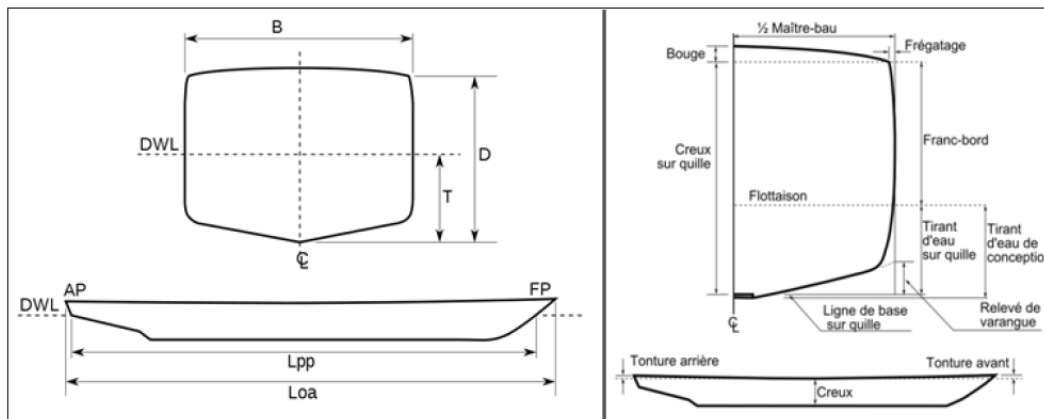


Figure 16: différents dimensions d'un bateau

- **Longueur hors tout LHT ou LOA** : La longueur hors-tout ou longueur d'encombrement, en général notée LHT ou LOA pour Length over all, est une mesure d'un bateau utilisée en architecture navale. Elle correspond à la distance entre les points extrêmes avant et arrière de la structure permanente du bateau. Il s'agit de la longueur mesurée à partir de l'extrême avant jusqu'à l'extrême arrière d'un navire.
- **Longueur** : pour un navire à vocation commerciale, la longueur d'un navire est la distance, à la ligne de flottaison en charge d'été, de la face avant de l'étrave jusqu'à l'axe de la mèche du gouvernail. Pour les sociétés de classification, cette longueur sert de longueur de calcul si elle se situe, à la ligne de flottaison entre 96 % et 97 % de la longueur hors tout.
- **Longueur entre perpendiculaires (L.B.P. au Lpp)**: la longueur entre perpendiculaires est égale à 96% de la longueur totale de la flottaison, située à une distance au-dessus de la quille égale à 85% du creux sur quille, ou à la distance entre la face avant de l'étrave et l'axe de la mèche du gouvernail à cette flottaison si cette valeur est supérieure (LBP Length between perpendiculars). Sur un navire de commerce, la différence entre LOA et LBP peut être importante. On utilise également la longueur à la flottaison qui dépend du chargement et qui est variable. On distingue particulièrement la longueur à la flottaison en charge.

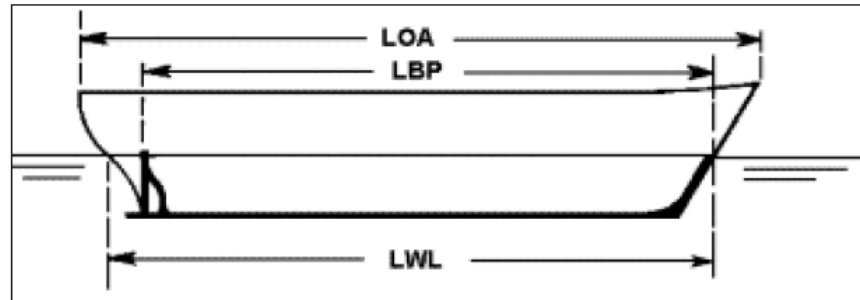


Figure 17: mesure de longueur

- **Les perpendiculaires (PPav), (PPar) et (PPm) :** les perpendiculaires avant et arrière sont prises aux extrémités avant et arrière de la longueur entre perpendiculaires. La perpendiculaire avant (PPav) doit passer par l'intersection de l'étrave avec la flottaison sur laquelle est mesurée la longueur. La perpendiculaire arrière (PPar) ne passe donc pas toujours par l'axe de la mèche du gouvernail. Le perpendiculaire milieu (PPm) est situé au milieu de la longueur entre perpendiculaires, donc à égale distance de la PPAV et de la PPAR.
- **Largeur (B) :** La largeur hors tout du navire (B Breadth) est la largeur maximale mesurée au milieu du navire (au maître-couple ou maître-bau qui est le barrot situé dans la plus grande largeur du navire). On parle également de largeur hors membres lorsque l'épaisseur des bordés n'est pas comprise.
- **Creux (D) :** le creux sur quille est la distance verticale mesurée du dessus de la quille à la face supérieure du barrot au livet en abord du pont de franc-bord. Le livet d'un pont était la ligne marquant l'intersection de ce pont avec la muraille d'un navire. Le creux de franc-bord est le creux sur quille mesurée au milieu du navire augmenté de l'épaisseur de la tôle gouttière du pont de franc-bord.
- **Tirant d'eau (d) ou (T) :** en architecture navale seulement, le tirant d'eau est mesuré verticalement à partir du dessus de la quille, au milieu du navire jusqu'à la ligne de flottaison en charge d'été. Le tirant d'eau est la hauteur de la partie immergée du bateau qui varie en fonction de la charge transportée.
- **Tirant d'eau en charge :** lorsque le navire est chargé.
- **Tirant d'eau léger :** lorsque le navire est vide.
- **Franc-bord :** le franc-bord est mesuré verticalement entre la ligne de flottaison en charge d'été jusqu'à la partie supérieure en abord du pont continu et étanche le plus élevée, au milieu du navire. Le franc-bord du navire est la distance qui sépare le livet de pont et l'un des traits horizontaux qui constituent les marques de franc bord. Ainsi il y a le franc bord d'été, d'hiver et tropical, les lignes de charge. Le franc bord joue un rôle capital en ce qui concerne la flottabilité et la stabilité du navire. Le franc bord marque le centre du navire. Cette marque est posée par les sociétés de classification qui se chargent de calculer le franc bord conformément aux règles internationales. Les océans sont divisés en zones de navigation (LL 66), été, hiver,

tropicale. En fonction des dates de navigation dans ces zones le capitaine veillera à respecter la ligne de charge correspondante. Les périodes de navigation fixées tiennent compte de la force des vents dans la zone concernée

- **Le pont de franc-bord** : est normalement le pont complet le plus élevé exposé aux intempéries et à la mer et qui possède des dispositifs permanents de fermeture de toutes les ouvertures situées dans les parties découvertes et au-dessous duquel toutes les ouvertures pratiquées dans le bordé sont munies de dispositifs permanents de fermeture étanche”.
- **Maitre-couple** : le maitre-couple, ou le milieu d'un navire, correspond à sa demi- longueur entre perpendiculaires. Il est à noter que du côté pratique, le maitre-couple correspond au couple de construction situe le plus près de la moitié de la longueur d'un navire entre perpendiculaires.
- **Région milieu** : la région milieu où $.4L$ d'un navire correspond à la région située à 20% en avant et en arrière du maitre-couple. De $0.2L$ à l'avant : lorsqu'il est spécifié une région particulière d'un navire, telle que $0.2L$ ou $0.05L$ à l'avant ou à l'arrière, cette distance est mesurée en pourcentage de la longueur du navire, à partir des perpendiculaires avant et arrière respectivement.
- **Extrémités avant et arrière** : à mains d'indication contraire, les extrémités avant et arrière sont définies comme étant situées à l'extérieur de la région milieu d'un navire.
- **Ecartements des couples de construction** : écartements selon lesquels des éléments structuraux peuvent être agences. Pour un navire dit « de construction transversale », un élément de structure sera disposé à chacun des couples de construction, suivant un écartement longitudinal de couples prédéterminé.

1.5 La propulsion :

Définition et catégories :

Les engins marins (bateau de plaisance, navire scientifique, de pêche ou de commerce, bâtiment militaire, sous-marin) font appel à différents modes de propulsion pour se déplacer sur ou sous les mers :

- L'utilisation d'une force naturelle à l'état brut (courant par exemple)
- L'utilisation d'un système mécanique et aérodynamique embarqué transformant une énergie extérieure (voile et force du vent)
- L'utilisation d'un système mécanique embarqué transformant lui-même une énergie embarquée (aviron et force musculaire, hélice et force du moteur, etc.)

1.5.1 La propulsion humaine :

Ce mode de propulsion repose sur le recours à la force musculaire humaine pour se déplacer sur l'eau :

- Perche en appui sur le fond quand la profondeur le permet
- Rame, aviron ou pagaie : utilisation d'une force motrice en appui sur l'eau
- Hélice : elle peut être soit immergée (actionnée par un système de pédalier, comme sur un pédalo par exemple) ou soit aérienne (exemple de l'hydroptère Decavitator dont le déplacement sur l'eau est assuré par une hélice aérienne reliée à un pédalier).



Figure 18: bateau viking à propulsion humaine

1.5.2 Le remorquage :

Le remorquage a de tout temps été un moyen de propulsion et le reste aujourd'hui. C'est une technique où un bateau est tiré par un autre auquel il est attaché.

Exemple : Remorquage d'un navire en avarie pour une opération de sauvetage en mer, remorquage de grands bâtiments lors de leur entrée dans un port.



Figure 19: remorquer

1.5.3 La propulsion vélique :

Elle consiste à utiliser la force du vent pour propulser un engin grâce aux voiles. Le principe de fonctionnement d'une voile dépend de l'allure du navire, c'est à dire de l'angle entre la direction du navire et celle du vent.

Lorsque le navire remonte au vent (l'angle direction navire/direction vent diminue), l'écoulement de l'air le long de la voile crée une différence de pression entre les deux côtés de la voile, il y a création d'une dépression du côté de la voile situé sous le vent qui « tire » le navire et lui permet de remonter au vent (c'est le même phénomène, appliqué à une aile, qui permet à un avion de voler).

Afin d'améliorer les performances des bateaux (et leur permettre d'atteindre 4 à 5 fois la vitesse du vent), les architectes navals jouent sur la forme du bateau et des voiles, sur les types de composants à utiliser. Ils prennent aussi en compte le phénomène de gîte : la force du vent sur la voile possède une composante perpendiculaire à l'axe du navire qui peut faire pencher ce dernier sur le côté. On règle entre autres ce problème avec des quilles ou des contrepoids. Lorsque la direction du navire est proche de celle du vent, celui-ci pousse via les voiles le navire.

Exemples d'applications : bateaux de course (monocoques ou multicoques), engins de plage (dériveur, planche à voile, kitesurf).



Figure 20: bateau à propulsion vélique

1.5.4 La propulsion à réaction hydrojet

C'est un système de propulsion maritime à réaction. L'hélice est placée dans un conduit, l'eau est pompée sous la carène du navire et expulsée au niveau du tableau arrière, à l'air libre. L'orientation latérale du jet détermine la direction imprimée à l'embarcation. Verticalement, une inversion du sens de poussée permet la marche arrière. Ainsi le jet remplace tout à la fois le gouvernail et l'inverseur. Ce type de propulseur a d'abord été utilisé sur les petites embarcations portuaires très maniables, (yachts rapides, ferries à grande vitesse (NGV), hydroptères militaires, scooters des mers).



Figure 21: scooter de mer avec propulsion à réaction hydrojet

1.5.5 La propulsion motorisée :

La propulsion motorisée est la plus répandue. Elle consiste à actionner un propulseur grâce à un moteur. Le moteur est chargé de transformer l'énergie primaire du combustible en énergie mécanique et/ou électrique. Il est couplé à une ou plusieurs hélices, appareils de propulsion. Le système avance perpendiculairement à la rotation des hélices grâce aux pales orientées suivant un angle optimisé qui prennent appui sur l'eau.

On distingue les moteurs à combustion interne (moteurs diesel, moteurs à essence et turbines à gaz) des moteurs à combustion externe (chaudières et machines à vapeur).

- Dans un **moteur à combustion interne**, l'énergie thermique dégagée par la combustion est transformée en énergie motrice mécanique directement à l'intérieur du moteur. Ces moteurs navals sont le plus souvent diesel, ou essence pour de petite embarcation. Exemples : navires marchands de plus de 100 m de long (moteur diesel deux-temps), navires militaires nécessitant une accélération rapide (turbines aéronautiques).
- Dans un **moteur à combustion externe**, l'énergie est transportée par un fluide caloporteur à l'extérieur de celui-ci comme dans un ensemble chaudière, turbine à vapeur ou moteur Stirling. Ce système permet d'atteindre de grandes puissances (70 MW) avec des carburants de basse qualité, mais avec une grande consommation et une faible efficacité thermique. Ils sont très longs à mettre en œuvre (4h) et demandent beaucoup d'espace. Exemples : bâtiments militaires, transporteurs de gaz liquéfié où il est possible de réutiliser le gaz des soutes.

1.5.6 Les propulsions utilisant l'énergie électrique :

On distingue plusieurs types de propulseurs en utilisant l'énergie électrique comme :

- **La propulsion diesel électrique :**

Le moteur est alimenté par un groupe électrogène dédié proportionnel à la puissance du moteur. La puissance est de 10 kW à plus de 50 kW (tension d'utilisation 400V triphasé). Cette solution est adaptable sur de grands de bateaux, en fonction des besoins.

Avantages : autonomie (groupe électrogène), forte puissance et couple disponible en permanence, complément d'utilisation en électricité pour le service de bord.

Inconvénients : installation complexe et coûteuse, pas adaptée aux petits bateaux.

- **La propulsion électrique :**

Un nombre croissant de constructeurs de petites unités utilise la propulsion électrique à bord de leur bateau, motivés par des raisons techniques, environnementales, de confort et de sécurité. Les récentes avancées technologiques, essentiellement des batteries (au lithium par exemple) permettent cette évolution.

Avantages : confort d'utilisation (absence de bruit, de vibrations et d'émissions, etc.) et peu d'entretien.

Inconvénients : autonomie limitée, poids des batteries.

➤ **Le moteur hybride :**

D'une puissance de 3 kW à 10 kW (de 24 V à 84 V), la propulsion est assurée soit par un moteur électrique (alimenté par le parc de batteries dédiées), soit par le moteur thermique classique. Le moteur thermique sert aussi de générateur de courant.

Avantages : autonomie, peu d'entretien, davantage de confort d'utilisation en électrique et solution adaptable sur tous types de moteurs.

Inconvénients : surcoût (par rapport à un moteur thermique classique) et encombrement de l'installation.



Figure 22: moteur hors-bord électrique

1.5.7 La propulsion nucléaire :

La propulsion nucléaire des navires requiert un réacteur nucléaire qui alimente en vapeur une turbine. L'énergie mécanique de la turbine est alors utilisée pour faire tourner l'arbre d'hélice du navire, soit de façon directe par l'intermédiaire d'un réducteur (on parle alors de propulsion turbo-mécanique), soit en passant par l'intermédiaire de l'électricité (on parle alors de propulsion turboélectrique). En complément, la vapeur produite par le réacteur fournit l'électricité et l'eau douce du bord.

Avantages : très grande autonomie, discrétion (ex : sous-marin), vitesse dans la durée.
Inconvénients : compétences spécifiques, coûts d'investissement sur la durée.

Exemples : sous-marins (États-Unis, Chine, Russie, Royaume-Uni, France), certains porte-avions ou porte-aéronefs à propulsion nucléaire (États-Unis et France) comme le Charles de Gaulle par exemple, quelques grands bâtiments de combat ou de soutien (américains ou russes uniquement), des navires brise-glace russes.

1.5.8 La propulsion à réaction

Sur un principe similaire à celui de l'avion à réaction, des bulles de gaz sont éjectées dans une tuyère, l'expansion de fluide ainsi provoquée produit une poussée vers l'avant. Le gaz peut être produit soit par de l'air comprimé, soit par réaction chimique de l'eau avec un carburant comme le sodium ou le lithium.

Inconvénients (à ce stade des développements) : faible rendement, danger des produits mis en œuvre, nécessité d'un système auxiliaire pour démarrer.

1.5.9 La propulsion magnétohydrodynamique (MHD)

Cette propulsion, fondée sur la force de Laplace (force qui apparaît lorsque l'on fait circuler un champ électrique dans un corps soumis à un champ magnétique) repose sur le fait que l'eau de mer est conductrice. Le procédé consiste à mettre un aimant sur le bateau et à faire circuler un champ électrique dans l'eau soumise à un champ magnétique que l'on aurait créé.
Avantages : pas de pièces mobiles (hélices) donc moins de tourbillons et de bruit.
Inconvénients : procédé expérimental, limites pas encore toutes maîtrisées (risques électriques et magnétiques, aimants puissants, électrolyse de l'eau de mer, etc.)

Expérimentations : dans les années 1990, Mitsubishi conçoit le Yamato1, démonstrateur à propulsion MHD. Grâce à des aimants supraconducteurs refroidis à l'hélium, il pouvait se déplacer à 15 km/h.

1.5.10 La propulsion solaire

Un chantier naval allemand de Kiel a construit le multicoque TÛRANOR à propulsion solaire, en septembre 2010, sous pavillon Suisse. Les principaux objectifs de PlanetSolar sont de démontrer le potentiel des énergies renouvelables et photovoltaïques, en participant au développement technologique des énergies renouvelables.

1.5.11 Le tout électrique

La plupart des industriels du secteur de la défense s'orientent vers des navires tout électriques, avec des puissances de plus 20 MW pour la propulsion et pour l'armement. Pour y parvenir, ils doivent faire face à 3 ruptures technologiques : utilisation de la supraconductivité pour les moteurs de propulsion, stockage de l'énergie et mise en œuvre de système de pilotage temps réels du flux d'énergie vers la propulsion et le système d'armes.

1.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les différents types de bateau ainsi que leur usage, l'élément essentiel qui est la coque avec ses caractéristiques, les matériaux utilisée dans la fabrication des navires et enfin toutes les formes de propulsions. Cela va nous permettre d'avoir une idée générale des constituant d'un bateau et va nous servir de bonne base pour entamer notre travail qui consistera à sa conception.

Chapitre 2

Procédés de fabrication de la coque d'un bateau

2 Procédés de fabrication de la coque d'un bateau :

2.1 Introduction :

Après avoir vu lors du chapitre précédent les différents composants d'un bateau ainsi que les matériaux utilisés pour sa conception, nous allons détailler les procédés de fabrication pour chaque matériau. Nous allons aussi définir les différents paramètres qui nous permettront d'étudier la stabilité et la flottabilité d'un bateau qui sont deux éléments essentiels pour naviguer sur mer.

2.2 Procédé de fabrication en Bois : (7)

Le bois, produit aux multiples qualités reconnues, est ou a été, dans la majorité des pays du monde, le matériau le plus utilisé pour la construction navale des petites et moyennes unités.

Le principal avantage du bois est qu'il est un matériau renouvelable. Il est cependant nécessaire de s'assurer que l'exploitation des forêts se fasse de manière durable. Pour cela les professionnels devraient s'attacher à utiliser du bois certifié. Il existe actuellement deux labels pour certifier qu'un bois est issu d'une forêt gérée durablement le label FSC (Forest Stewardship Council) ou PEFC (Pan-European Forest Certification).

Il est important de signaler que le bois utilisé dans la construction navale est souvent importé, d'Afrique, d'Asie du Sud-est et d'Amérique. Son transport entraîne ainsi des fortes émissions de CO₂ qui représentent un impact important sur l'environnement. Lorsque cela est possible, l'utilisation de bois de forêt locale est préférable mais l'adéquation indispensable de la production forestière (en quantité et qualité) avec les besoins des chantiers n'est pas acquise. Les produits courants d'entretien, les colles... ont un impact négatif sur l'environnement, et les remises en état sont coûteuses en main d'œuvre.

