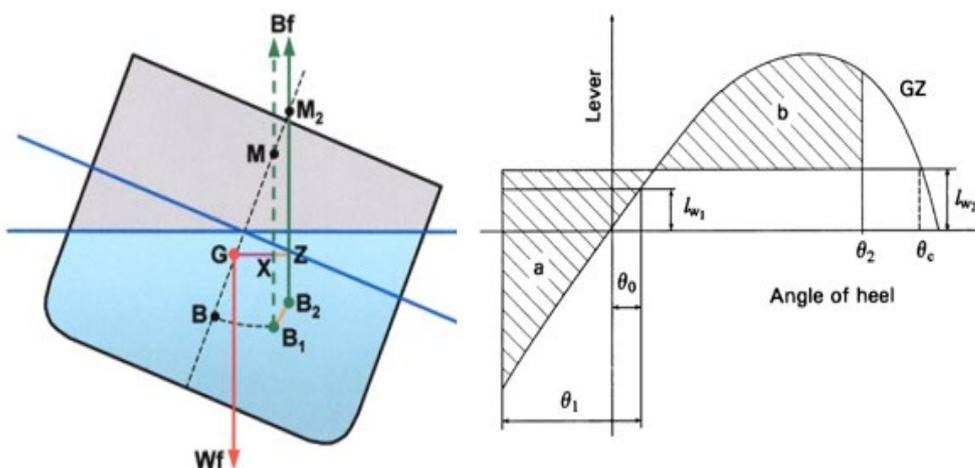


Polycopié de Cours

Stabilité Transversale des Navires à l'État Intact



Avant-Propos

La stabilité des navires est un aspect essentiel pour les professionnels du secteur maritime, car elle influence directement la sécurité maritime, la survie des navires et la protection de l'environnement. Ce document complet, intitulé "Stabilité transversale des navires à l'état intact", a été soigneusement élaboré pour les étudiants en troisième année de licence en génie maritime, toutes spécialités confondues.

S'appuyant sur un large éventail de sources, y compris des livres, des articles, des sites Web, en particulier celui de l'Organisation Maritime Internationale (OMI), et d'autres références pertinentes telles que les Résolutions et codes adoptés par l'OMI, ce document vise à fournir une compréhension globale des principes fondamentaux liés à la stabilité des navires dans des conditions de navigation normales. Les étudiants seront guidés à travers ces différents aspects de la stabilité intacte des navires avec une approche pédagogique et illustrative, garantissant clarté et compréhension.

Les objectifs de ce document sont les suivants :

1. Fournir une base solide en matière de stabilité des navires, en mettant l'accent sur les principes fondamentaux et les concepts clés, en s'appuyant sur la richesse des connaissances accumulées dans la littérature et les meilleures pratiques du domaine.
2. Développer la capacité des étudiants à analyser et évaluer la stabilité des navires dans diverses situations et conditions de navigation, en s'appuyant sur des études de cas et des exemples pratiques qui reflètent des scénarios réels.
3. Sensibiliser aux défis et problèmes liés à la stabilité des navires, notamment la sécurité maritime, la prévention des accidents et l'impact environnemental, en soulignant leur importance dans le paysage maritime en constante évolution d'aujourd'hui.
4. Préparer les étudiants à appliquer ces connaissances dans leurs futures carrières maritimes, les encourageant à contribuer à améliorer la sécurité maritime et à développer des solutions innovantes aux problèmes de stabilité.

Tout au long des chapitres, les étudiants seront guidés à travers divers aspects de la stabilité intacte des navires, adoptant une approche pédagogique et illustrative. Des exercices pratiques et des études de cas permettront aux étudiants d'appliquer leurs nouvelles connaissances à des situations réalistes, renforçant ainsi leur compréhension des concepts présentés.

En espérant susciter une passion pour le domaine de la stabilité des navires, ce document a été conçu pour offrir aux étudiants en génie maritime une base solide en matière de stabilité des navires, pour les préparer à relever les défis du secteur maritime en constante évolution. Nous souhaitons que cette ressource enrichisse leur expérience éducative et les guide vers un avenir prometteur et réussi dans le domaine du génie maritime, en les préparant à contribuer à la sécurité maritime, à la protection de l'environnement et à l'innovation dans ce secteur.