Il existe différents types de construction bois :

-la construction traditionnelle avec utilisation de bois massif (exemple : bordage classique ou à clin)

-les méthodes modernes : bois tranché, déroulé ou contreplaqué avec collage et revêtements synthétique



Figure 23: bateau en bois

2.2.1 La construction traditionnelle

Il existe deux techniques de construction classique :

➤ **La première dite « traditionnelle » :**

La construction dite « traditionnelle » commence par la conception de la quille qui recevra les varangues et un lest extérieur si besoin. Des membrures sciées (pièces de chêne réalisées en plusieurs parties), disposées à intervalles réguliers, s'ajouteront sur la quille et formeront le squelette du bateau.

La prochaine étape consistera à poser les bordés de l'étrave au tableau qui seront fixés aux membrures à l'aide de pointes ou de vis.

➤ **La seconde dite « construction légère » :**

Comme pour la première, elle débute par la fabrication de la quille et la pose de l'étrave, de l'étambot et de la voute sur une même base. Le tableau sera ensuite fixé sur le voute.

Contrairement à la construction précédente, l'étape suivante va consister à poser des gabarits ou couples provisoires de l'avant à l'arrière du bateau et à intervalles réguliers. Ils sont réglés perpendiculairement à la quille et maintenus à l'aide de lisses.

Viendra ensuite la pose des varangues, pièces constituant la partie inférieure de la coque et réalisées généralement en chêne. Puis, les bordés seront posés et fixés aux gabarits de manière provisoire.

La technique consistera à mettre en place des membrures dites « ployées » ou « bouillies », (pièces généralement en acacia qui une fois chauffées à la vapeur seront appliquées une à une contre le bordage intérieur et viendront prendre la forme exacte de la coque). Une fois ces membrures rivées les gabarits seront enlevés.

L'ajustement des différentes pièces est très important afin d'assurer l'étanchéité du bateau mais également d'augmenter sa durée de vie. Le calfatage peut être ensuite réalisé avec un simple fil de coton ou du chanvre et du mastic époxy. Les finitions consistent ensuite en un ponçage très soigneux et à l'application de vernis ou de peinture.

Il existe également d'autres techniques traditionnelles de construction en bois comme la construction à clin, le bordé « norvégien » ou le bois latté, le bordé sur lisse ou encore le double bordé.

La construction bois utilise une main d'œuvre qualifiée, des techniques d'assemblage haute qualité, ainsi qu'une protection des surfaces efficaces avec peinture et substances généralement synthétiques.

Pour les grands navires marchands, la construction bois a été progressivement abandonnée au profit principalement de l'acier. Jusqu'aux années 1960 le bois était le matériau majoritairement utilisé en pêche ou en plaisance. Aujourd'hui la construction en bois traditionnelle a pratiquement disparu au profit de matériaux (composites, aluminium, acier) ou de procédés de mise en œuvre (construction bois moderne), plus accessibles d'un point de vue technique ou économique.

Cependant quelques chantiers navals, continuent à perpétuer la construction traditionnelle pour la plus grande satisfaction de certains acquéreurs et d'usagers de la mer.

2.2.2 La construction moderne :

La construction « moderne » est la construction bois la plus courante aujourd'hui.

Ce type de construction assemble le bois massif ou contreplaqué avec des colles performantes, majoritairement des résines époxy.

Le principe des constructions bois époxy consiste à traiter à la résine époxy toute pièce de bois rapportée dans la construction du bateau. L'hygrométrie est ainsi stabilisée et le bois ne vieillit donc plus.

A l'intérieur cela le protège totalement de l'eau et des hydrocarbures sous le moteur. A l'extérieur, le même traitement ou la pose d'un tissu de verre rend totalement étanche les fonds comme le pont. La résine sert aux collages, à la stratification, aux enduits et au montage de l'accastillage, assurant encore une meilleure solidité et étanchéité.

Le principe s'applique donc aux constructions neuves comme aux restaurations.

➤ **Domaine d'application en construction navale :**

Le bois / époxy est adapté à la fabrication de tout type de navire de plaisance monocoque ou multicoque, voile ou moteur, de la barque à des unités de plusieurs dizaines de mètres (des monocoques ou multicoques de 60 pieds ont déjà été construits sur ce principe), de grand voyage ou de compétition (exemples : monocoques de course au large série 40)

Le bois / époxy est particulièrement adapté aux fabrications à l'unité. Mais certains chantiers de petites à moyennes séries l'ont également adopté (ex : Fora Marine et ses RM Yachts).

La construction de bateaux en bois / époxy se fait en trois grandes étapes :

- Mise en œuvre des bois
- Stratification
- Traitement de finition des coques

1) Méthodes de mise en œuvre du bois :

Les techniques de mises en œuvre citées ci-dessous sont les plus courantes. Cependant il en existe de nombreuses variantes. Certaines d'entre elles peuvent, également, être combinées sur un même bateau.

○ **Le contre-plaqué :**

Les qualités mécaniques (rigidité, légèreté, solidité), les qualités de confort (ambiance intérieure, isolation thermique et phonique) et l'esthétisme (coques laquées) attirent les clients.

De nos jours, cette méthode est sûrement une bonne alternative, d'un point de vue technique et économique, pour les constructions à l'unité. Cependant son impact sur l'environnement est non négligeable.

Le contreplaqué est plus léger mais nécessite beaucoup de résine, colles, peintures et revêtements. Ce qui rend leur recyclage impossible contrairement au bois traditionnel. Les bateaux en contreplaqué ont un coût environnemental relativement élevé en fin de vie¹⁵.

Pour des unités de plaisance, les panneaux de CP ont généralement une épaisseur > 15 mm.

Les principales opérations sont manuelles ou réalisées avec de l'outillage portatif courant :

- 1 - réalisation d'un marbre ou châssis

- 2 - mise en place des gabarits, des cloisons, étrave et tableau arrière
- 3 - pose des bordés
- 4 - stratification des bouchains : tissu de verre + époxy
- 5- enduit de finition, traitement sous couche peinture et peinture

- **Le Strip Planking (ou lisses non jointives) :**

La construction « strip plank » se traduit par « lattes-jointives ». Elle est apparue dans les années 1970 avec la popularisation des colles époxy. Elle permet de belles formes rondes et offre de bonnes propriétés mécaniques, rigidité et gain de poids. Il s'agit vraiment d'un compromis entre la construction composite et la construction bois, puisque les lattes sont utilisées comme une âme active avec une peau en verre-époxy de chaque côté.

Cette technique utilise des couples de la coque bateau comme structure. Sur l'extérieur de ces couples, on vient déposer des lisses relativement épaisses d'un bois de faible densité.

Les lisses prennent ainsi la forme de la coque. Une fois les couples retirés, une stratification époxy / tissus de verre est ensuite réalisée des deux côtés de la coque formée par les lisses.

Le bois le plus utilisé pour la réalisation des lattes est le Red cedar, pour son faible poids spécifique et pour son prix très raisonnable, mais n'importe quel bois de faible densité est susceptible d'être employé.

Les couples sont généralement en aggloméré ou en contre-plaqué.

Le strip planking est une méthode de construction, bien adaptée à la construction à l'unité, pour des coques en forme.

- **Le bois moulé sur lisses :**

La technique de bois moulé, a vu le jour après la deuxième guerre mondiale. Cette méthode permet de construire à l'unité un bateau léger, voire ultra léger, solide et étanche par tous les temps.

Construire en bois moulé revient à fabriquer un panneau de contre-plaqué à la forme d'un bateau.

Cette technique utilise aussi des couples et des cloisons permanentes du bateau, qui alignés sur un chantier forment un mannequin temporaire. Sur ce mannequin, plusieurs plis de 3 à 4 mm d'épaisseur, de bois tranché ou de contreplaqué fin sont déposés.

Des agrafes sont utilisées pour tenir les plis en place pendant le collage, technique parfois remplacée par un sac à vide.

La structure réalisée est ensuite protégée soit par un vernis appliqué directement soit par une peau extérieure en verre-époxy

Le bois moulé sur lisses est une technique adaptée à n'importe quel type de bateau à l'unité, pour des coques en forme. Simple dans sa réalisation, il offre un bon compromis entre poids et rigidité. Néanmoins c'est une technique qui nécessite un temps de main d'œuvre important.

2) Satisfaction :

Les produits de collage et de stratification sont principalement du tissu de verre et résines / colles époxy.

La stratification se fait au contact de manière « classique » avec éventuellement compactage sous vide sous membrane souple.

Les renforts « secs » sont déposés directement sur les surfaces bois puis imprégnés manuellement. Les deux surfaces extérieures et intérieures sont stratifiées successivement.

3) Traitement finition des coques :

Après dépôt d'un enduit pour corriger les éventuels défauts de surface et ponçage final de la coque, le système de finition peinture est similaire à celui d'une construction composite.

2.3 Procédé de fabrication en aluminium :

Depuis le début des années 1960, la production mondiale d'aluminium augmente d'un million de tonnes tous les vingt mois, ce qui confirme l'intégration de ce métal blanc dans nos habitudes de vie. Cette croissance s'accompagne d'une meilleure prise en compte du cycle de vie de l'aluminium qui lui permet d'avoir, contrairement à la plupart des matériaux, une valeur marchande élevée en fin de vie grâce à son fort potentiel de recyclabilité.

2.3.1 Fabrication :

L'aluminium est un élément abondant dans la croûte terrestre (8% de la masse, soit le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium). Mais il se trouve rarement sous sa forme pure et il est très difficile à extraire des roches qui le contiennent. Le principal minéral d'aluminium est la bauxite.

Aujourd'hui, la bauxite est principalement extraite dans les Caraïbes, en Australie et en Afrique.

La transformation de la bauxite en aluminium consomme beaucoup d'énergie électrique. La production d'une tonne d'aluminium requiert 4 à 5 tonnes de bauxite ainsi que de grandes quantités d'eau et de cryolite, le minéral servant de solvant. La transformation par électrolyse consomme entre 13000 et 17000kWh d'énergie, ce qui génère du dioxyde de carbone (CO₂).

Néanmoins, une fois produit, ce métal est facilement recyclable et son recyclage ne nécessite que 5% de l'énergie nécessaire à sa production.

La coque en aluminium d'un bateau de plaisance peut être très largement recyclée et réutilisée comme matière première (jusqu'à 95%).¹⁹

Les grades utilisés en construction nautique sont des alliages contenant principalement de faibles pourcentages des éléments suivants : manganèse, Cr, Ti, Zn, Fe, Si, Cu

Les séries 5000 contiennent 3 à 5% massique en magnésium et 0,1 à 1 % des autres éléments. Les séries 6000 contiennent moins de 5% massique au magnésium (<5% massique) et du silicium.

Il existe 3 grands types de construction aluminium en construction navale :

- Construction « tôles soudées »
- Construction « tôles sur membrures et lisses »
- L'aluminium épais – Strongall

A. Construction en tôles soudées :

La construction « tôles soudées » est utilisée pour la construction de barges, navires professionnels, petite plaisance (barques, pêches-promenade, etc.).

Cette construction est généralement utilisée sur des unités à coques développables (coques plates, à bouchains, etc.).

Les épaisseurs de tôles mesurent jusqu'à 10mm suivant le type, la taille du navire et la position des tôles (plus épais dans les fonds).

Exemples : Coqalu20 : plaisance voile/moteur et professionnels

B. Construction en tôles sur membrures et lisses :

La construction « tôles sur membrures et lisses » est utilisée pour la plaisance voile et moteur, yachts, navires professionnels etc.

Cette construction est utilisée généralement sur des unités de plus de 10 mètres à coques en forme. Elle génère cependant plusieurs inconvénients :

- Beaucoup de main d'œuvre, donc un coût de construction élevé.
- Soudures plus délicates sur les petits navires en raison de courbures plus accentuées.

Exemples : Chantier Alubat21 : voiliers grande croisière 10 à 20m

C. L'aluminium épais :

Ce procédé innovant (breveté, marque déposée) mis au point par le chantier META fait appel à des tôles d'aluminium zingué anti-électrolyse de forte épaisseur, pour la construction de formes (coque et pont) autoporteuses et sans structure.

Les tôles, d'une seule longueur, sont précontraintes et assemblées entre elles assemblées entre elles par pointage puis soudage.

La tension initiale dans les peaux de bordé induite par la précontrainte, associée à la forte épaisseur, assure une solidité aux chocs très importante.

Les constructions en Strongall possèdent une très bonne résistance à l'électrolyse grâce à son revêtement anti-électrolyse « Inversalu ».

Par rapport à une construction en alu fin et structuré « traditionnelle », les bordés aluminium sont 2,5 à 3 fois plus épais, et la prise de poids « relative » est en moyenne de l'ordre de + 20% d'aluminium ce qui représente moins de 5% sur le poids final.

Ce procédé convient parfaitement pour une fabrication en série ou une fabrication à l'unité sur plan. Il est particulièrement applicable aux navires professionnels de tailles réduites et moyenne (3 à 35 tonnes) dont l'usage est très rude. Ce procédé permet notamment d'obtenir un bateau plus résistant aux chocs (exemples : Objet Flottant Non Identifié (OFNI), glaces...)

Il est également très apprécié par les marins qui utilisent leurs bateaux comme domicile flottant et de plus économiquement très adapté aux tailles de navires évoluant entre 9 et 20m.

2.3.2 L'utilisation de l'aluminium en construction navale :

L'alliage d'aluminium mérite qu'on s'y intéresse dès la conception, car c'est une matière avec un important capital d'énergie emmagasinée pouvant être valorisée dans un nouveau cycle de vie. Ceci permet surtout à l'alliage léger de « rembourser » une lourde dette d'énergie et de CO₂ due à son extraction et à sa fabrication.

2.3.3 Sur le matériau :

Le point négatif est le coût énergétique de production du kg d'alliage d'aluminium (lingot) de première fusion. L'utilisation d'aluminium recyclé (dit de seconde fusion) peut permettre de réduire considérablement ce coût énergétique. Le recyclage de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 95 % d'énergie en moins et une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l'étape de l'électrolyse, qui réclame beaucoup d'énergie, on évite les rejets polluants qui lui sont associés.

En 2002, la production mondiale d'aluminium recyclé, était de 7,9 Mt sur un total de production d'aluminium de 33.8 Mt. C'est-à-dire que 23% de l'aluminium produit est issu du recyclage (2ème fusion). Cependant, pour l'instant, peu de projet tablent sur l'utilisation d'aluminium recyclé.

2.3.4 Sa construction :

La malléabilité et la légèreté de l'aluminium permettent une faible utilisation de l'énergie pendant la transformation des lingots en demi-produits et la mise en œuvre de ces demi-produits (usinage, chaudronnerie, etc.)

2.3.5 Usage :

Faible entretien nécessaire

2.3.6 Fin de vie et recyclage :

La caractéristique la plus intéressante de l'aluminium demeure sans aucun doute son potentiel de recyclage. Pour recycler l'aluminium, on le fait simplement fondre. Cependant, afin que cela soit possible, il est nécessaire que les composants soient facilement démontables et séparables. Les traitements de surface et peintures posent de gros problèmes, en particulier sur les coques en alliage en raison de la difficulté technique, donc du coût, à reconstituer des alliages de qualité à partir d'une matière recyclée polluée. Une coque en alliage d'aluminium devrait rester brute, à l'extérieur comme à l'intérieur.²³

L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités, à condition de ne pas fondre dans un même bain des alliages de composition différente.

2.4 Procédé de fabrication de bateau en acier

2.4.1 Le découpage :

La chaîne de montage d'un chantier naval part de l'aire de stockage de l'acier, où de grandes tôles de diverses qualités et dimensions sont entreposées et préparées en vue de leur mise en œuvre. L'acier est ensuite décapé pour recevoir une couche de fond qui assurera sa protection anticorrosion tout au long des différentes phases de la construction. Les tôles sont ensuite transportées vers une aire de fabrication où elles sont découpées aux dimensions voulues par oxycoupage à la flamme, cette opération est automatisée. Les feuillards ainsi obtenus sont assemblés par soudage pour former les éléments structuraux du navire.

2.4.2 Soudage et assemblage :

Les plaques de tôle sont ensuite envoyées aux ateliers de fabrication où elles sont assemblées en différentes unités et différents sous-ensembles. C'est à ce stade que les tuyauteries, les circuits électriques et les autres circuits de distribution sont mis en place et intégrés aux unités. Celles-ci sont assemblées par soudage automatique ou manuel, ou par une combinaison des deux techniques. On fait appel à plusieurs procédés de soudage, le plus courant étant le soudage à l'arc avec une électrode fusible enrobée qui constitue le métal d'apport. D'autres procédés de soudage à l'arc font appel à une atmosphère inerte de protection ou même à des électrodes réfractaires qui résistent à de très hautes températures.

Les unités ou les sous-ensembles sont habituellement transférés vers les zones d'assemblage en plein air où ils sont déposés en attendant d'être montés en ensembles plus importants. On procède ensuite à des opérations de soudage et d'ajustage complémentaires. Ces ensembles et plus spécialement leurs cordons de soudure sont soumis à des contrôles de qualité et à des tests par radiographie ou par ultrasons ainsi que, le cas échéant, à des essais destructifs ou non destructifs. Les soudures défectueuses sont éliminées par meulage, oxycoupage ou gougeage, puis refaites. Les éléments sont ensuite décapés au jet d'abrasifs, si nécessaire, pour être mis à leur gabarit, avant de recevoir une ou plusieurs couches de peinture.

2.4.3 La mise en peinture et les enduits de finition :

Des travaux de peinture s'effectuent dans quasiment tous les ateliers du chantier naval. La nature de la construction et de la réparation navales requiert plusieurs types de peinture dont chacun a des fins différentes. La peinture nécessaire pour un certain type d'application peut aller d'un produit à base d'eau à un enduit époxy à haute performance, le choix est fonction de l'environnement auquel le revêtement sera exposé. Quant au matériel de peinture, il s'étend des simples brosses et rouleaux aux pistolets sans air comprimé et aux machines automatiques. En règle générale, les parties ci-après d'un navire exigent une mise en peinture :

- Sous la flottaison (œuvres vives, carène).
- Ligne de flottaison.
- Superstructures des œuvres mortes.
- Espaces intérieurs et citernes.
- Pont supérieur.
- Équipement mobile.

Il existe différents types de peinture pour chacune de ces parties. De nombreuses considérations entrent en jeu lors du choix des peintures, telles que les normes d'hygiène du travail, la gravité des risques liés à l'environnement, les temps de séchage, le matériel à disposition et les procédés d'application. De nombreux chantiers navals sont pourvus

d'installations spéciales et de zones réservées pour les travaux de peinture. Les installations fermées de mise en peinture sont onéreuses, mais permettent d'obtenir une qualité et un rendement plus élevés. Les travaux de peinture réalisés à l'air libre ont généralement une moins grande efficacité de transfert et ne peuvent s'effectuer que si les conditions atmosphériques sont favorables.

2.4.4 L'armement

L'armement des blocs de construction avant leur assemblage et la méthode qu'utilisent actuellement tous les constructeurs qui se veulent concurrentiels de par le monde. Le processus consiste à installer les pièces requises (tuyauteries, conduits de ventilation, composants électriques, etc.) sur les blocs avant que ceux-ci ne soient assemblés, ce qui permet d'adopter au chantier naval une approche du type « chaîne de montage ».

A chaque étape de la construction, l'armement est planifié pour qu'il se déroule de façon continue et régulière sur l'ensemble du chantier. Une fois assemblée la structure d'acier du bloc, on peut, pour simplifier, diviser l'armement en trois étapes principales :

- Armement de l'unité.
- Armement sur bloc.
- Armement à bord.

L'armement des unités est l'étape au cours de laquelle les accessoires, pièces, machines et autres matériels d'armement sont montés de façon autonome, en d'autres termes, les unités sont préparées à distance des blocs structurels d'acier, ce qui permet aux travailleurs d'assembler leurs composants au sol où ils peuvent accéder aisément aux machines et aux ateliers. Les unités sont ensuite installées au cours de l'une ou l'autre étape de construction, sur bloc ou à bord. Ces unités peuvent être de taille, de forme et de complexité très diverses. Dans certains cas, une unité n'est rien d'autre qu'un ventilateur raccordé à un plénum. Les unités complexes de grande taille se rencontrent principalement dans les salles des machines, les chaufferies, les chambres des pompes ou d'autres compartiments du navire difficiles d'accès. Les salles des machines possèdent un armement intensif. L'armement au sol accroît la sécurité et l'efficacité dans la mesure où l'on économise des heures de travail qui, autrement, auraient été consacrées à l'armement sur bloc ou à bord dans des espaces exigus où le travail est plus difficile.

Dans l'armement sur bloc, la plus grande partie du matériel d'armement est installée sur les blocs. Ce matériel est constitué par les circuits de ventilation, les canalisations, les portes, les installations d'éclairage, les échelles, les garde-corps, les installations électriques, etc. De nombreuses unités sont aussi posées pendant l'étape d'armement sur bloc. Tout au long de cette étape, un bloc peut être soulevé, tourné et déplacé afin de faciliter l'installation des matériels

d'armement au niveau des plafonds, des cloisons et des planchers. Tous les ateliers et services du chantier doivent rester en communication pendant l'étape d'armement sur bloc afin de garantir l'installation des matériels à l'endroit voulu et au moment opportun.

L'armement à bord s'effectue après que les blocs ont été hissés sur le navire en construction (c'est-à-dire après leur assemblage). A ce moment précis, le navire se trouve sur une aire de construction ou à quai. L'armement des blocs est déjà bien avancé, mais il reste encore beaucoup de travail à accomplir avant que le navire ne soit opérationnel. L'armement à bord comprend l'installation à bord d'unités et de blocs de grandes dimensions. Il comporte le soulèvement et la mise en place de blocs et d'unités de gros gabarit à bord du navire neuf et leur soudage ou leur boulonnage sur place. L'armement à bord inclut également l'interconnexion des systèmes de bord (tuyauteries, système de ventilation, circuits électriques, etc.). C'est au cours de l'étape d'armement à bord que la totalité des câblages sont mis en place sur l'ensemble du navire.

2.4.5 Les essais et épreuves

Ces essais et épreuves (dits de recette ou de réception) ont pour but de vérifier le bon fonctionnement des éléments et des systèmes installés. Si leurs résultats ne sont pas concluants pour une raison quelconque, les défauts constatés doivent être corrigés et le système testé jusqu'à ce qu'il soit en parfait état de marche. Toutes les canalisations du bord seront mises sous pression afin de localiser les fuites éventuelles. Les citernes sont elles aussi soumises à des essais qui consistent à les remplir de liquide (par exemple, d'eau salée ou d'eau douce), à les inspecter et à tester leur intégrité structurelle. Les circuits de ventilation, les circuits électriques et beaucoup d'autres systèmes sont également vérifiés. La plupart des essais et des épreuves s'effectuent alors que le navire est posté à quai, toutefois, on tend de plus en plus à les pratiquer à des stades antérieurs de la construction (par exemple, dans les ateliers de production). La réalisation d'essais au cours des étapes plus précoces de la construction permet de mieux réparer les défaillances techniques grâce à un accès plus aisé aux systèmes testés, bien que l'essai complet des systèmes doive toujours être réalisé à bord. Une fois tous les essais préliminaires accomplis à quai, le navire est soumis à une série de tests opérationnels complets en mer avant d'être livré à l'armateur.

2.5 Procédé de fabrication en matériaux composites : (9)

2.4.6 Construction des moules :

On construit tout premièrement le moule qui se divise généralement en deux : moule de coque et moule de pont. Selon la structure architecturale du bateau, on distingue d'une part les bateaux dits à "coque ouverte" ou "monocoque" n'admettent pas de pont sur sa structure, et d'autre part ceux avec pont, appelés bateau à structure "pont-coque".

La coque est la partie enveloppe externe ou carcasse du bateau, jouant le rôle de protection et constitue également le flotteur, tandis que le pont est la pièce interne en forme de cloche élargie juste en dessus et, contre la coque, il porte les superstructures du navire et entre ces deux pièces se trouve la cale.

Comme le cas de notre étude, le bateau monocoque, on construit au fond de la coque une pièce appelée plancher, ce qui permet d'alléger la structure.

Le moule de coque est obtenu par stratification de la pièce mère ou matrice qui est un modèle en bois, conforme à la coque du bateau et que l'on appelle prototype. La forme de la coque est donc reprise en inverse sur la face intérieure du moule, c'est pour cela qu'on le nomme pièce négative. Et c'est à partir de ce moule qu'on a la possibilité de faire la production en série.



Figure 24: moule coque de bateau

2.4.7 Cirage :

L'application de la cire sur la surface du moule est fondamentale, surtout aux premiers tirages de pièce. Le but c'est d'éliminer les micropores sur la surface du moule et de la garder lisse afin de faciliter le démoulage.

On applique sur la surface bien sèche et propre du moule 4 à 6 couches de cire pour la première utilisation et on peut diminuer le nombre de couche pour la suite, soit 1 ou 2 couches de cire. L'intervalle de temps entre deux applications de couche de cire est de 3 heures au minimum.

2.4.8 Lustrage :

À l'aide d'une pâte à lustrer, on lustre au chiffon doux le moule ciré avant l'application de la couche de cire suivante ou bien avant la stratification. Ainsi, le moule sera gardé lisse et brillant.

2.4.9 Application de gelotât :

Comme indiqué sur la Figure, l'application du gelcoat, ajouté d'une dose équilibrée de catalyseur, se fait par pistolet. Pour atténuer sa viscosité, on le mélange avec une quantité mesurée à quelques pourcentages de diluant comme l'acétone. Tous les coins et recoins doivent être parfaitement recouverts tout particulièrement les endroits soumis à contraintes comme le fond de caisse. On doit bien couvrir toute la surface du moule à reproduire et de ne pas être avare en épaisseur de résine.

Le gelcoat a la particularité d'être étanche à l'eau et de présenter une surface en parfaite copie de son moule

En moyenne on applique 500 gr de gelcoat par m² de surface et la durée de polymérisation est demi-journée

2.4.10 Stratification ou moulage :

C'est l'opération, après le gelcoat, qui consiste à appliquer successivement sur la surface du moule quelques couches de fibres de verre intercalées de la résine polyester. On obtient ainsi le stratifier.

L'épaisseur e du stratifié varie de 6 à 8 mm pour les bateaux de longueur inférieure ou égale à 8m.

Juste avant la stratification, on ajoute du catalyseur à la résine avec une quantité de 1 à 2% de celle de la résine afin que la polymérisation commence tout de suite au moment de la pose.

Ainsi, on applique premièrement une couche de résine sur le moule gelocaté, suivie de deux couches de mat 300, chaque couche de renfort de fibre doit être imprégnée de résine.

Ensuite, avec un rouleau débulleur, on veillera à ne laisser aucune bulle d'air entre le tissu et le gelcoat et tous les interstices seront bien imprégnés. Si le tissu gonfle, de l'air est emprisonné et sera libéré par un coup de cutter dans le tissu et une bonne imprégnation de résine.

Après durcissement (30 minutes environ), on procède de la même manière pour les couches suivantes : les roving 600, en deux ou trois couches. S'il y a de grandes parties sèches, une couche de résine supplémentaire sera appliquée avant la pose du roving car on obtient une meilleure imprégnation si la résine est aspirée et non refoulée à travers le renfort.

Il faut remarquer que pour les parties soumises à plus de contraintes (tableau arrière, pont...), on intercale entre les couches de mat et de renforts en roving 1 à 3 couches en contreplaqué selon la charge à supporter par la surface considérée et en sachant que l'épaisseur d'un stratifié des bateaux de longueur inférieure à 8 mètre doit être comprise entre 6 et 10 millimètre.

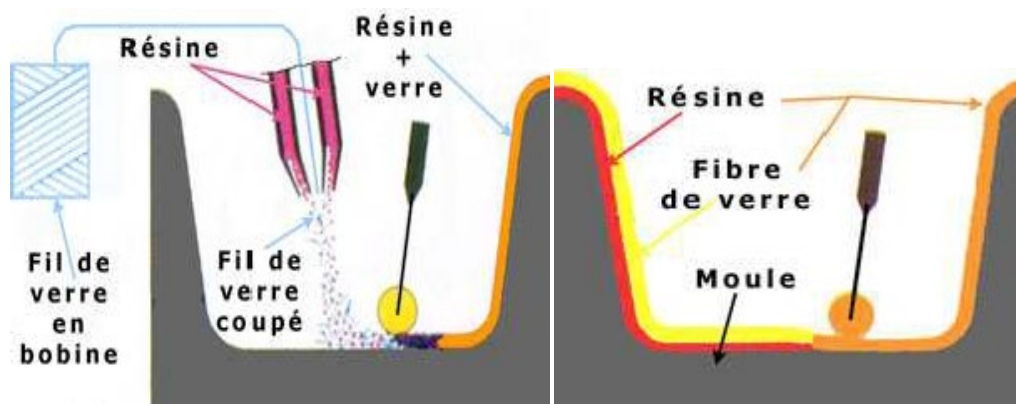
Mélanger directement accélérateur et catalyseur entre eux peut provoquer une explosion.

Le rapport approximatif résine/fibre de verre pour le mat est de 2,5 : 1 en poids (30% de fibre de verre) alors que pour le RT, il est de 1,25 : 1 (45% de fibre de verre).

Pratiquement, on distingue deux façons de stratification :

- Le moulage "en contact" consiste à appliquer, avec un rouleau ou un pinceau spécifique, de la résine polyester sur une bande de tissu de verre jusqu'à l'imprégnation complète des fibres de verre. Une fois le tissu de verre correctement imbibé, on extrait les bulles d'air prisonnières du tissu enduit avec un rouleau dit "débulleur". Cette opération est primordiale car elle garantit l'isotropie du stratifié et donc ses qualités mécaniques. Cette méthode reste très usitée pour de petites pièces ou pour des surfaces.
- Le moulage dit par "projection simultanée" : on projette directement du fil de verre coupé issu d'une bobine avec une machine à projeter, équipée d'un pistolet à air comprimé et de couteaux rotatifs.

La figure suivante nous donnent l'idée du moulage : en haut à gauche par projection, à droite et en dessous, la stratification au contact.



2.4.11 Démoulage :

Une journée après la stratification, on procède au démoulage. On fait l'opération par air comprimé issue d'un trou de démoulage du stratifié, après avoir enfoncé des coins de démoulage (en plastique ou bois) sur le pourtour moule – pièce, tout en retirant la pièce par l'intermédiaire d'un palan de relevage.

2.4.12 La finition :

➤ Le ponçage à l'eau :

On utilise du papier à poncer, gardé constamment mouillé en rinçant continuellement la surface à l'eau. On passe ensuite au polissage de la surface.

➤ Le polissage :

Il s'effectue avec une pâte à polir contenant de fines particules (grains) après avoir bien dégraissé la surface à polir par de l'acétone. Il serait plus performant d'utiliser une lustreuse.

En tout, les bateaux en polyester peuvent durer plus de 20 à 30 ans à l'air marin avec des entretiens périodiques.

2.5 Flottabilité et stabilité d'un bateau :

2.5.1 Qu'est-ce que la flottabilité :

Dans un fluide (gaz ou liquide), les corps sont soumis à la poussée d'Archimède. Les corps ont une flottabilité différente selon leur masse volumique et donc leur densité.

La flottabilité est la poussée verticale, dirigée de bas en haut, qu'un fluide (gaz ou liquide) exerce sur un volume immergé. La flottabilité agit toujours dans la direction opposée à la gravité.

Selon la différence entre la poussée d'Archimède PA et le poids réel Pr , on distingue les corps de flottabilité :

- Positive ($PA > Pr$) : l'objet remonte
- Nulle ($PA = Pr$) : l'objet flotte entre deux eaux
- Négative ($PA < Pr$) : l'objet coule.

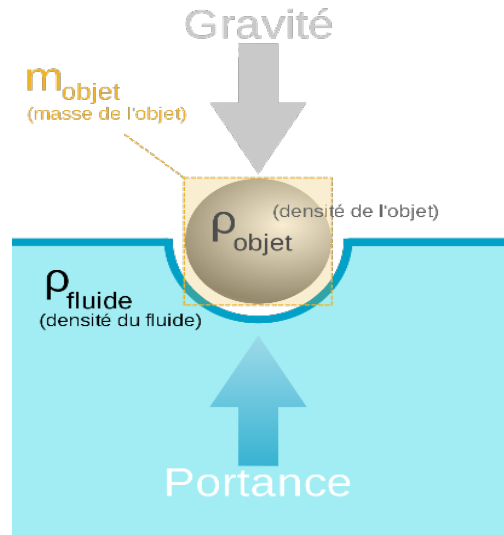


Figure 25: flottabilité d'un corps

2.5.2 La poussée d'Archimède et son principe :

2.5.2.1 Définition :

La poussée d'Archimède est la force particulière que subit un corps plongé en tout ou en partie dans un fluide (Liquide ou gaz) soumis à un champ de gravité. Cette force provient de l'augmentation de la pression du fluide avec la profondeur, la pression étant plus forte sur la partie inférieure d'un objet immergé que sur sa partie supérieure, il en résulte une poussée globalement verticale orientée vers le haut. C'est à partir de cette poussée qu'on définit la flottabilité d'un corps.

2.5.2.2 Formulation du théorème d'Archimède :

Le théorème d'Archimède est la force que subit un corps plongé partiellement ou entièrement dans un liquide ou un gaz qui est soumis à un champ de gravité. Cette force provient de l'augmentation de la pression du fluide avec la profondeur, ce phénomène provient aussi du cru d'Archimède et s'appelle l'hydrostatique. La pression étant plus forte sur le bas d'un objet immergé que sur le haut. Ceci forme une poussée verticale orientée vers le haut. La poussée d'Archimède est donc la force contraire à la gravité. C'est à partir de cette poussée qu'on définit la flottabilité d'un corps.

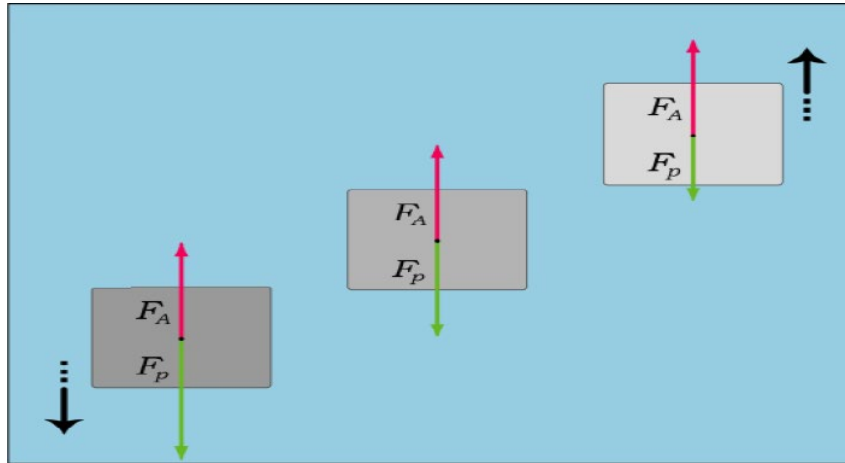


Figure 26: illustration sur la poussée d'Archimède :

F_A représente la poussée d'Archimède et F_P la force gravitationnelle. Lorsque la force gravitationnelle est supérieure à celle d'Archimède, le corps coule. Lorsque les deux forces sont égales, le corps reste immobile. Finalement, quand la poussée d'Archimède est plus élevée que la gravité, le corps flotte.

Si la densité du solide est supérieure à celle du fluide, alors $F_P > F_A$ et la solide coule.

Si la densité du solide est égale à celle du fluide, alors $F_P = F_A$ et le solide demeure immobile, il est en équilibre neutre ou indifférent.

Si la densité du solide est inférieure à celle du fluide, alors $F_P < F_A$ et la solide remonte vers la surface.

2.5.2.3 Caractéristiques de la poussée d'Archimède sur les bateaux : (4)

La poussée d'Archimède (F_A), exercée sur un navire par l'eau de masse volumique ρ_{eau} , est une force dont les caractéristiques sont :

- Le point d'application : le centre de gravité du volume immergé, que l'on appelle le centre de carène pour les navires, noté C ou B en anglais (Buoyancy qui signifie flottabilité en anglais)
- La direction : la verticale
- Le sens : vers le haut
- La valeur : $F_A = m_{\text{eau déplacée}} * g = \rho_{\text{eau}} * V_{\text{carène}} * g$

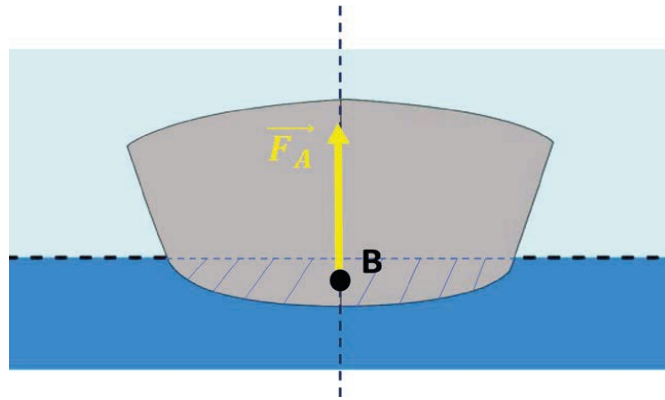


Figure 27: représentation de la poussée d'Archimède sur un bateau

2.5.3 La stabilité :

2.5.3.1 Qu'est-ce que la stabilité : (2) et (3)

La stabilité est la capacité d'un navire à revenir à une position droite après que les éléments extérieurs : vent, houle ; ou les manœuvres : giration, prise de chargement... l'en ont écarté.

La stabilité est jugée suffisante si le navire garde cette capacité dans toutes les situations rencontrées dans des conditions normales de navigation.

Trois facteurs peuvent affecter la stabilité :

- Le chargement du navire,
- La présence de couples extérieurs perturbateurs
- Des conditions inadaptées de navigation.

Les deux premiers facteurs sont pris en compte dans l'étude de la stabilité statique.

Le troisième facteur est considéré dans l'étude de la stabilité instantanée.

Le navire subit l'action de deux forces égales et opposées formant un couple : son poids et les forces de flottaison. Ce couple est à priori déstabilisant car généralement le centre de gravité est au-dessus du centre de flottaison qui est le point d'application des forces de flottaison.

En fait lorsque le navire s'incline, une partie du volume immergé sort de l'eau sur un bord tandis que sur l'autre bord un volume équivalent s'immerge. L'action de ces deux volumes crée un couple stabilisant qui sera suffisant si G n'est pas trop élevé au-dessus de B.

Ce phénomène revient à prendre en compte le déplacement du centre de flottaison qui en venant en abord crée un couple de redressement avec le poids.