Dr. Abdeljalil BENMANSOUR

Table des Matières

Page

Avant-Propos

CHAPITRE 1

Généralités

1.1. Introduction	1
1.2. Notion de flottabilité	2
1.2.1. Principe d'Archimède.....	2
1.2.2. Poussée d'Archimède et force de gravité	3
1.2.3. Flottabilité et équilibre hydrostatique	3
1.3. Notion de stabilité.....	4
1.3.1. Stabilité transversale	4
1.3.2. Équilibre stable, neutre et instable	4
1.3.3. Facteurs affectant la stabilité des navires	6
1.4. Conclusion	7

CHAPITRE 2

Principe de base de la stabilité des navires

2.1. Densité, masse et volume	9
2.2. Les lois de flottabilité	10
2.3. Tirant d'eau et franc-bord	11
2.4. Réserve de flottabilité	12
2.5. Étude de cas : Comprendre le déplacement d'une barge parallélépipédique	13
2.6. Stabilité initiale d'un navire	14

CHAPITRE 3

Coefficients de forme

3.1. Coefficient de finesse	16
-----------------------------------	----

3.2. Coefficient de Bloc CB	18
3.3. Coefficient de remplissage au maître-couple CM	18
3.4. Coefficient prismatique Cp	19
3.5. Relations entre les coefficients de forme et de remplissage	20

CHAPITRE 4

Le TPC (Tonne par unité de variation de tirant d'eau)

4.1 Formulation du TPC	23
4.2. 4.2. Facteurs influençant le TPC	24
4.3. Interpolation des données hydrostatiques	26
4.4. Conséquences du chargement et du déchargement	27

CHAPITRE 5

Les lignes de charge (Load lines)

5.1. Marque du franc-bord	28
5.2. Dimensions des lignes de charge	30
5.3. Tolérance du franc-bord en eau douce (FWA)	32
5.4. Tolérance du franc-bord en eau de quai (DWA)	34

CHAPITRE 6

Centre de gravité et centre de carène

6.1. Centre de gravité	37
6.2. Conséquences du déplacement de poids déjà à bord	38
6.3. Influence du chargement des poids sur l'équilibre du navire.....	39
6.4. Influence du déchargement des poids sur la stabilité du navire	41
6.5. Problèmes de poids multiples	42
6.6. Centre de carène (B)	44

CHAPITRE 7

Stabilité statique transversale

38
39

	39
7.1. Stabilité statique transversale	47
7.2 Analyse du bras de levier transversal (GZ)	48
7.3. Analyse du moment de stabilité statique	50
7.4. Le métacentre transversal initial (M)	51
7.5. Hauteur métacentrique (GM)	53

CHAPITRE 8

Condition de stabilité des navires

8.1. Condition d'équilibre stable	57
8.2. Condition d'équilibre neutre	58
8.3. Condition d'équilibre instable	58
8.4. Maintien de la stabilité des navires	59
8.5. Évaluation et amélioration de la stabilité des navires	60

CHAPITRE 9

Métacentre transversal initial

9.1 Explication du Métacentre transversal initial	63
9.2. Calcul de KM pour un navire type « Barge »	64
9.3. Utilisation du diagramme de métacentre	66
9.4. Exemple de détermination de KG final avec un GM exigé	66

CHAPITRE 10

Effet de la surface libre sur la stabilité d'un navire

10.1 Effet de la surface libre sur la stabilité transversale	68
10.2. Effet de surface libre dans un réservoir rectangulaire	71
10.3. Moments de surface libre	72
10.4. Représentation des données de surface libre dans les tables de jaugeage	75
10.5. Facteur influençant l'effet de la surface libre	76

CHAPITRE 11

Critères réglementaires sur la stabilité transversale

11.1. Rappels sur la stabilité des navires	83
11.2. Critères de Stabilité selon le Code de stabilité intacte (IS Code), 2008	86
11.2.1. Critères généraux de stabilité pour tous types de navires	86
11.2.2. Critères spécifiques pour les navires à passagers	91
11.2.3. Critères spécifiques pour les navires transportant de bois sur le pont	91
11.2.3. Critères supplémentaires	92