Remarque importante :

Le couple de redressement n'existe que si la carène traverse la surface libre, il est nul pour un sous-marin en plongé pour lequel G doit être impérativement au-dessous de B. Pour un navire, il peut diminuer notablement et devenir insuffisant si une partie du pont est sous l'eau et donc une partie de la carène est immergée.

2.5.3.2 Centre de gravité d'un bateau :

Le centre de gravité transversal G d'un corps peut être défini comme :

- Le point où la force de gravité agit verticalement vers le bas
- Le point où on peut mettre un pivot qui gardera le corps en équilibre
- Le centre géométrique d'un corps uniforme.

Pour un navire, le centre de gravité est le point où on applique la force verticale agissant vers le bas générée par la masse du navire. La position du centre de gravité changera en fonction des conditions de chargement du navire.

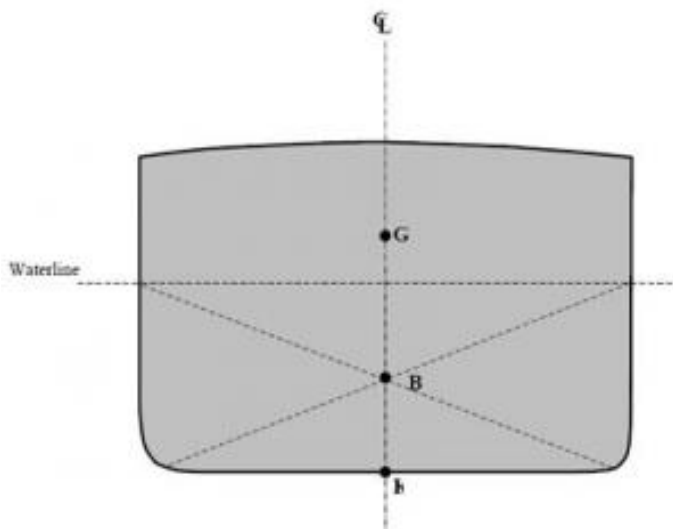


Figure 28:centre de gravité d'un bateau

Autrement dit : la masse totale du navire est supposée être concentrée sur un seul point, le centre de gravité G

Remarque :

Effets des modifications de chargement : La hauteur du centre de gravité dépend de la distribution verticale des masses mobiles du navire telles la cargaison, le carburant et le ballast. La hauteur du centre de gravité est mesurée à partir du point de référence K. La hauteur du centre de gravité sera identifiée comme le KG d'un navire.

Pour qu'un navire flotte sans angle de gîte, il faut que le point G soit dans le même axe vertical que K. Dès que le G quitte cet axe vertical, un angle de gîte se produira et le navire ne flottera plus en position droite.

Le centre de gravité peut donc être déplacé en hauteur et en largeur en transférant, en ajoutant ou en enlevant des masses mobiles.

Si on ajoute des masses sur un navire, le centre de gravité se déplacera vers la position de la masse ajoutée. Par exemple, le carburant ajouté dans les réservoirs de double fond d'un navire abaissera le centre de gravité. Le chargement de cargaison en pontée fera généralement monter le G du navire. Une concentration de cargaison du côté bâbord du navire entraînera un déplacement du G vers bâbord, ce qui causera une gîte vers bâbord.

Déplacement du G selon le déplacement des charges :

L'inverse est vrai lorsqu'on enlève des masses mobiles. Par exemple, la consommation de carburant diminue la masse dans les réservoirs d'entreposage, et si ces réservoirs sont dans les double fonds, la perte de masse entraînera le G vers le haut. Si la cargaison en pontée est déchargée, le G sera déplacé vers le bas. Un déchargement de cargaison du côté tribord fera déplacer le G vers bâbord, ce qui développera une gîte bâbord.

Si on transfère une masse déjà à bord, la position du centre de gravité du navire se déplacera dans la même direction que celle du transfert. Par exemple, un transfert de ballast de bâbord vers tribord déplacera le G vers tribord, ce qui aura tendance à causer une gîte tribord.

Important :

- G ne se déplace pas lorsque le navire est incliné sous l'effet d'une force externe
- G dépend des masses chargées, mais le plus important encore, de la répartition de ces masses à bord du navire

2.5.3.3 Centre de carène (B) :

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

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

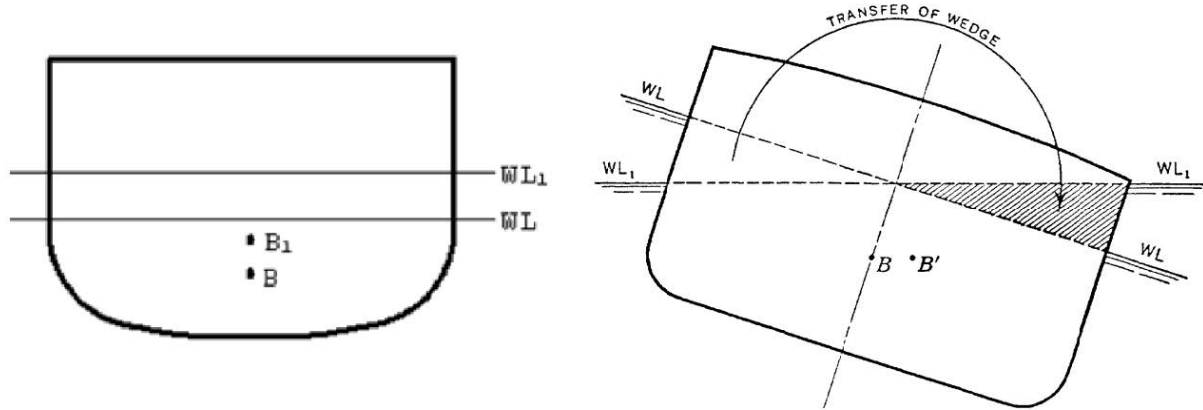


Figure 29: déplacement du centre de la carène

Si le navire flotte sans gîte, la construction symétrique du navire fera que le point B sera dans le même axe que K et G. La seule façon de déplacer le centre de carène transversal, c'est d'incliner le navire. La surface immergée sera de forme différente, le point B se déplacera pour atteindre le nouveau centre géométrique de la surface transversale immergée. Comme la position de B est fonction uniquement de la géométrie de la section transversale, si la forme de la coque est connue, il est facile d'identifier la position de B selon les conditions de chargement et de gîte. Si un navire flotte droit, les points K, G et B seront tous dans le même axe vertical. Si par l'action d'une force extérieure (vent, vague, amarre tendue sur le quai) le navire s'incline, le G ne devrait pas changer de place (il n'y a pas eu de déplacement de masse) mais, le B se déplacera pour atteindre le centre géométrique de la nouvelle surface immergée. Les points B et G ne seront plus dans le même axe vertical, on aura alors le poids du navire qui agira vers le bas au point G et la force de flottaison qui agira vers le haut à partir du point B1.

2.5.3.4 Le métacentre :

Pour l'équilibre du navire, ce qui importe n'est donc pas le centre de carène lui-même, mais le métacentre de carène, qu'on définit comme l'intersection des axes d'application de la force d'Archimède pour de petites variations d'inclinaison, ou, autrement dit, le point où la résultante de la pression que l'eau exerce sur le navire rencontre le plan médian de celui-ci. En réalité ces différents axes ne se coupent pas forcément strictement mais en première approximation on peut toujours définir un métacentre de carène transversal m (pour le roulis) et un métacentre de carène longitudinal M (pour le tangage), pour chaque situation du navire ; ces métacentres dépendent de l'inclinaison et l'enfoncement du navire.

Un métacentre de carène est toujours au-dessus du centre de gravité (G) d'un navire, alors que le centre de carène est fréquemment au-dessous de ce dernier. Plus le métacentre de carène sera haut, plus la stabilité de forme du navire sera grande.

Ainsi la distance entre G et M qu'on identifiera comme la distance GM qui appelé aussi hauteur métacentrique.

2.5.3.5 Rayon métacentrique :

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

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

$$R = \frac{I}{\nabla}$$

R est le rayon métacentrique, I est le moment quadratique de la surface de flottaison par rapport à son axe d'inclinaison (exprimé en m^4) et ∇ le volume de carène (exprimé en m^3).

2.5.4 Théorème d'Euler :

L'intersection de deux flottaisons isocarènes infiniment voisines passe par le centre de gravité de chacune de ses flottaisons.

L'intersection de deux surfaces de flottaisons isocarènes détermine un axe d'inclinaison autour duquel pivote le navire et cet axe d'inclinaison passe par le centre de gravité de chacune de ces surfaces de flottaison. Chaque surface de flottaison possède une infinité d'axe d'inclinaison mais chacun d'eux passe par le centre de gravité de cette surface.

Dans la figure ci-contre f_0-l_0 et f_1-l_1 sont les surfaces de flottaison isocarènes. Ces deux surfaces se coupent en A qui est sur l'axe d'inclinaison.

On appelle Plan d'inclinaison tout plan perpendiculaire à l'axe d'inclinaison.

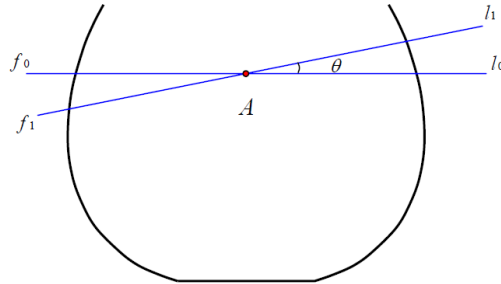


Figure 30: intersection de deux flottaisons isocarène

2.5.4.1 Couple de redressement :

Le graphique de la Figure 31 montre un corps flottant incliné d'un angle θ par rapport à sa position d'équilibre. On est en présence de 2 flottaisons isocarènes et le centre de carène B0 se déplace en B1. Alors que le poids du navire $+P$ s'applique toujours depuis son centre de gravité G (inchangé) et de façon verticale par rapport à la nouvelle flottaison, la poussée d'Archimède $-P$ s'applique aussi verticalement mais à partir de B1.

Il en résulte la création d'un couple qui tend à redresser le navire et de valeur: $M = p * GZ$

, où la distance GZ représente le bras de levier du couple de redressement.

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

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

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

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

Dans les calculs de stabilité initiale, nous travaillons sur des petits angles d'inclinaison ($\theta \leq 10^\circ$) pour lesquels nous admettons en première approximation que la hauteur métacentrique h est égale au rayon métacentrique R. C'est à dire que le centre de carène B se promène sur un arc de cercle centré en m et de rayon égal au rayon métacentrique initial R.

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

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

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

Ce couple de redressement peut être décomposé en :

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

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

- De la forme de la carène au niveau de la flottaison. En effet la valeur du couple de redressement dépend du rayon métacentrique r et compte tenu de la formule de Bouguer, elle dépend donc du volume de carène mais aussi de la forme de la surface de la flottaison (servant au calcul de l'inertie I de la surface). Plus la surface de flottaison est grande, plus le rayon métacentrique sera grand et plus le couple de redressement sera fort. Pour la même raison, quand il est impossible d'abaisser la position du centre de gravité (pour augmenter la valeur de $(r - a)$), il est malgré tout possible d'augmenter la stabilité transversale d'un navire en lui augmentant sa surface de flottaison, c'est à dire en lui pratiquant un « soufflage » de sa coque consistant
- De la répartition des poids dans le navire. Plus le centre de gravité sera bas dans le fond de la cale, plus la valeur de B_0G sera faible et plus le couple de redressement sera fort.

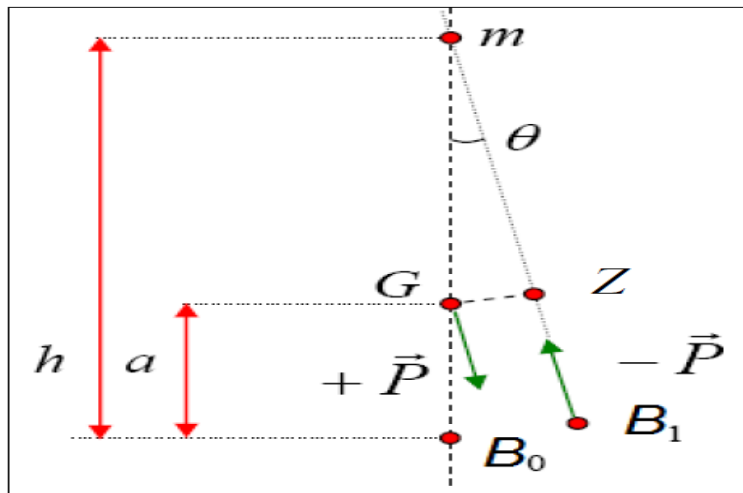


Figure 31: couple de redressement

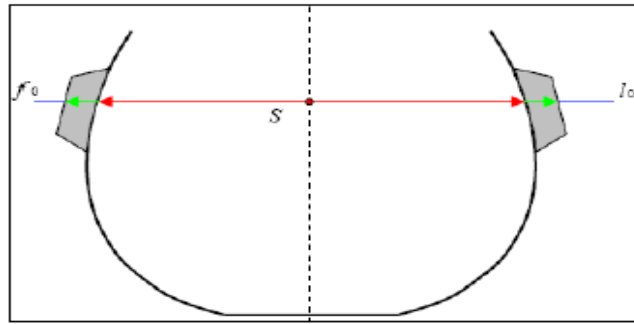


Figure 32: soufflage de la coque

2.5.4.2 Courbe de stabilité :

C'est la représentation graphique du couple de redressement $(h - a) * \sin\theta$ en fonction de l'angle d'inclinaison θ pour un déplacement donné et une position donnée du centre de gravité.

Pour la tracer, il faut disposer des valeurs suivantes :

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

Pour le navire à l'état initial, sans gîte, ces valeurs sont données dans les tables hydrostatiques. On obtient alors la valeur de $r-a$ (distance Gm de la Figure 31 pour $\theta = 0^\circ$) qui nous donnera la pente initiale de la courbe (voir Figure 34).

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

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

Dans la Figure 33, le bras de levier qui nous intéresse pour tracer la courbe de stabilité est la valeur de $GZ = (h - a) * \sin\theta$, ici on a : $GZ = KN - x$ ou $x = KN * \sin\theta$

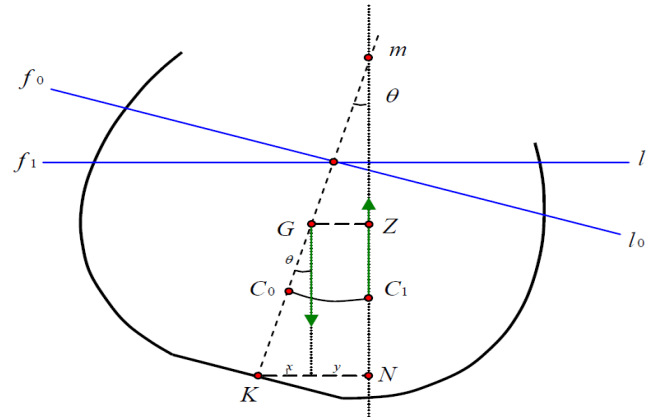


Figure 33: inclinaison d'un bateau

Le rapport d'essai de stabilité fait après construction et durant l'essai du navire nous permet de connaître la position du centre de gravité du navire lège par rapport à une ligne de référence (la quille). Il suffit ensuite de tenir compte de tous les autres poids ajoutés (lest, approvisionnements, marchandises, etc.) avec leurs positions par rapport la quille pour avoir la position du centre de gravité résultant (valeur KG) qui, une fois calculée, reste constante pour un état de chargement donné. Donc pour ce chargement précis, la valeur KG est connue et pour chaque valeur d'inclinaison θ , on connaît x . Le calcul du bras de levier GZ se résume donc à connaître la valeur KN pour chaque inclinaison. Des courbes pantocarènes, on en tire pour un volume de carène donné, la valeur de KN pour différents angles d'inclinaison et on en déduit facilement les différentes valeurs de

$$GZ = KN - x$$

Sur la Figure 33, pour l'angle d'inclinaison de 1 radian ($57,3^\circ$) en abscisse, on porte la valeur initiale du bras de levier (r-a) pour une inclinaison nulle calculée plus haut. On porte ensuite aux différents angles les valeurs de GZ. La courbe à son départ, tangente la droite tracée en premier.

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

redressement, mais de chavirement. Le navire chavire et rejoint sa position d'équilibre, quille en l'air.

Il est essentiel de rappeler qu'à chaque état de chargement du navire correspond une courbe de stabilité spécifique car le bras de levier de redressement dépend de la position du centre de gravité (donc du chargement) et de la position du centre de carène (donc du volume de carène).

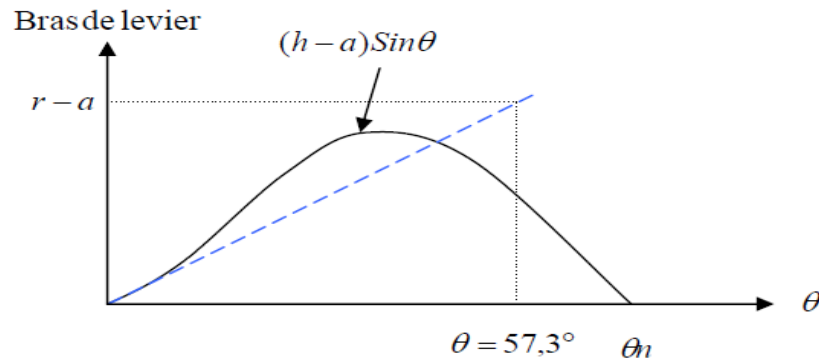


Figure 34: courbe de stabilité

C'est le travail nécessaire à appliquer sur le navire pour le faire chavirer. Cette réserve est représentée dans notre Figure 34 par l'air comprise sous la courbe pour les valeurs positives de bras de levier. Généralement, on limite la valeur de l'angle d'inclinaison à l'angle d'envahissement qui est l'angle maxi par lequel le navire coulerait s'il y a une entrée d'eau.

2.5.4.3 Déplacement vertical de poids

Si on déplace à bord un poids vers le haut, on crée un couple de chavirement. Dans la Figure 35 ci-contre, on suppose le navire incliné d'un angle θ (inclinaison sur tribord). Si on déplace verticalement le poids p du point A au point B, on voit que le couple tend à augmenter la gîte. Le moment de ce couple a pour valeur $pz \sin \theta$.

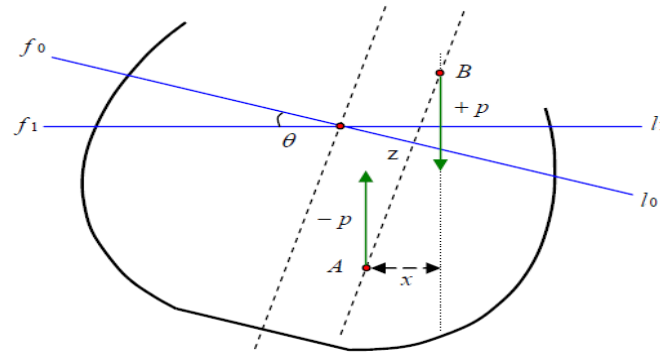


Figure 35: inclinaison sur tribord

Pour obtenir la courbe de stabilité résultante, il faut, pour chaque angle d'inclinaison θ , déduire du moment de redressement initial du navire le moment de ce couple de chavirement. Si la stabilité initiale du navire est bonne et que le poids déplacé est faible (courbe bleue de la Figure 36), le moment de redressement reste positif et le navire reste droit. Si elle est insuffisante ou si le poids déplacé est important (courbe rouge de la Figure 36), le moment du couple de chavirement est supérieur au moment du couple de redressement et le couple résultant est un couple de chavirement. Le navire va s'incliner d'un angle θ_0 (intersection de la courbe de stabilité avec la courbe du moment du couple parasite) où il retrouvera une position stable. Dans le graphique ci-dessous qui représente ces 2 cas de figure, cela peut aussi se résumer en fait à abaisser la courbe de stabilité initiale de la valeur du moment du couple de chavirement parasite.