CHAPITRE 12

Effet du vent sur la stabilité des navires

12.1. L'impact du vent sur la stabilité des navires	93
12.2. Critère vent violent et roulis (critère météorologique)	94
Conclusion	99
Bibliographie	100

Généralités

1.1. Introduction

La stabilité transversale des navires à l'état intact est un aspect essentiel pour la sécurité maritime, la survie des navires et la protection de l'environnement. La stabilité est déterminée par plusieurs facteurs, tels que le principe d'Archimède, la flottabilité, le centre de gravité et le centre de carène, qui sont tous pris en compte dans les diverses étapes de la conception, de la construction, de la propulsion, de l'exploitation et de la réparation des navires.

La stabilité est une préoccupation constante des équipages des navires en service. Un chargement inadéquat, une avarie ou un état de mer particulier peuvent dégrader la stabilité et mettre le navire en danger, car les incidents de stabilité ne sont jamais négligeables et engagent toujours la survie même du navire.

La stabilité est la capacité d'un navire à revenir à une position verticale droite après avoir été incliné par une force extérieure, comme le vent, la houle ou par les manœuvres : giration, prise de chargement. 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 et des conditions inadéquates de navigation. Les deux premiers facteurs sont pris en compte dans l'étude de la stabilité statique, tandis que le troisième facteur est considéré dans l'étude de la stabilité instantanée.

La stabilité peut être immédiatement évaluée par la connaissance du GM (G : centre de gravité, M : Métacentre, GM : Hauteur métacentrique) et des tirants d'eau avant et arrière du navire. Si le navire présente une gîte permanente, la connaissance de cette inclinaison permet d'évaluer son influence sur la stabilité.

Lors de la conception des navires, les architectes navals utilisent des méthodes et des technologies avancées pour évaluer la stabilité, comme les logiciels de simulation et les modèles numériques. Ces outils permettent de prendre en compte les facteurs qui affectent la stabilité et d'optimiser la performance des navires.

La construction des navires doit être réalisée en respectant des normes strictes pour garantir la qualité et la sécurité. Les chantiers navals doivent utiliser des matériaux de qualité et suivre des procédures rigoureuses pour assurer une bonne stabilité du navire.

Les équipages doivent être formés pour gérer les situations d'urgence liées à la stabilité et être conscients des différentes conditions de navigation afin de maintenir la stabilité du navire en toutes circonstances. La formation et la sensibilisation à la stabilité sont essentielles pour prévenir les accidents et les incidents liés à la stabilité).

Les critères réglementaires, tels que ceux établis par l'Organisation maritime internationale (IMO), doivent également être pris en compte pour garantir la stabilité du navire. Les administrations maritimes nationales et régionales ont également des normes de stabilité pour assurer la sécurité des navires naviguant dans leurs eaux territoriales.

Les réparations et les modifications des navires peuvent affecter la stabilité. Il est crucial que ces travaux soient effectués en suivant des procédures strictes pour assurer la qualité des réparations et éviter d'altérer la stabilité du navire. Les professionnels du secteur maritime doivent être conscients de ces différents facteurs pour garantir la stabilité des navires et assurer une navigation sûre en mer.

La courbe de bras de levier est également une donnée importante pour la stabilité d'un navire et doit être prise en compte dans tous les aspects de la conception, de la construction, de la propulsion, de l'exploitation et de la réparation des navires. Les nouvelles technologies et les innovations dans le domaine de la stabilité des navires continuent d'évoluer, permettant d'améliorer encore la sécurité et la performance des navires.

La stabilité transversale des navires à l'état intact est un facteur crucial pour la sécurité maritime et la protection de l'environnement. La prise en compte des principes d'Archimède, de la flottabilité, du centre de gravité et du centre de carène, ainsi que l'évaluation des facteurs qui affectent la stabilité, sont essentielles pour assurer la conception, la construction, la propulsion, l'exploitation et la réparation sécurisées des navires. Les professionnels du secteur maritime doivent travailler ensemble pour améliorer la stabilité des navires et assurer une navigation sûre en mer

1.2. Notion de flottabilité

La flottabilité est une propriété fondamentale qui permet aux objets de rester à la surface ou de flotter dans un fluide, tels que l'eau. Elle joue un rôle essentiel dans le fonctionnement et la stabilité des navires, en dépit de leur construction à partir de matériaux lourds comme l'acier. Pour comprendre ce phénomène et son impact sur les navires, il est nécessaire d'examiner les principes scientifiques et les forces en jeu qui influencent la flottabilité. Dans cette section, nous explorerons les concepts clés et les principes qui régissent la flottabilité des navires, en mettant l'accent sur le principe d'Archimède, la relation entre la poussée d'Archimède et la force de gravité, et l'équilibre hydrostatique. Ces connaissances permettront de mieux comprendre le comportement des navires en mer et les facteurs qui déterminent leur capacité à flotter.

1.2.1. Principe d'Archimède

Le principe d'Archimède joue un rôle crucial dans la compréhension de la flottabilité des navires, malgré leur construction à partir de matériaux lourds tels que l'acier. Énoncé par le scientifique grec Archimède au III^e siècle, ce principe stipule que "tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé". Dans le contexte des navires, la force de poussée d'Archimède est essentielle pour contrebalancer la force de gravité qui tend à enfoncer le navire dans l'eau. La magnitude de cette force de poussée dépend du volume de la partie immergée de la coque (carène) et du poids du fluide déplacé. Comme le montre la Figure 1.1. Illustration du principe d'Archimède, la force de gravité qui tend à enfoncer le navire dans l'eau (représentée par le centre de gravité G sur le plan transversal) est compensée par la pression hydrostatique totale d'eau exercée sur la carène, qui tend à repousser le navire vers le haut (représentée par le centre de poussée B).

Cette égalité entre le poids et la pression hydrostatique totale d'eau sur la carène est vraie si le navire est étanche sous la flottaison et si le poids ne dépasse pas la pression totale de l'eau sur la carène (surcharge).

1.2.2. Poussée d'Archimède et force de gravité

La flottabilité des navires est le résultat de l'équilibre entre la poussée d'Archimède et la force de gravité. Comme illustré dans la Figure 1.1. Illustration du principe d'Archimède, la poussée d'Archimède (représentée par le centre de poussée B) agit

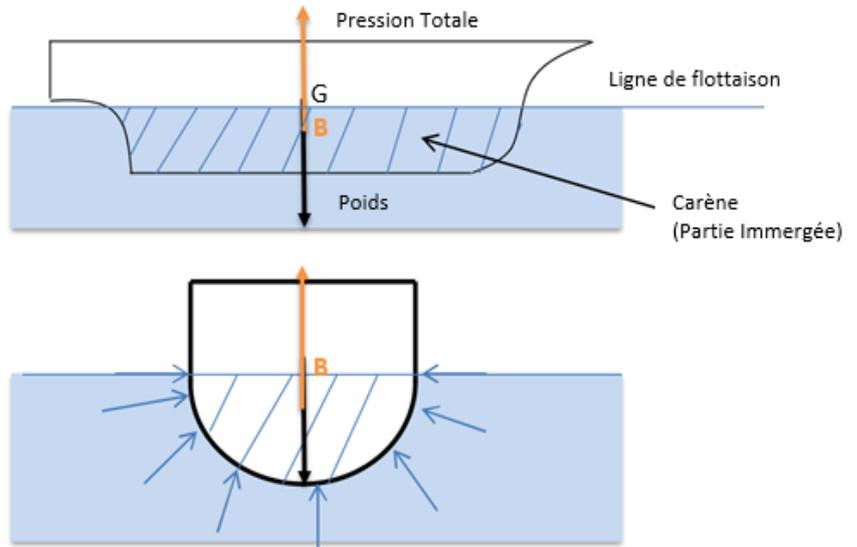


Figure 1.1. Illustration du principe d'Archimède

vers le haut et compense la force de gravité (représentée par le centre de gravité G) qui agit vers le bas. Cet équilibre est essentiel pour assurer la flottabilité et la stabilité des navires.