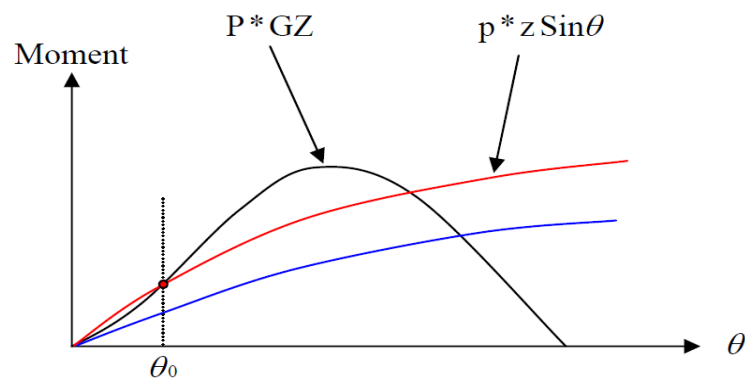


Figure 36: courbe de stabilité " poids déplacé différent"

2.5.4.4 Déplacement transversale du poids :

Dans la Figure 37, à partir d'une position initiale droite et stable du navire (flottaison folo), on déplace un poids p du point A au point B. On crée un couple inclinant de valeur $px * \cos \theta$. La courbe résultante sera la différence des deux. Le navire s'incline et trouve une position d'équilibre avec une gîte résiduelle θ_0 (intersection de la courbe de stabilité et de la courbe du moment du couple perturbateur)

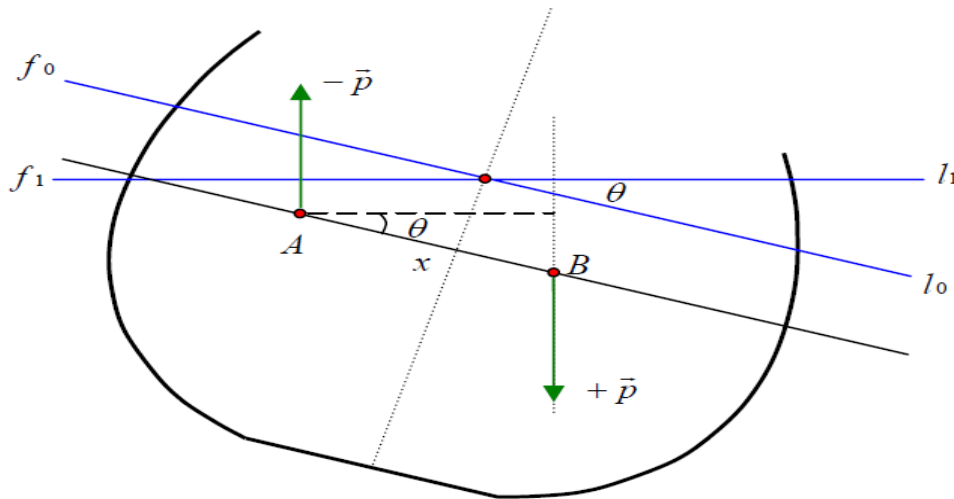


Figure 37: déplacement d'un poids du point A à un point B

2.5.4.5 Carène liquide

Ici aussi on a un couple perturbateur en « $\sin \theta$ » et le résultat est similaire au précédent. Si le navire gîte pour une raison quelconque avec de l'eau en fond de cale (zone ombrée en gris sur la Figure 38), celle-ci se déplace du côté où l'on gîte (zone en bleu). Ce mouvement interne d'eau crée un couple de chavirement tendant à augmenter la gîte du navire.

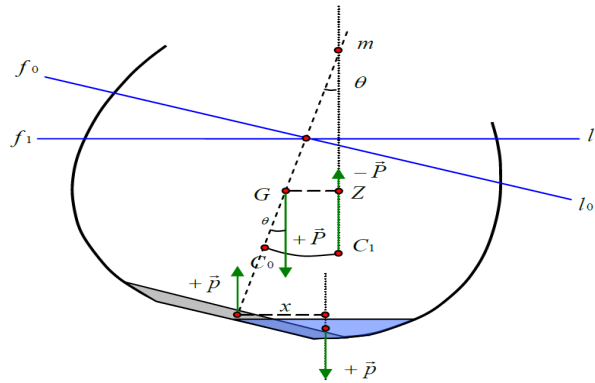


Figure 38: carène liquide

2.5.5 Stabilité longitudinale :

Les principes de la stabilité transversale s'appliquent en partie pour faire la stabilité longitudinale. Les points K, G, B, et M, qui se retrouvent en stabilité transversale, seront utilisés avec une coupe longitudinale du navire. Ils deviendront les points GL, BL et ML.

Le métacentre longitudinal (ML) est trouvé de la même façon qu'en stabilité transversale. Il sera situé à l'intersection des verticales passant par les points BL et BL1 lorsque l'assiette est modifiée.

En stabilité longitudinale, l'assiette peut être considérée comme l'équivalent de la gîte en stabilité transversale. L'assiette représente l'inclinaison longitudinale du navire et au lieu d'être exprimée en degrés, elle est donnée en différence des tirants d'eau avant et arrière.

Si le tirant d'eau est plus grand en arrière qu'en avant (situation habituelle), on dit que l'assiette est positive, lorsque le tirant d'eau est plus prononcé à l'avant, l'assiette sera négative.

2.6 Le système propulsif d'un bateau : (2)

Il est essentiel de choisir le bon système de propulsion d'un bateau. Le moteur en-bord est un système de propulsion marine pour bateaux. Par opposition à un moteur hors-bord où le moteur est monté à l'extérieur de la coque du bateau

2.6.1 Le système de propulsion hors-bord :

Un moteur hors-bord est un système de propulsion utilisé sur des bateaux. Il contient en un seul bloc, le moteur à explosion, la transmission et l'hélice propulsant le bateau. Sur certains moteurs (en général moins de 10 chevaux), ils contiennent même un réservoir. Leur puissance varie de 0,5 à 300 chevaux, pour les moteurs 2 temps et 4 temps.

2.6.2 Le système de propulsion en-bord :

Généralement utilisé sur les grands navires. Le moteur in bord est logé à l'intérieur de la coque dans un compartiment couvert et aéré. Il actionne l'hélice immergée par l'intermédiaire d'un arbre de transmission installé longitudinalement, avec un gouvernail qui sert à diriger le bateau. Les moteurs en-bord peuvent être de différents types, adaptés à la taille des bateaux qu'ils sont installés sur. Les bateaux peuvent utiliser le moteur d'un cylindre aux moteurs V12, selon s'ils sont utilisés pour la course ou la traîne.

Pour les bateaux de plaisance, comme les voiliers et les bateaux de vitesse ou les bateaux de pêche, les moteurs diesel et à essence sont utilisés. Beaucoup de moteurs en-bord sont dérivés de moteurs automobiles, connu sous le nom des moteurs automobiles marins.

2.6.3 Choix du moteur :

Pour choisir la puissance qui convient le mieux à notre bateau, nous devons tenir compte du poids et des dimensions du bateau, sans oublier d'inclure le poids des passagers, du carburant et du matériel de bord.

Une bonne façon de procéder consiste à se rapprocher de la puissance maximale pour laquelle le bateau a été homologué.

Le poids du bateau et sa puissance influent sur les performances que nous obtiendrons. Si le bateau manque de puissance, le moteur devra travailler plus fort que prévu, ce qui peut entraîner des frais d'entretien plus élevés.

Par contre, si le bateau est trop puissant, nous risquons de dépasser la vitesse maximale sécuritaire pour laquelle il a été conçu. Vous trouverez chez le détaillant et chez le constructeur la puissance recommandée pour chacun des modèles qu'ils proposent.

Pour obtenir la meilleure performance possible pour le bateau, il est important que les points suivants soient considérés lors du choix du moteur :

- Type du bateau, vitesse et la mode d'utilisation.

- Choix de la puissance de sortie.
- Rapport de réduction.
- Vitesse du moteur.
- Taille d'hélice.

2.6.4 Le système de transmission :

C'est un système qui sert à transmettre la puissance du moteur installé à l'intérieur de la coque du bateau à travers un arbre à l'hélice qui fera bouger le bateau.

L'arbre de transmission est une pièce mécanique, reliant un moteur à une hélice. On l'appelle également arbre porte-hélice ou ligne d'arbre dans le domaine maritime.

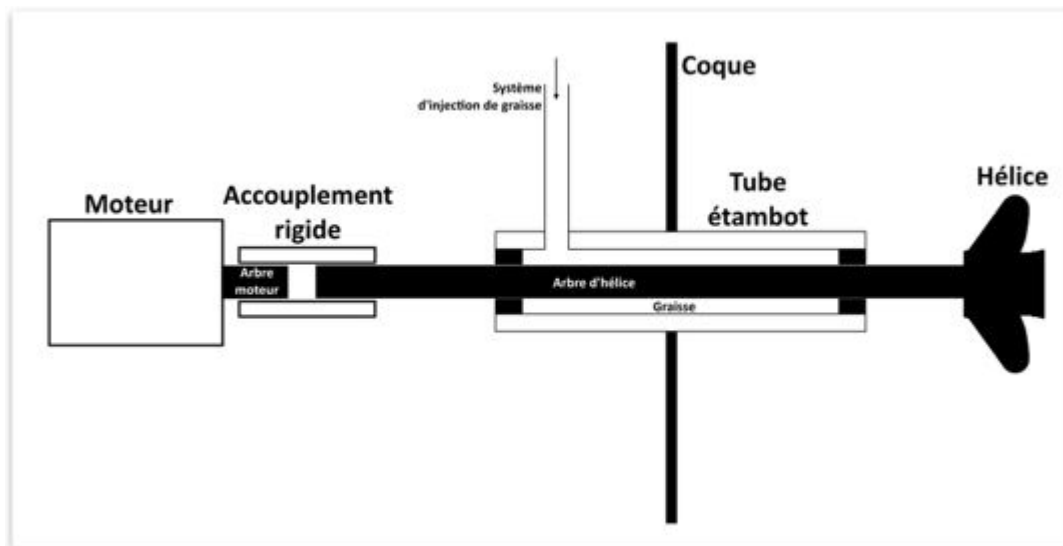


Figure 39: système de transmission d'un moteur dans un bateau

2.6.5 Sélection du diamètre de l'arbre :

Le choix du diamètre de l'arbre est une étape très importante pour une transmission propre et sereine.

Un diamètre trop petit fera un fouet d'arbre, vibration et, éventuellement de cisaillement, tandis si le diamètre est excessif c'est un gaspillage d'argent et de poids. La règle la plus simple est que l'arbre doit être d'au moins 1/14 du diamètre de l'hélice.

Pour choisir le bon diamètre d'un arbre on a un nomogramme qui pourrais nous guider (voir la figure 40)

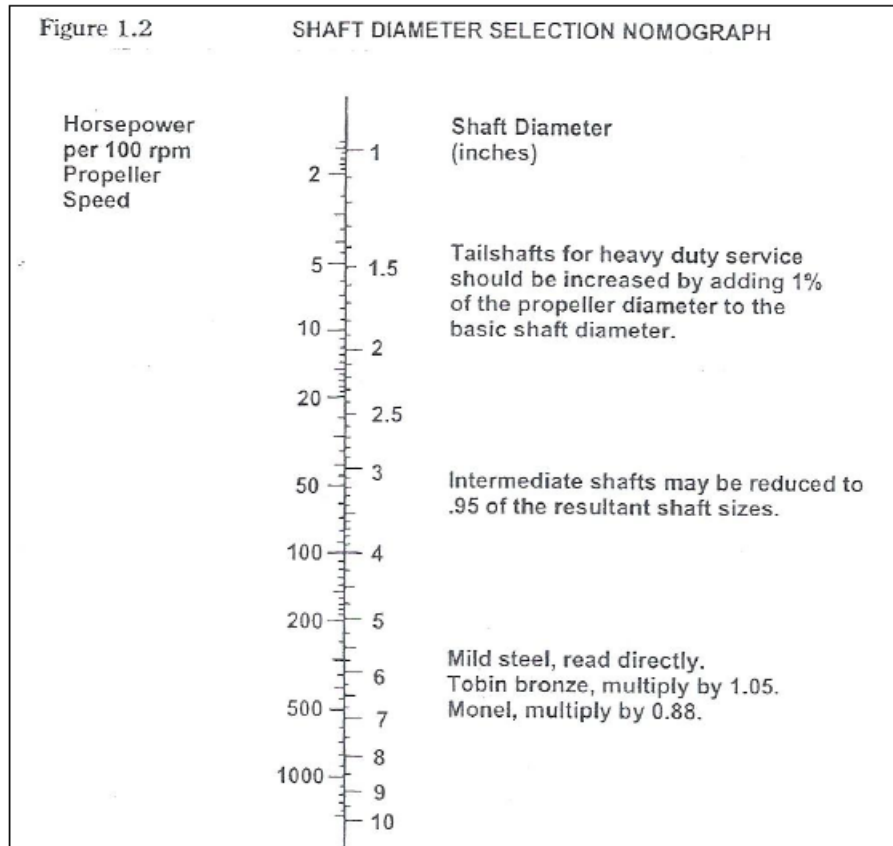


Figure 40: Nomogramme du Diamètre de l'arbre (en pouce) par rapport à la puissance du moteur (en HP/100 RPM).

2.6.6 Choix de l'hélice :

L'hélice sert à propulser le bateau. Elle est une pièce déterminante du comportement du bateau. Elle se définit par 2 indicateurs important : le Diamètre et le Pas.

Le pas (en pouces=2.5cm) est la distance que parcourt l'hélice en un tour.

Le diamètre détermine la surface de l'hélice donc la force appliquée sur l'eau.

Il existe différents types d'hélices :

- L'hélice à trois pales : c'est la plus courante.

- L'hélice à 4 pales : c'est une hélice à forte poussée aussi appelée Hightrust. Elle utilisée dans les cas où l'on recherche une grosse force de traction. Pour les voiliers par exemple

Le pas d'une hélice varie en fonction du diamètre, qui est en pouce ou en mm. La règle de base pour la détermination du pas est que pour chaque pouce qu'on réduit du diamètre, le pas doit être augmentée de 2, et vice versa. Par conséquent, si on réduit le diamètre de 2, puis la règle de base serait imposée un 4" augmentation en pas.

Un principe de base pour la plupart des applications en-bord est de 200 tr / min par pouce de pas. C'est-à-dire, Si nous échappons à partir d'une hélice 24x24 à un 24x23 nous devrions gagner 200 tr / min.

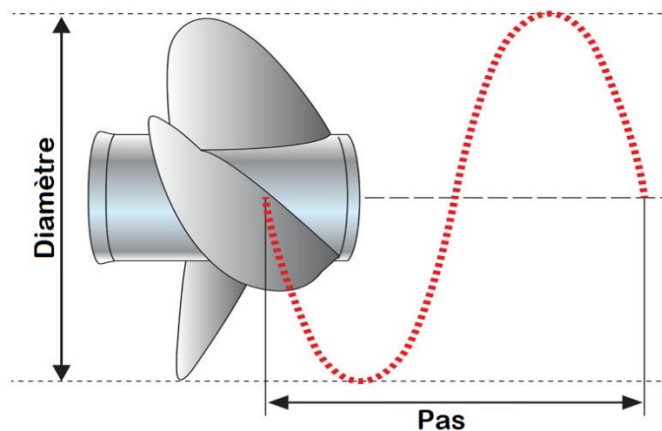


Figure 41: diamètre et pas d'une hélice

a) Le diamètre de l'hélice :

Pour le calcul du diamètre de l'hélice, généralement on utilise une formule qui donne un diamètre proposé pour l'hélice qui devrait empêcher la cavitation :

$$D = \sqrt{\frac{125 * hp}{EAR * kts * \sqrt{kts}}}$$

Cette formule donne un diamètre en pouce, avec hp qui est la puissance du moteur, kts est la vitesse du bateau et EAR est le rapport de surface qui est un coefficient varie selon le nombre de

pales de l'hélice (pour une hélice à 4 pales $EAR=0.69$), mais il faut noter que dans cette équation pour prendre en compte le rendement, on utilise 90% des valeurs de la vitesse et la puissance.

b) Calcule du rendement :

Pour calculer le rendement d'une hélice on doit faire court aux logarithmes décimaux

$$Y = 1,33 * \log(P_{as}/D) + 0.71$$

Sa nous permettra de calculer :

$$Rdmt = 0.35 + 0.561 * Y + 0.018 * Y^2 - 0.191 * Y^3 - 0.013 * Y^4$$

Un rendement acceptable se situe entre 0,60 et 0,70 mais certaines hélices ont un rendement supérieur à 70%. En règle générale plus une hélice tourne vite moins son rendement est bon. La conséquence sera une augmentation de la consommation de carburant.

c) Le glissement :

La différence de distance axiale parcourue entre le Pas ou Pas théorique et le Pas réel lors d'une révolution complète de l'hélice. Cette différence est due au temps qu'il faut aux molécules d'eau pour "s'accrocher" à la pale, ce phénomène diminue avec la vitesse du bateau

La relation de l'angle d'attaque et de glissement est présentée dans le compte de vitesse de rotation et vitesse de l'avancement. L'étude se fait sur 7/10 du rayon de l'hélice, généralement c'est la section de la pale d'hélice qui est la même de toutes les lames La vitesse de rotation sur 7/10 du rayon peut être calculée par l'équation suivante :

$$\text{Vitesse de rotation du } \frac{7}{10} \text{ rayon (MPH)} = \frac{\text{rotation de l'helice(RPM)} * 0.7\text{rayon(pouce)}}{168}$$

On peut aussi calculer la vitesse théorique du bateau par l'équation suivante :

$$\text{Vitesse theorique du bateau (MPH)} = \frac{\text{pas de l'helice (pouce)} * \text{rotation de l'helice (RPM)}}{1056}$$

On calcule le glissement par la formule suivante :

$$\text{lissage} \% = 1 - \frac{\text{Vitesse actuel du bateau (MPH)} * 1056}{\text{Rotation de l'hélice (RPM)} * \text{pas de l'hélice (pouce)}} * 100$$

d) Le rake :

Le rake est l'angle d'inclinaison des pales de l'hélice vers l'arrière. Les hélices standard ont généralement un rake compris entre 0 et 10°. Le rake est souvent utilisé pour dégager l'hélice d'un étambot très volumineux et arrondi afin d'optimiser le diamètre de l'hélice et d'améliorer l'arrivée d'eau.