Pour qu'un navire flotte, la poussée d'Archimède doit être égale ou supérieure à la force de gravité. Si la poussée d'Archimède est inférieure à la force de gravité, le navire coulera. À l'inverse, si la poussée d'Archimède est supérieure à la force de gravité, le navire s'élèvera jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. C'est la raison pour laquelle les navires peuvent flotter en dépit de leur poids et de leur construction à partir de matériaux lourds tels que l'acier.

1.2.3. Flottabilité et équilibre hydrostatique

La présente section souligne l'importance des concepts de la flottabilité et équilibre hydrostatique dans la conception et la navigation des navires. Un exemple simple permet d'illustrer ces concepts et est présenté sur la figure 1.2.

L'exemple implique deux morceaux de pâte à modeler de même poids (500 g), l'un modelé sous forme d'une boule compacte, l'autre sous forme d'un bol avec une cavité centrale. Malgré leur poids identique, le bol flotte tandis que la boule coule. Cela est dû à la poussée d'Archimède, une force qui agit vers le haut

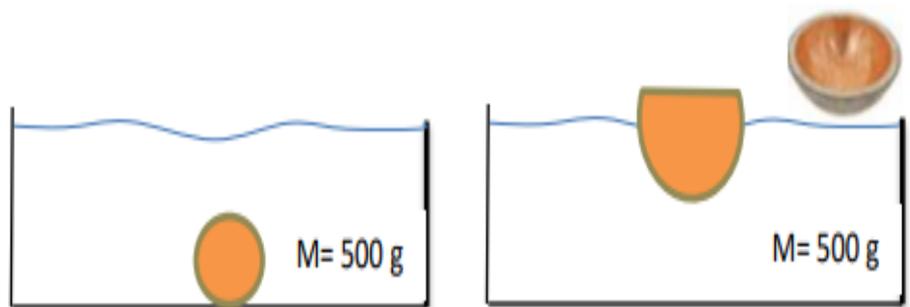


Figure 1.2. Comparaison de la flottabilité entre une boule et un bol de pâte à modeler.

sur tout objet immergé dans un fluide. La forme concave du bol augmente la poussée d'Archimède qui lui est appliquée, lui permettant de flotter, tandis que la boule, de forme compacte, a une poussée d'Archimède plus faible et coule.

Ce principe est directement applicable aux navires. La flottabilité et l'équilibre hydrostatique d'un navire dépendent du volume de la partie immergée de la coque (carène) et de la densité du fluide dans lequel le navire est plongé. Tout comme pour le bol de pâte à modeler, un navire peut être conçu pour maximiser la poussée d'Archimède et minimiser la force de gravité qui lui est appliquée, lui permettant de flotter.

L'équilibre hydrostatique, état où la poussée d'Archimède est égale à la force de gravité agissant sur le navire, permet à celui-ci de flotter sans couler ni monter davantage dans l'eau.

En modifiant la forme de la carène d'un navire, notamment en créant une cavité remplie d'air¹ dont la densité est inférieure à celle de l'eau, il est possible d'augmenter sa poussée d'Archimède. Cela, à son tour, améliore la flottabilité du navire, de la même manière que la forme concave du bol de pâte à modeler augmente sa poussée d'Archimède.

En conclusion, les principes de flottabilité et d'équilibre hydrostatique, illustrés par l'exemple de la pâte à modeler, sont également fondamentaux pour comprendre le comportement des navires en mer et leur capacité à flotter.

1.3. Notion de stabilité

La stabilité d'un navire se réfère à sa capacité à résister au chavirement provoqué par la mer, son chargement ou son poids, ainsi qu'à son aptitude à rester droit et à revenir à cette position lorsqu'il est écarté par une force extérieure. Afin d'expliquer l'équilibre d'un navire sur l'eau, il est essentiel de définir deux notions importantes : le centre de carène et le centre de gravité.

1.3.1. Stabilité transversale

La stabilité transversale concerne le mouvement de roulis (oscillation latérale) d'un navire autour de son axe longitudinal. Pour qu'un navire soit stable, il faut que les deux forces en présence, le poids du navire vers le bas et la poussée d'Archimède vers le haut, soient égales. Le centre de gravité du navire dépend de son poids et la poussée d'Archimède s'applique au centre du volume immergé (le centre de carène). Ainsi, pour garantir la stabilité, le centre de gravité doit se trouver en dessous du centre de carène.