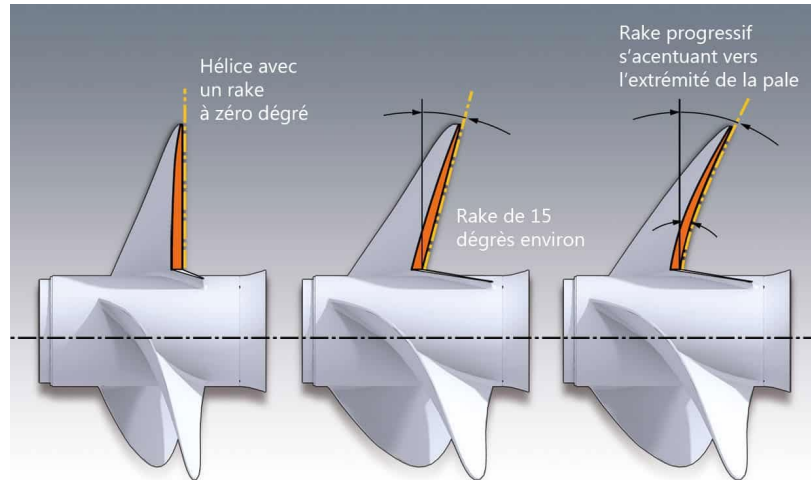


Figure 42: Rake d'une hélice

e) Rendement de l'hélice :

Il convient d'expliquer que le rendement d'hélice ne sera pas confondu avec un glissement, une erreur courante. En termes simples, le rendement de l'hélice est la puissance sortante d'une hélice divisée par la puissance entrée :

$$\text{Rendement de l'hélice} \% = \frac{\text{puissance sortie}}{\text{puissance d'entrée}} * 100$$

Nous allons utiliser le horsepower (HP) pour nos unités. D'abord, pour calculer la puissance sortie, la vitesse du bateau doit être mesurée, deuxièmement, la poussée de l'hélice doit être mesurée :

$$\text{Puissance de sortie(HP)} = \frac{\text{Vitesse du bateau (MPH)} * \text{poussée de l'hélice(lbf)}}{375}$$

Pour calculer la puissance entrée, la vitesse de l'arbre d'hélice doit être calculée :

$$Vitesse\ de\ l'arbre(RPM) = \frac{vitesse\ du\ moteur\ (RPM)}{reduction\ de\ vitesse}$$

Puis le couple de l'arbre d'hélice doit être mesuré :

$$Puissance\ d'entrée(HP) = \frac{Vitesse\ de\ l'arbre(RPM) * couple\ de\ l'arbre(ft.\ lbs.)}{5250}$$

2.7 Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre les différents procédés de fabrication des bateaux avec les matériaux généralement utilisés dans la fabrication des bateaux cité dans le chapitre 1, ainsi que les méthodes et paramètres essentiels pour étudier la flottabilité et la stabilité des bateaux ainsi faire le bon choix du moteur et le choix de l'hélice, que nous utiliserons dans le chapitre 3.

Chapitre 3

Etude et conception

3 Etude et conception :

3.1 Introduction à la conception de la coque :

Dans ce chapitre nous allons définir les différentes caractéristique géométrique d'une coque d'un bateau, faire le choix du moteur et aussi calculer les différents paramètres pour choisir notre hélice. Il comprend les différentes formules et la calculs nécessaire ainsi que toutes les méthodes pour définir notre coque et mettre en marche notre bateau en toute sécurité et à la vitesse pour laquelle il est conçu.

3.2 Dimensions principales :

La coque est mesurée par différentes dimension telles que la longueur hors tout (LOA), la longueur perpendiculaire (LPP), le maitre bau (B), le creux (D), le tirant d'eau (T), et le franc bord (F).

Généralement, la longueur est déterminée selon des navires similaires ou à partir des formules et diagrammes (résultant d'une base de données de navires similaires). La longueur résultante fournit alors la base de l'observation des autres dimensions.

- Longueur d'un bateau (LOA) :

Elle correspond à la distance entre les points extrêmes avant et arrière de la structure permanente du bateau.

- Longueur perpendiculaire (LPP) : est la longueur qui correspond à l'intersection des perpendiculaires avant et arrière avec la flottaison a plain charge

$$LPP = C \left(\frac{V}{V + 2} \right)^2 * \Delta^{1/3}$$

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

Lpp est en (ft), V est en (Kn), et Δ en (t).

- Maitre-bau (B) :

Le maitre bau correspond à sa plus grande largeur. Celle si peut être choisi arbitrairement. Elle devrait juste répondre au exigence de stabilité. Plus la largeur et grande plus stabilité augmente. D'après la référence (2), pour les bateaux de longueur inferieur a 30, le rapport typique de $L/B = 4$

De même une règle général dit que pour la monocoque de 6m a 250m ont une largeur qui peut être calculé rudement par la formule suivante :

$$B = LOA^{2/3}$$

- Creux (D) :

Il est égal à l'addition du tirant d'eau et du franc-bord

$$D = T + F$$

Le rapport typique pour les monocoques est : $1.55 \leq B/D \leq 2.5$

- Tirant d'eau :

Il doit correspondre à l'équation :

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

Avec le rapport typique : $2.25 \leq B/T \leq 3.75$

- Déplacement (Δ) :

Est une mesure du poids d'un navire dans différents situation de chargement

Il est défini par la formule suivante :

$$\Delta = \rho * g * \nabla$$

P : la densité de l'eau

g : l'accélérations due à la gravité

∇ : le volume sous l'eau

3.3 Cahier de charge :

3.3.1 Caractéristiques et de descriptif :

3.3.1.1 Matériaux utilisé :

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.

➤ 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.

➤ 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...

➤ Les charges additives :

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

D'après le tableau suivant on trouvera les caractéristiques des fibres de renforcement, et les résines les plus utilisées dans la construction de bateau :

Tableau 1: caractéristiques des fibres de renforcement :

Caractéristiques	Résines		Fibres	
	Polyester	Epoxyde	Verre	Carbone
Masse volumiques [g/cm^3]	1,20	1,20	2,54	1,80
Module de Young [MPa]	3000	2600	73000	230000
Coefficient de poisson	0,13	0,40	0,35	0,35

Comme dans notre étude, on a travaillé sur un bateau similaire qui est un chalutier fais en matériaux composites.

Le meilleur choix du matériau pour un bateau de pêche telle qu'un chalutier dont on a fait l'étude est le polyester renforcé par la fibre de verre. Notre coque sera alors définie par les mêmes matériaux et les mêmes caractéristiques.

3.3.1.2 La carène :

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 :

$$Fr = V / \sqrt{g * L}$$

Tel que :

V : Vitesse du bateau [m/s]

g : Accélération de la pesanteur

L : la longueur du bateau

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

Tableau 2: nombre de Froude correspondant à chaque navire

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

3.3.1.3 Définitions des limites de conception :

La conception de notre coque sera de la forme d'un monocoque en forme V, notant que les lignes de conceptions sont tirées de différents navires similaire fais conçu en matériaux composites (chalutier, thonier, et différents navires de pêches...)

D'après une enquête faite par la direction de l'ingénierie et de la technologie du centre de Brest (référence 3) et aussi quelques fiches techniques de bateau prise des annexes nous avons :

Longueur hors-tout : $LOA=25m$

Maitre bau : $B=6.3m$

Longueur de la ligne de flottaison LWL : 21.50

Largeur de la ligne de flottaison : $3.34 m$

Creux : $D=2.8m$

Tirant d'eau arrière : $T=2m$

Poids net : $73.6 t = 73600 kg$

Vitesse : $V_{max}=11 kn$

Moteur : $500 hp$

3.3.2 Conception de la coque :

Lors de la conception de notre coque nous allons respecter quelques règles et paramètres pour déterminer les dimensions et proportions d'un navire et pour cela nous allons utiliser une procédure traditionnelle qui est nécessaire pour notre travaille et qui consiste à :

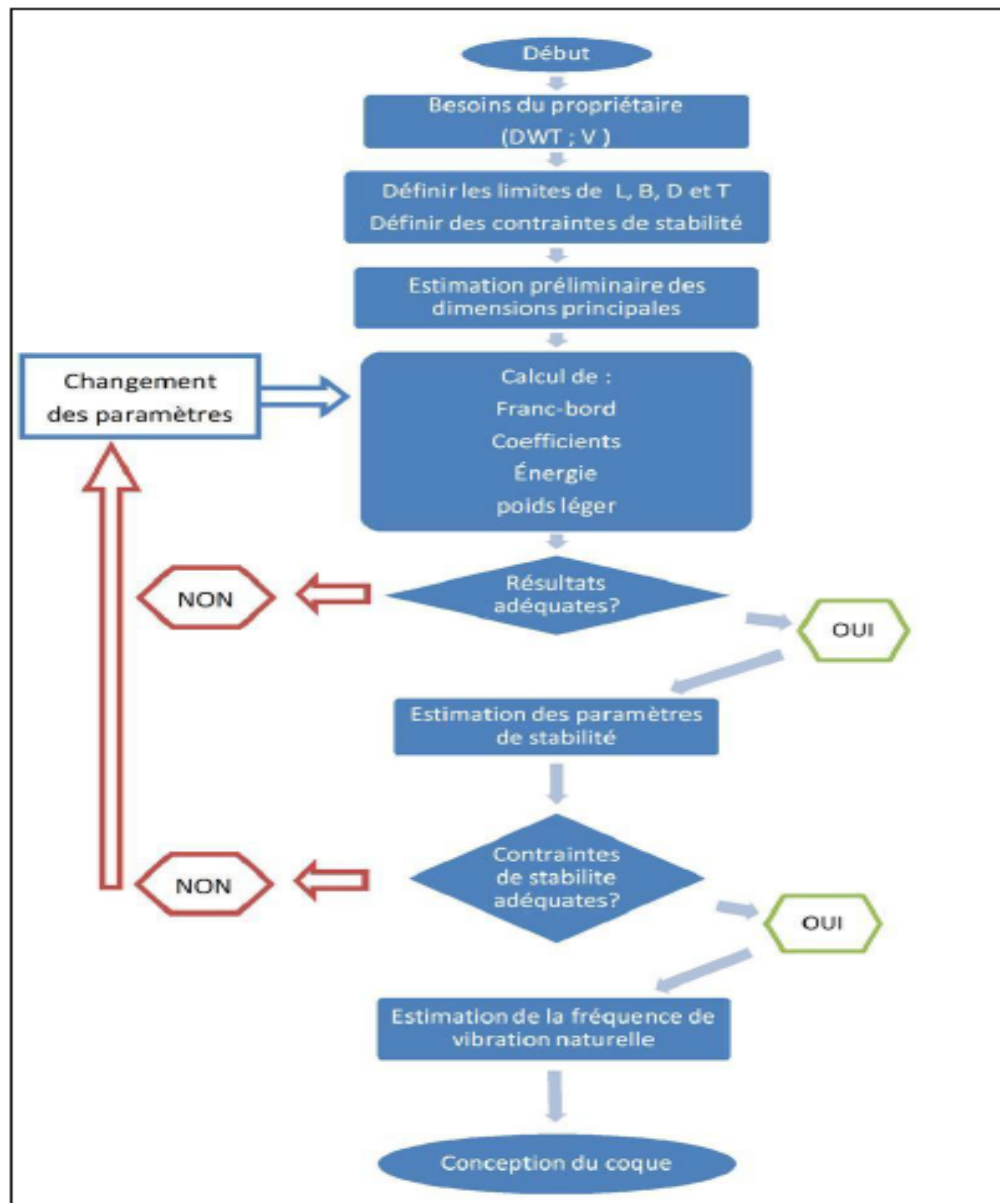


Figure 43: procédure de conception d'une coque

Après avoir définie les dimensions principales, on passe maintenant au calculs des autres paramètres essentiels :

3.3.2.1 Calcule de la longueur perpendiculaire :

$$LPP = C \left(\frac{V}{V+2} \right)^2 * \Delta^{\frac{1}{3}} = 23.5 \left(\frac{11}{13} \right)^2 * 73.6^{\frac{1}{3}} = 70.51 \text{ ft} = 21.49 \text{ m}$$

3.3.2.2 Calcule du volume de la carène ∇ :

$$v_{eau} = \frac{M}{\rho_{eau}} = \frac{73600}{1027} = 71.67 m^3$$

Où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau de mer qui est égale à $1027 kg/m^3$.

$v_{eau} = \nabla$ Le volume sous l'eau.

M : masse de la coque

D'après le volume calculé on peut trouver la ligne de flottaison de notre coque

3.3.2.3 Calcule du déplacement (Δ) :

$$\Delta = \rho_{eau} * g * \nabla = 1027 * 9.81 * 71.67 = 722065,93 N$$

3.3.2.4 Calcule du coefficient de bloc C_b :

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

$$C_b = \frac{\nabla}{B * L_{pp} * T} = \frac{71.67}{6.3 * 21.49 * 2} = 0.26$$

3.3.2.5 Calcul du coefficient de la section médiane (C_M) :

Les valeurs de C_M varient entre 0.75 et 0.995 pour les navires normaux

$$C_M = \frac{A_x}{B * T} = \frac{10.99}{6.3 * 2} = 0.876$$

3.3.2.6 Calcule du coefficient prismatique longitudinal (C_P) :

Le coefficient prismatique longitudinal est un paramètre fréquemment utilisé dans les études des vitesses et de puissance. La gamme habituelle de valeurs est d'environ 0,50 à 0,80.

$$C_P = \frac{\nabla}{L_{PP} * A_x} = \frac{C_b}{C_M} = \frac{0.26}{0.876} = 0.296$$

3.3.2.7 Calcul du coefficient prismatique verticale (CVp) :

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

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

3.3.2.8 Calcul du coefficient du plan d'eau (CWP) :

Ce coefficient peut être évalué à tout tirant d'eau

$$C_{WP} = \frac{A_W}{B * L_{WL}} = \frac{108.09}{6.3 * 21.50} = 0.798$$

3.3.2.9 Calcule des différents rapports :

$$\frac{L}{B} = \frac{25}{6.3} = 3.98$$

$$\frac{L_{WL}}{B} = \frac{21.5}{6.3} = 3.41$$

$$\frac{L_{WL}}{B_{WL}} = \frac{21.5}{3.34} = 6.34$$

$$\frac{B}{T} = \frac{6.3}{2} = 3.15$$

3.4 Etude de la flottabilité et la stabilité :

3.4.1 Etude de la flottabilité

Calcul de la poussée d'Archimède F_A :

$$F_A = m_{\text{eau déplacé}} * g = 722065,93N$$

Dans notre cas, on a :

$$F_p = \Delta = 722065.93 \text{ N}$$

Ce qui nous fait : $F_p = F_A$

Si la densité du solide est égale à celle du fluide, alors $F_p = F_a$ et le solide demeure immobile, il est en équilibre neutre ou indifférent. Donc notre bateau flotte

3.4.2 Etude de la stabilité :

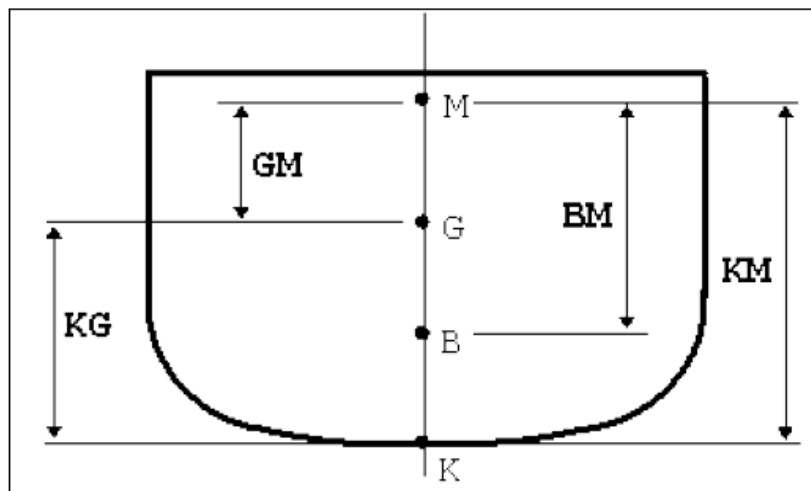
3.4.2.1 Stabilité transversale :

Définition du centre de carène et le centre de gravité :

Le centre de gravité du bateau G est lié à la répartition du poids.

Le centre de carène B est le centre du volume de la partie immergée de la coque du bateau même si que ce dernier varie avec l'inclinaison du bateau on prend toujours le même volume qui est le déplacement Δ du bateau.

- Stabilité initial :



La hauteur métacentrique est généralement exprimée par la somme de trois termes :

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

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

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

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

$$\text{Avec : } C_B = 0.26 \quad ; \quad C_{WP} = 0.798 \quad \text{et } T = 2m$$

$$\text{Donc } \overline{KB} = 2 \left(\frac{2.5 - \frac{0.26}{0.798}}{3} \right) = 1.44m$$

Pour calculer le rayon métacentrique (hauteur du métacentre) $\overline{BM}$, on utilise la formule qui dérive de l'équation approximative ($\overline{BM} = I_T / \nabla$), ou le moment d'inertie transversale du plan d'eau est exprimé comme le moment d'inertie d'un rectangle circonscrit $L * B^3 / 12$ multiplie par un facteur de réduction $f (C_{WP})$.

$$f(C_{WP}) = 1.5 * C_{WP} - 0.5 ; \text{ donc on a : } f(C_{WP}) = 1.5 * 0.798 - 0.5 = 0.697$$

La formule dérivée :

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

$$B = B_{WL} = 3.34 \quad ; \text{ alors :}$$

$$\overline{BM} = \frac{0.697}{12} * \frac{3.34^2}{2 * 0.26} = 1.24m$$

On peut alors trouver la valeur de $\overline{KM}$ par : $\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM}$ ou par une autre formule (Shneekluth) dérivée combinaison des formules approximatives de $\overline{KB}$ et $\overline{BM}$ qui nous aide à calculer directement la hauteur du métacentre au-dessus de la quille

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

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = 1.44 + 1.24 = 2.68m$$

- Le centre de gravité

Pour un navire, le centre de gravité est le point où on applique la force verticale agissant vers le bas générée par la masse du navire. La position du centre de gravité changera en fonction des conditions de chargement du navire. Pour notre bateau, le centre de gravité en déplacement leger est pris :

$$\overline{KG} = \frac{\overline{BM}}{2} + \overline{KB} = 2.06m$$

- Le couple de redressement

Le couple de redressement M tend à redresser le navire après avoir été incliné d'un angle θ par rapport à sa position d'équilibre. On le calcule avec la formule suivante :

$$M = P * GZ = P * (h - a) * \sin \theta$$

$$\text{Avec } P = \text{masse du bateau} * g = 73600 * 9.81 = 722016 \text{ N} = 722,016 \text{ KN}$$

$$\text{Pour un angle d'inclinaison } \theta \leq 10^\circ, \quad GZ = GM * \sin \theta$$

$$\text{Donc on a : } M = P * GZ = P * GM * \sin \theta$$

$$\text{Pour : } \theta = 0$$

$$M = 722.016 * 0.62 * \sin 0 = 0$$

$$\text{Pour : } \theta = 5^\circ$$

$$M = 722.016 * 0.62 * \sin 5 = 39.01 \text{ KN.m}$$

$$\text{Pour } \theta = 10^\circ$$

$$M = 722.016 * 0.62 * \sin 10 = 77,73 \text{ KN.m}$$

Tableau 3: couple de redressement selon l'angle d'inclinaison

Angle de gite θ (deg)	$KN = KB_0(m)$	$GZ_0 = KN - KG * SIN\theta(m)$	Couple de redressement $M = P * GZ_0(KN.M)$
20°	1.053	0.34	245.48
30°	1.471	0.44	317.68
40°	1.754	0.43	310.46
50°	1.936	0.36	259.92
60°	2.038	0.25	180.5
70°	2.067	0.13	93.862
80°	2.033	0.004	2.88
90°	2.019	-0.041	-29.6

Quand l'angle d'inclinaison $\theta > 10^\circ$, le point M ne se trouve plus sur l'axe du navire vue l'inclinaison qui est importante on utilise alors la formule $GZ = KN - KE = KN - KG * \sin \theta$, ou KN est la distance perpendiculaire donnée par les tables du centre de carène (voir annexe)

Celle-ci est une variation du couple de redressement par rapport à l'angle de gite, on remarque qu'à partir de $\theta \geq 80^\circ$, notre navire tend vers une inclinaison sans retour ou notre couple de redressement sera nul, et à partir de là on remarque que ce dernier a une valeur négative, qui veut dire une stabilité négative et cela veut dire que notre bateau a atteint un point de chavirement .

Le couple maximum = 310,68 à l'angle $\theta = 30^\circ$

3.5 Moteur, arbre de transmission et hélice :

D'après l'annexe (4) le choix du moteur a été porté sur un diesel de puissance de 500 hp qui a la vitesse maximale atteint les 11Kn et transmet 3200 tour par minute

Pour notre bateau on doit choisir l'arbre de transmission ainsi que l'hélice, deux composante importante à ne pas négliger

3.5.1 Choix de l'arbre de transmission :

D'après le nomogramme spécifique cité dans le chapitre 2 (figure 40) qui nous donne pour chaque moteur selon sa puissance le diamètre de l'arbre, on peut bien observer pour notre cas que pour une puissance de 507 ch à 3200 tr/min, c'est-à-dire 16 ch à 100 tr/min on peut utiliser un diamètre $D = 2,3 \text{ pouce}$ qui est égale à 58.42 mm et selon les norme on prend alors $D = 60 \text{ mm}$

3.5.2 Choix de l'hélice :

Pour le choix de l'hélice on devra prendre plusieurs paramètres en compte (voir chapitre 2) et pour sa on utilisera plusieurs formules

3.5.2.1 Calcule du diamètre de l'hélice :

Pour le calcul du diamètre de l'hélice on utilise alors la formule suivante :

$$D = \sqrt{\frac{125 * hp}{EAR * kts * \sqrt{kts}}}$$

On la vitesse et la puissance a 90% de leur valeur

$$Hp = 456 \text{ ch}$$

$$EAR=0.69$$

$$Kts = 9,9$$

Donc on a :

$$D = \sqrt{\frac{125 * 456}{0,69 * 9.9 * \sqrt{9.9}}} = 51,54 \text{ pouce} = 1309,12 \text{ mm}$$

On prend alors le pas de notre hélice qui est une hélice classique a 52 pouce

Alors notre hélice sera définie par (52 X 52)

3.5.2.2 Calcule du rendement de l'hélice :

$$Y = 1,33 * \log(\text{Pas}/D) + 0.71 = 1,33 * \log(1) + 0.71 = 0.71$$

On calcule le rendement :

$$\text{Rdmt} = 0.35 + 0.561 * Y + 0.018 * Y^2 - 0.191 * Y^3 - 0.013 * Y^4$$

Application numérique :

$$\text{Rdmt} = 0.35 + 0.561 * 0,71 + 0.018 * 0,71^2 - 0.191 * 0,71^3 - 0.013 * 0,71^4 = 0.68$$

Donc d'après la formule notre hélice a un rendement de 68%

3.5.2.3 Calcule du glissement l'hélice :

$$\begin{aligned} \text{Vitesse de rotation du } \frac{7}{10} \text{ rayon (MPH)} &= \frac{\text{rotation de l'helice(RPM)} * 0.7\text{rayon(pouce)}}{168} \\ &= \frac{3200 * 0.7 * \frac{52}{2}}{168} = 346,66 \text{ MPH} \end{aligned}$$

On peut calculer aussi la vitesse théorique du bateau par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Vitesse theorique du bateau (MPH)} &= \frac{\text{pas de l'helice (pouce)} * \text{rotation de l'helice (RPM)}}{1056} \\ &= \frac{52 * 3200}{1056} = 157,57 \text{ MPH} \end{aligned}$$

On calcule le glissement avec la formule suivante :

$$\text{lisement \%} = 1 - \frac{\text{Vitesse actuel du bateau (MPH)} * 1056}{\text{Rotation de l'helice (RPM)} * \text{pas de l'helice (pouce)}} * 100$$

Alors on a :

$$\text{lisement \%} = 1 - \frac{12,65 * 1056}{3200 * 52} * 100 = 8\%$$

3.5.2.4 Calcule de la force de la poussée de l'hélice :

$$\text{Rendement de l'hélice}\% = \frac{\text{puissance sortie}}{\text{puissance d'entrée}} * 100$$

Vue qu'on a déjà calculé le rendement qui est égale à 68%, on calcule tout d'abord la puissance de sortie

Comme on a :

-La puissance d'entrée qui est égale à 500 hp a 3200 tr/min

-Rendement qui est égale à 68%

Donc on a :

$$\begin{aligned} \text{puissance de sortie} &= \text{puissance d'entrée} * \text{le rendement} = 500 * 0,68 = 340 \text{ hp} \\ &= 253,53 \text{ KW} \end{aligned}$$

On a aussi :

$$\text{la puissance d'entrée} = \frac{\text{vitesse de l'arbre} * \text{couple de l'arbre}}{5250}$$

$$\text{vitesse de l'arbre} = \frac{\text{vitesse du moteur (RPM)}}{\text{reduction de vitesse}} = \frac{3200}{2,5} = 1280 \text{ RPM}$$

$$\begin{aligned} \text{couple de l'arbre (ft. lbs)} &= \frac{\text{puissance d'entrée} * 5250}{\text{vitesse de l'arbre}} = \frac{500 * 5250}{1028} = 2553,50 \text{ ft. lbs} \\ &= 3462,08 \text{ N.m} \end{aligned}$$

On calcule alors la poussée de l'hélice par la formule suivante :

$$\text{poussée de l'hélice (lbf)} = \frac{\text{puissance de sortie (hp)} * 375}{\text{puissance du bateau (MPH)}} = \frac{340 * 375}{12,65} = 10079,05 \text{ lbf}$$

$$\text{D'où la poussée de l'hélice} = 44833,83 \text{ N} = 44,83383 \text{ KN}$$

3.6 Présentation de la coque :

D'après les données que nous avons et l'étude faite juste auparavant on a pu réaliser une coque sur le logiciel Solidworks dont je fais la présentation comme suit :

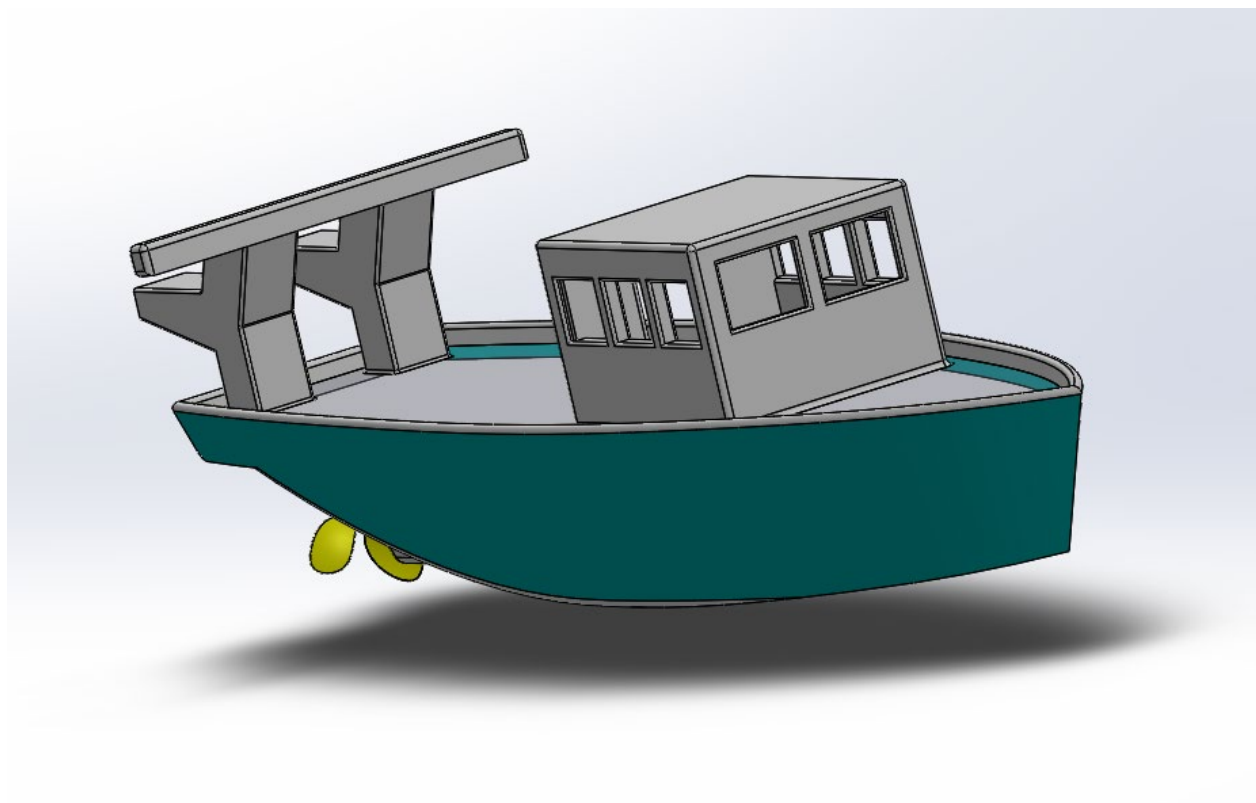


Figure 44: version finale num°1

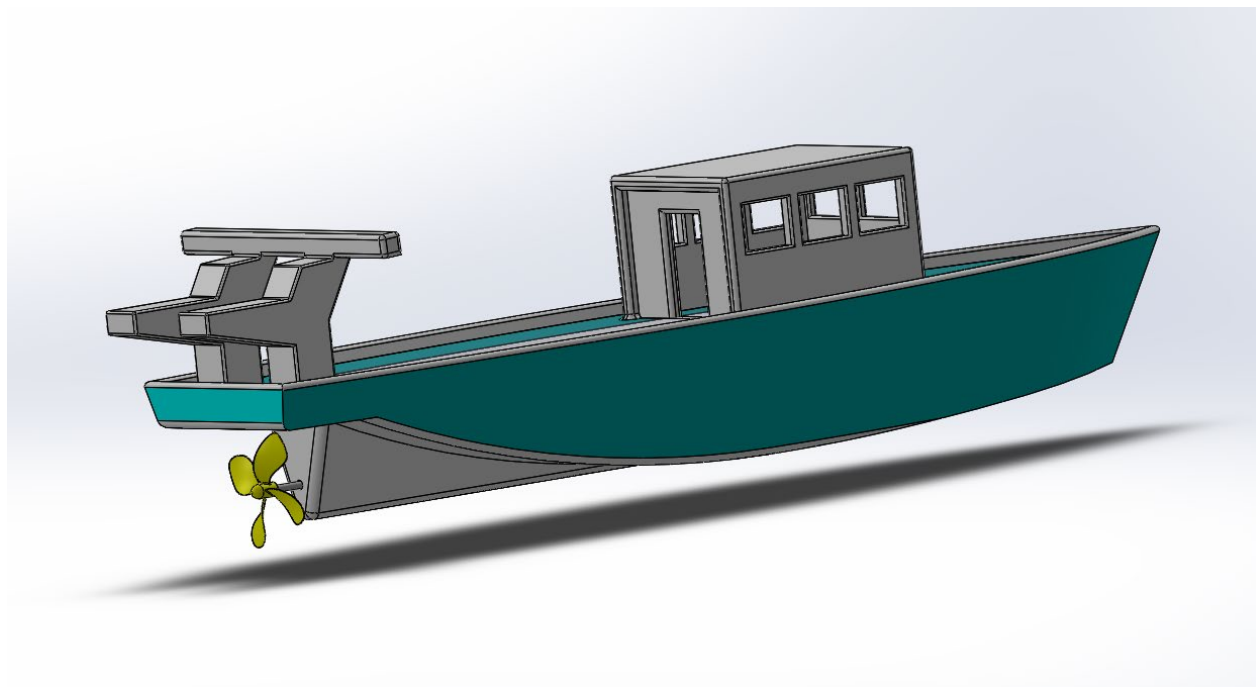


Figure 45: vue num°2

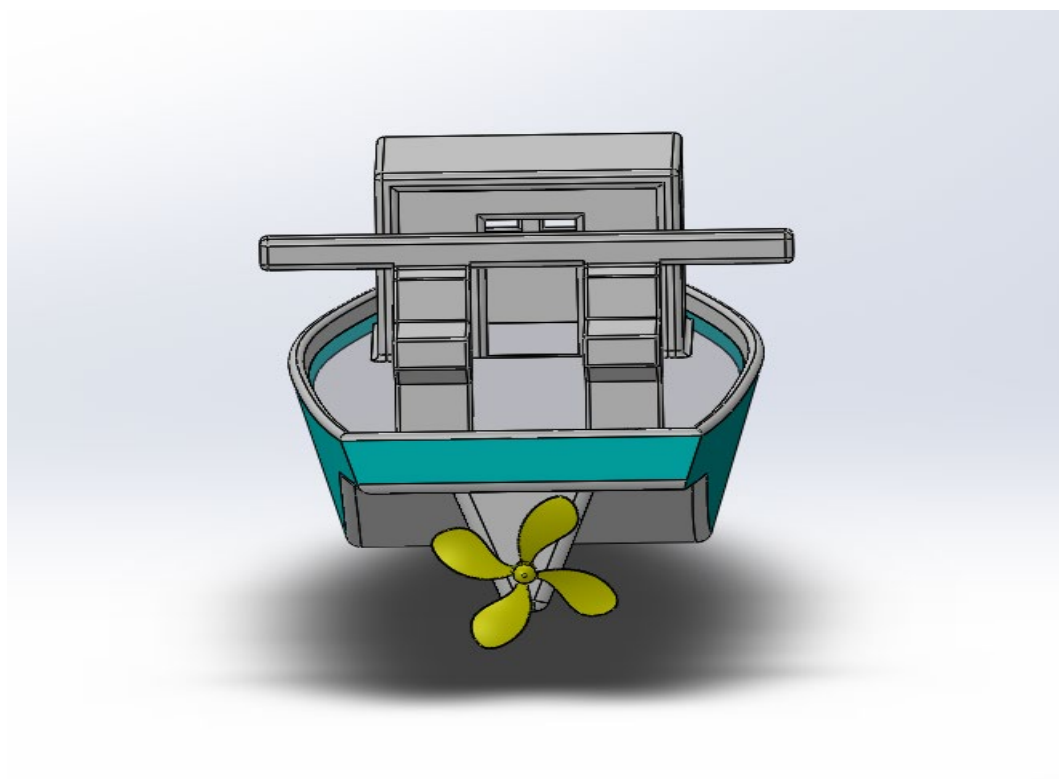


Figure 46: vue num°

3.7 Simulation :

Nous avons pu à l'aide de la CAO par le logiciel solidworks faire une initiation à la simulation de notre bateau sert à vérifier la résistance de la forme externe qui est la coque au flux d'eau et de l'air.

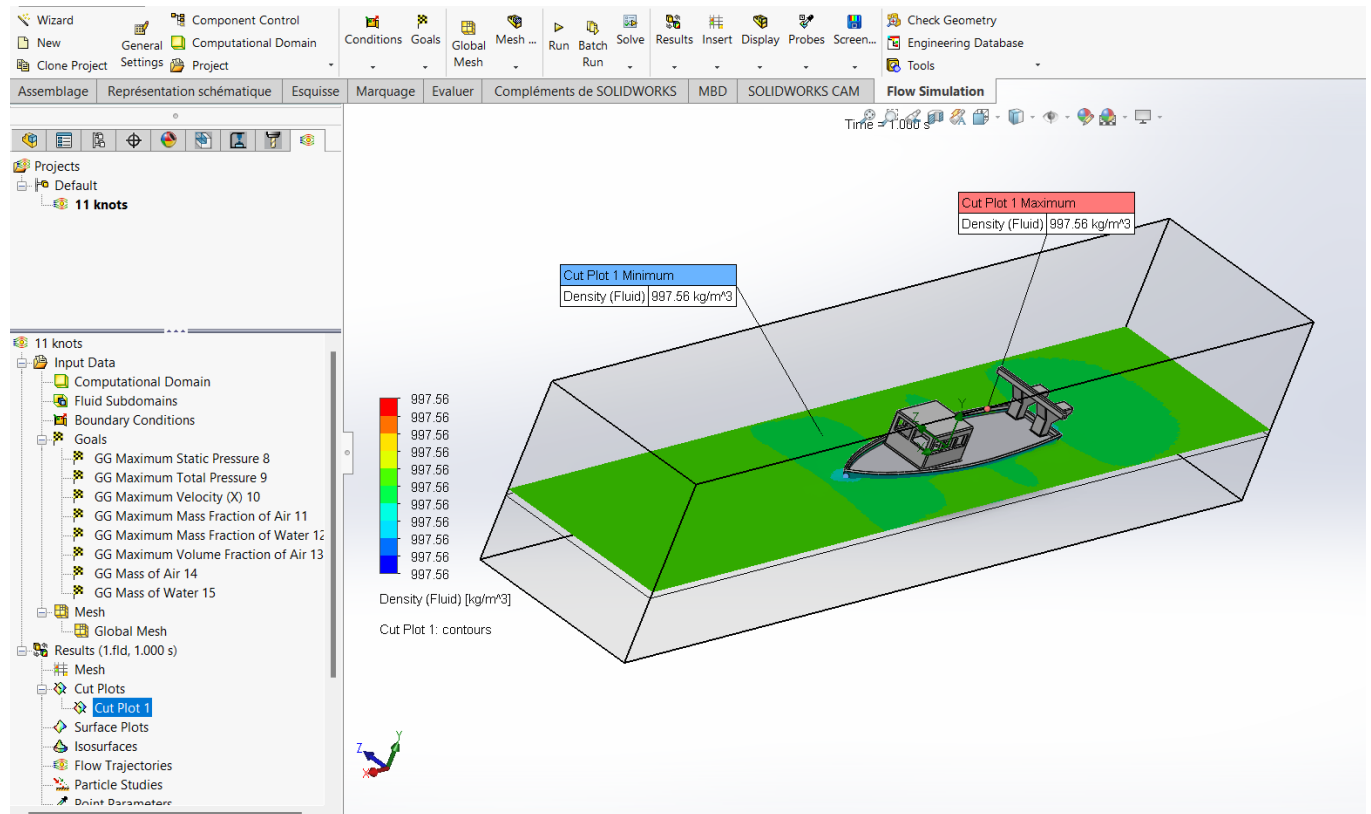


Figure 47: simulation a la densité du fluide

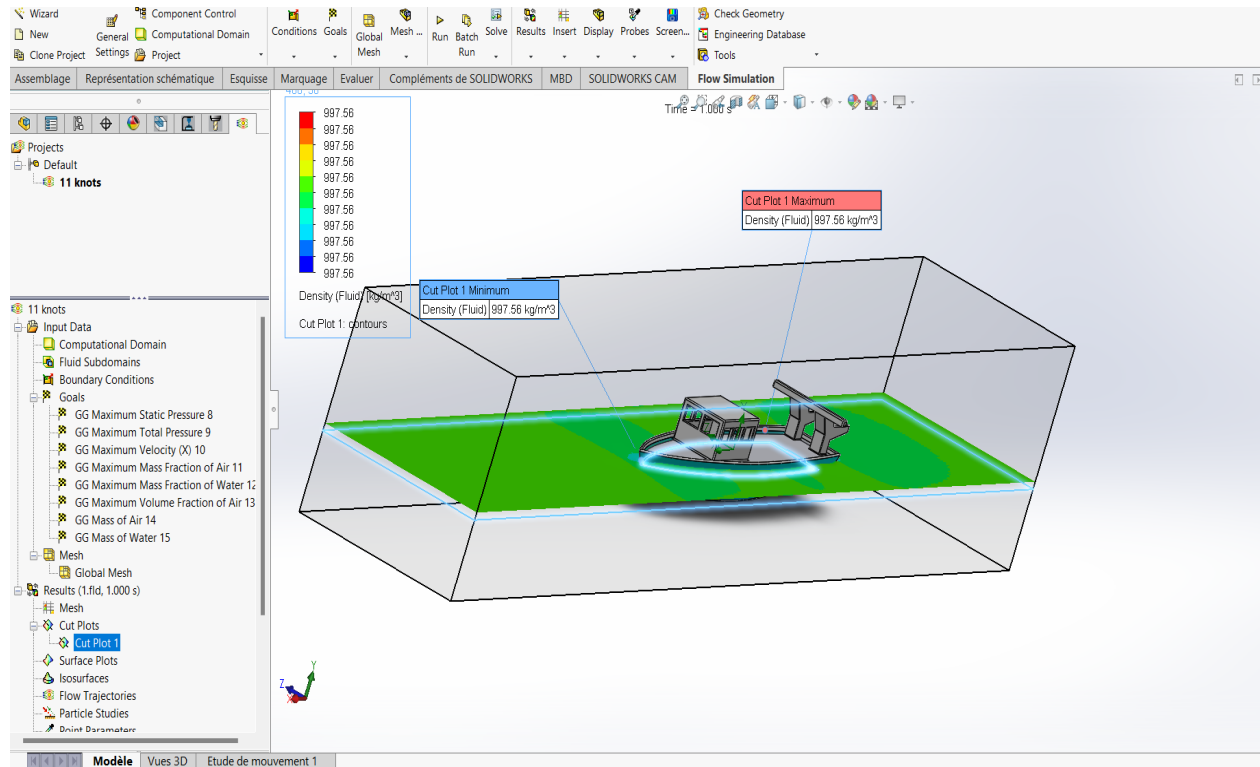


Figure 48: simulation a la densité du fluide, cut maximal

Avec :

Iteration : 36
 Physical Time : 1.000 s
 CPU time : 0 s
 Total cells : 428850
 Fluid cells : 428850
 Fluid cells contacting solids : 29747
 Trimmed cells : 0
 Maximum refinement level : 1
 X min : -32.845 m
 X max : 45.924 m
 Y min : -6.674 m
 Y max : 9.531 m
 Z min : -7.019 m
 Z max : 8.143 m
 X size : 78.769 m
 Y size : 16.206 m
 Z size : 15.162 m
 Gravity : Yes

Basic Mesh Dimensions $N_x = 183, N_y = 43, N_z = 44$
Pressure : [21580.23 Pa; 170109.37 Pa]
Velocity : [0 m/s; 7.265 m/s]
Temperature : [293.20 K; 293.20 K]
Density (Fluid) : [997.56 kg/m³; 997.56 kg/m³]
Reference Pressure : 101325.00 Pa

3.8 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre on a pu définir les caractéristiques géométriques principales de notre bateau en faisant références a des bateaux similaires et en particulier un chalutier des mers algériennes (annexes 02) d'où on a défini notre cahier de charge ainsi faire les calculs nécessaires à sa flottabilité et sa stabilité ainsi le calcule nécessaire pour faire le choix de l'hélice correspondante a notre bateau. On a pu réaliser un prototype de la coque en question avec un logiciel de CAO « Solidworks » en prenons compte les données qu'on a notre dispo

Conclusion générale :

Lors de notre travail nous avons accompli les objectifs que nous avons fixé, d'une part par la recherche complète la construction navale avec toutes ses formes et d'autre part par la conception et l'étude d'un bateau à propulsion par hélice.

Dans ce projet nous avons démontré que le domaine de la construction navale est un travail d'ingénierie et d'expertise et nécessite des recherches approfondie pour faire des études et des vérifications bien précises pour avoir un bateau bien finie qui sera performant stable et sécuritaire.

Bibliographie

- (1) RASAMOELA Tolojanahary Ravakiniaina « ETUDE ET CONCEPTION D'UN YACHT », mémoire d'ingénieur, master en génie industriel
- (2) Hussein Rammal. Conception et étude d'un bateau trimaran. Mécanique [physics.med-ph]. 2011. dumas-01081522
- (3) P.-A. Reymond Architecte et Expert naval, chargé de cours CEPM, Breve approche de calculs de carènes et stabilité à l'attention des constructeurs de bateaux
- (4) Nicolas CHEYMOL, Dominique DUCOURANT, Jean-Jacques CALLIET, Guillaume PHILIPPE, article scientifique et pédagogique, Mer et physique : le brevet d'initiation à la mer.
- (5) DIRECTION DE L'INGÉNIERIE ET DE LA TECHNOLOGIE, Les chalutiers artisans de 16 à 25 mètres. Résultats de l'enquête réalisée en 1988 auprès de chalutiers récents des côtes de la Manche et de l'Atlantique
- (6) Louis CHEVALLIER, Conception, fabrication et validation structurale des coques d'un catamaran de type Class-C
- (7) Bertrand Jaouen, Cahier technique de l'éconavigation, Volet 1 « Bateaux et Equipements »
- (8) La théorie du navire appliquée au navire de commerce, par J. Ropars, Éditions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1962, in-4°.
- (9) RIVOCHARINJAKA Tanjona Alidera, CONCEPTION D'UN BATEAU DE PECHE EN PRVT
- (10) Direction du developpement des Pecher en toute securite : la stabilite des bateaux de peche
- (11) E. GUYOU, théorie du navire

Webographie :

1. <https://www.universalis.fr/>
2. https://www.techno-science.net/definition/1993.html#Situation_actuelle
3. <http://kotsanas.com/fr/cat.php?category=19>
4. <http://pjamet.free.fr/theme3/bateau.htm>
5. www.alamy.com
6. <https://www.ec-nantes.fr/>
7. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/modes-de-propulsion-des-engins-marins>
8. https://h2o-bateau.fr/p_article-et-actus-plaisance.php?theme=info
9. <https://figaronautisme.meteoconsult.fr/actus-nautisme-blog/2018-02-22/45267-construction-d-un-navire-le-bon-choix-du-materiau>
10. <http://blog.ametragroup.com/construction-navale-materiaux-composites/>
11. <https://www.ilocis.org/fr/documents/ilo092.htm>
12. <https://navigationnautiquecanada.ca/types-de-coques/>
13. <https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/securite-maritime/3-stabilite-0>

Annexes

Annexe 1 :

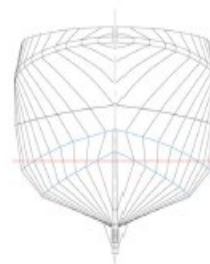


Thonier senneur

24,90 mètres Ville d'Arzew II

Performance et ergonomie

Longueur HT	24,90 m	Année 1998
Largeur HT	7,20 m	Motorisation 2* Mitsubishi
Creux	3,00 m	Coque Polyester
Tirant d'eau arrière	2,50 m	
Longueur PP	22,70 m	Armateur
Capacité gazole	18 000 litres	Antoine et François LUBRANO
Capacité eau douce	3500 litres	La Ciotat
Équipage	10 hommes	
Jauge UMS		



Conçu pour la pêche
au large

Des postes de
travail fonctionnels

Capacité adaptée



CHANTIER NAVAL
CROISICAIS

La Jonchère du Prince
BP 33 - 44490 Le Croisic
France

Tel : (33) 2 40 23 26 99
Fax : (33) 2 40 23 23 03

www.cn-croisicais.com



Un poste de pilotage
moderne et ergonomique



Double motorisation pour plus
de performance



Timonerie surélevée
d'une vigie pour la
recherche des bancs
de poissons

Annexe 2 :



Principales caractéristiques

Longueur maximale	25.00 m
Largeur maximale	6.30 m
Tirant d'eau en déplacement léger	2.00 m
Creux	2.80 m
Déplacement léger	73.60 tn
Jauge brute	68 GT
Générateurs	1 x 34 KVA

Performance

Vitesse max	11 kn
-------------	-------

Poids mort

Equipage	9 p
Cabines pour	9 p
Carburant	15.000 l
Eau douce	2.000 l
Eaux usées/gris	240 l
Huile hydraulique	500 l
Capacité soute	50 m3

Propulsion

Moteurs	500 HP
Propulsion	Hélice

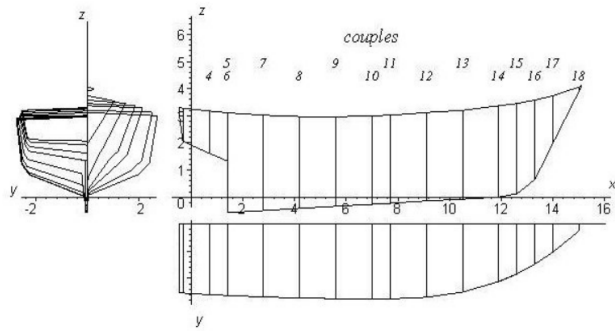
Matériau de construction

Matériau	PRFV
----------	------

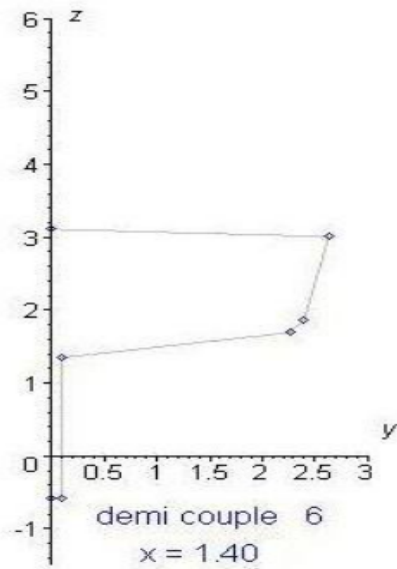
Annexe 3

Les éléments suivants sont rassemblés dans le dossier de stabilité du navire

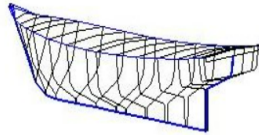
Plan des formes



Pour commencer la coque est modélisée, par un ensemble de points déterminant avec suffisamment de précision le contour de chaque demi couple



Couple	Point	x(m)	y(m)	z(m)
6	1	1.40	0.00	3.11
6	2	1.40	2.64	3.01
6	3	1.40	2.40	1.87
6	4	1.40	2.26	1.69
6	5	1.40	0.10	1.35
6	6	1.40	0.10	-0.58
6	7	1.40	0.00	-0.58



Un traitement informatique approprié génère les données hydrostatiques et pantocarènes qui permettront d'effectuer les calculs de stabilité indépendamment de tout logiciel

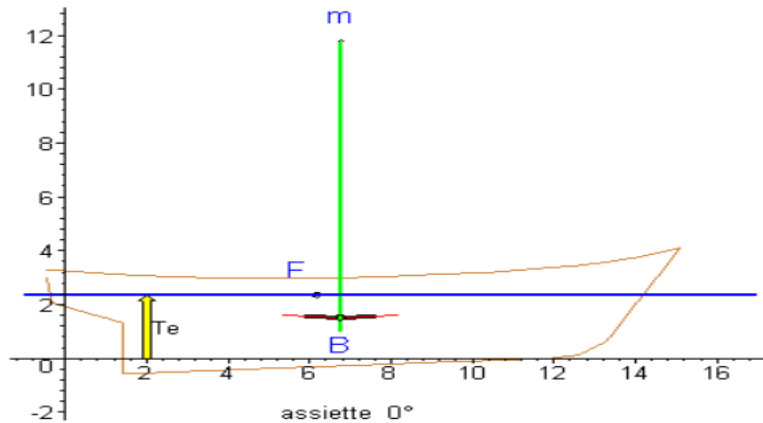
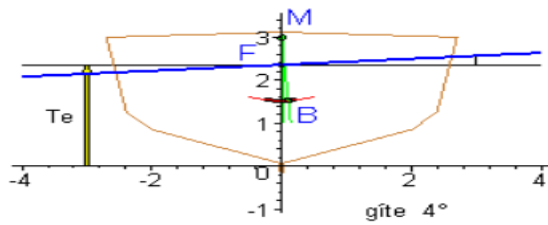
Données hydrostatiques

Ces données déterminent en fonction d'un tirant d'eau variable T_e , pour une gîte et une assiette nulle :

- Le volume de carène V
- La position longitudinale du centre de carène LCB
- La position longitudinale du centre de surface de flottaison LCF
- La hauteur du centre de carène KB
- Le rayon métacentrique transversal BM
- La hauteur du métacentre transversal KM
- Le rayon métacentrique longitudinal Bm

T_e (m)	V (m ³)	LCB (m)	LCF (m)	KB (m)	BM (m)	KM (m)	Bm (m)
2.000	69.97	6.959	6.275	1.305	1.746	3.051	11.759
2.020	71.22	6.946	6.241	1.317	1.738	3.056	11.815
2.040	72.49	6.933	6.211	1.330	1.732	3.062	11.831
2.060	73.77	6.920	6.205	1.342	1.713	3.055	11.732
2.080	75.05	6.907	6.189	1.355	1.694	3.048	11.686
2.100	76.33	6.895	6.163	1.367	1.677	3.044	11.692
2.120	77.62	6.882	6.137	1.379	1.669	3.048	11.698
2.140	78.92	6.870	6.138	1.392	1.650	3.042	11.566
2.160	80.22	6.858	6.139	1.404	1.633	3.037	11.437
2.180	81.52	6.847	6.141	1.416	1.614	3.031	11.305
2.200	82.83	6.835	6.144	1.429	1.597	3.025	11.177
2.220	84.14	6.825	6.148	1.441	1.579	3.020	11.048
2.240	85.46	6.814	6.152	1.453	1.562	3.015	10.922
2.260	86.77	6.804	6.156	1.465	1.545	3.010	10.800
2.280	88.09	6.794	6.159	1.477	1.528	3.005	10.681
2.300	89.42	6.785	6.163	1.489	1.512	3.002	10.566
2.320	90.74	6.776	6.167	1.501	1.497	2.998	10.454
2.340	92.07	6.767	6.171	1.513	1.482	2.995	10.345
2.360	93.40	6.758	6.175	1.525	1.467	2.992	10.239
2.380	94.74	6.750	6.179	1.537	1.453	2.990	10.136
2.400	96.07	6.742	6.183	1.549	1.439	2.988	10.035
2.420	97.42	6.734	6.187	1.561	1.426	2.986	9.937
2.440	98.76	6.727	6.191	1.572	1.413	2.985	9.842
2.460	100.11	6.720	6.195	1.584	1.400	2.984	9.749
2.480	101.46	6.713	6.199	1.596	1.387	2.983	9.659
2.500	102.81	6.706	6.203	1.608	1.375	2.983	9.570

Elles permettent de connaître la stabilité initiale et de situer un petit déplacement du centre de carène autour de la position droite figurée dans cette table



	KN(m)		assiette initiale = -0.0874 --> -5.0°							
V(m3)	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
70.0	0.253	0.508	1.008	1.417	1.711	1.911	2.031	2.082	2.060	
75.0	0.254	0.508	1.004	1.402	1.692	1.889	2.008	2.058	2.043	
80.0	0.254	0.509	0.998	1.384	1.670	1.867	1.987	2.037	2.026	
85.0	0.256	0.511	0.988	1.365	1.646	1.844	1.965	2.017	2.008	
90.0	0.257	0.513	0.976	1.343	1.621	1.819	1.943	1.998	1.993	
95.0	0.258	0.514	0.962	1.318	1.593	1.792	1.920	1.980	1.979	
100.0	0.259	0.513	0.943	1.290	1.563	1.763	1.895	1.962	1.967	

	KN(m)		assiette initiale = 0.0000 --> 0.0°							
V(m3)	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
70.0	0.267	0.533	1.053	1.471	1.754	1.936	2.038	2.067	2.033	
75.0	0.266	0.530	1.046	1.451	1.728	1.911	2.015	2.048	2.016	
80.0	0.264	0.527	1.035	1.426	1.700	1.883	1.992	2.030	2.004	
85.0	0.263	0.525	1.021	1.399	1.669	1.855	1.968	2.012	1.993	
90.0	0.262	0.524	1.004	1.367	1.636	1.825	1.944	1.995	1.983	
95.0	0.261	0.522	0.983	1.334	1.601	1.795	1.919	1.978	1.974	
100.0	0.260	0.520	0.959	1.299	1.565	1.763	1.894	1.961	1.965	

KN(m)		assiette initiale = 0.0874 --> +5.0°							
V(m3)	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
70.0	0.275	0.552	1.079	1.474	1.747	1.929	2.034	2.065	2.030
75.0	0.272	0.545	1.053	1.437	1.708	1.893	2.003	2.041	2.014
80.0	0.269	0.539	1.025	1.398	1.668	1.857	1.972	2.017	1.999
85.0	0.267	0.533	0.996	1.356	1.627	1.820	1.941	1.994	1.985
90.0	0.265	0.524	0.965	1.313	1.584	1.782	1.909	1.972	1.973
95.0	0.264	0.512	0.933	1.271	1.540	1.743	1.877	1.950	1.960
100.0	0.261	0.496	0.898	1.229	1.497	1.704	1.847	1.928	1.949

Cas de chargement

L'étape suivante consiste à déterminer le déplacement du navire et la position de son centre de gravité

Pour faire ce calcul, un devis de poids récapitule l'ensemble des poids ajoutés au navire lège

Le poids et les coordonnées du centre de gravité du navire lège ont été mesurés par une expérience de stabilité et figurent dans le dossier de stabilité

VCG est la coordonnée verticale du centre de gravité et LCG la coordonnée longitudinale

Différents cas de chargement traduisent ainsi les situations susceptibles de se présenter

Exemple , cas de chargement « Navire au départ en pêche »

	poids (t)	VCG (m)	LCG (m)
NAVIRE LEGE	70,303	2,192	6,705
Gazole	13,280	1,900	7,610
Nourrice	0,390	2,500	8,500
Huile	0,250	2,000	8,500
Liquide en circuit	0,200	0,800	8,000
Eau douce	1,300	0,900	11,000
Glace	3,000	1,800	3,500
Equipage	0,450	4,100	8,000
Vivres	0,300	2,000	12,000
Matériel de pêche	3,720	3,482	5,588
Pontée de poisson	2,500	3,100	4,300
	poids (t)	KG (m)	LCG (m)
DEPLACEMENT	95,693	2,202	6,720

Annexe 4

MERCURY

Maintenance Schedule

ENGINE
SERIAL NO.

POD
SERIAL NO.

For fuel, oil, and lubricant requirements refer to operation and maintenance manual.

TRANSMISSION OIL / FLUID

ENGINE OIL

RAW WATER DRAIN

CHECK EACH DAY START	CHECK EACH DAY END	CHECK WEEKLY
Engine Oil Level	If operating in saltwater, brackish water, or polluted water, flush the seawater section of the cooling system after each use.	Water inlets for debris or marine growth
Gearcase Lubricant		Clean the seawater strainer
Transmission Oil / Fluid Level		
Coolant Level		
Exhaust System		

BELT ROUTING

SPECIFICATIONS
 MODEL TURBOCHARGED / AFTERCOOLED
 DISPLACEMENT 6.7 L
 ENGINE ROTATION LH
 MAX. W.O.T. RPM 3200
 IDLE RPM IN NEUTRAL 650 NON ADJ

OIL / FLUIDS
 ENGINE OIL 15W-40
 TRANSMISSION OIL 0W-30
 GEARCASE LUBRICANT 90W
 ENGINE OR TRANSMISSION OIL
 MERCURY HEAVY DUTY DIESEL OIL
 OR EQUIVALENT