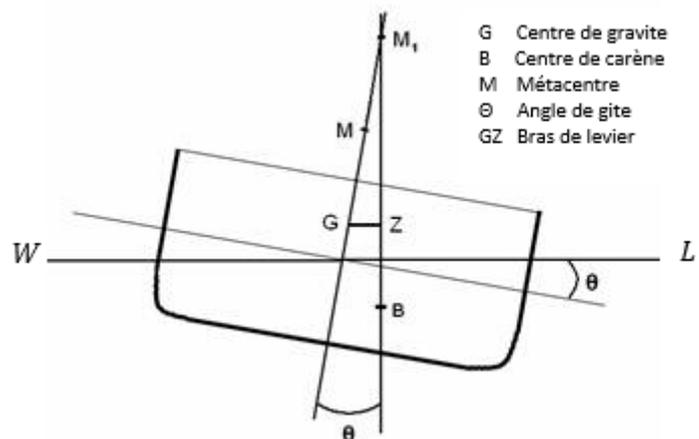


Figure 1.3. Schéma de la stabilité transversale

1.3.2. Équilibre stable, neutre et instable

Considérons un corps en équilibre statique sur la figure 1.4. Lorsqu'il est légèrement déplacé de sa position d'équilibre, le corps peut réagir de trois façons différentes. Si le corps revient vers sa position d'équilibre, l'équilibre est dit stable.

¹ Une cavité remplie d'air fait référence à un espace vide à l'intérieur de la coque du navire qui est délibérément rempli d'air. Cette cavité peut prendre diverses formes et tailles selon le design du navire. L'air à l'intérieur de la cavité a une densité plus faible que celle de l'eau environnante, ce qui contribue à augmenter la poussée d'Archimède sur le navire et donc sa flottabilité. Il s'agit d'un principe clé dans la conception des navires pour garantir leur capacité à flotter et à se déplacer efficacement sur l'eau.

Dans ce cas, un objet en équilibre stable tend à retourner à sa position d'équilibre lorsqu'il est légèrement déplacé. Si le corps demeure en équilibre et conserve sa nouvelle position, l'équilibre est considéré comme neutre ou indifférent. Pour un objet en équilibre neutre, il a tendance à conserver sa nouvelle position après un léger déplacement.

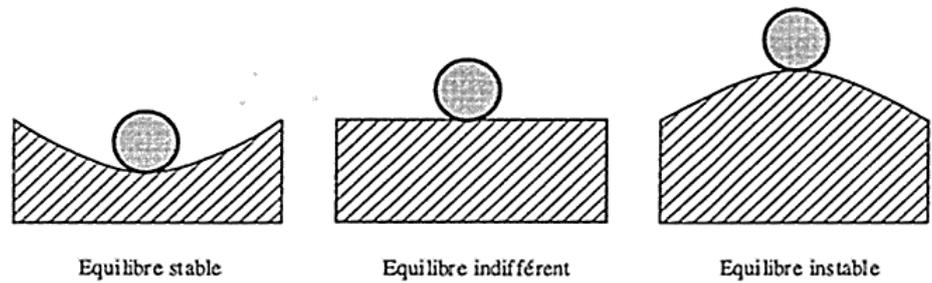


Figure 1.4. Conditions d'équilibre d'un corps

Enfin, si le corps s'éloigne davantage de sa position d'équilibre, un tel équilibre est qualifié d'instable. Dans cette situation, un objet en équilibre instable s'éloigne de sa position d'équilibre lorsqu'il est légèrement déplacé.

Concernant l'équilibre d'un navire, il est possible de distinguer trois catégories distinctes, chacune présentant des caractéristiques spécifiques.: stable, neutre et instable. Ces catégories sont basées sur les principes généraux d'équilibre statique, illustrés par la Figure 1.4, et leur application aux navires en considérant les positions relatives des centres de gravité (G) et de carène (B), comme le montre la Figure 1.5.

Cas d'un corps flottant « Exemple : un navire »

Équilibre stable : Un navire en équilibre stable revient à sa position initiale après avoir été légèrement déplacé. Cette stabilité résulte de la position du centre de gravité (G) en dessous du centre de carène (B).

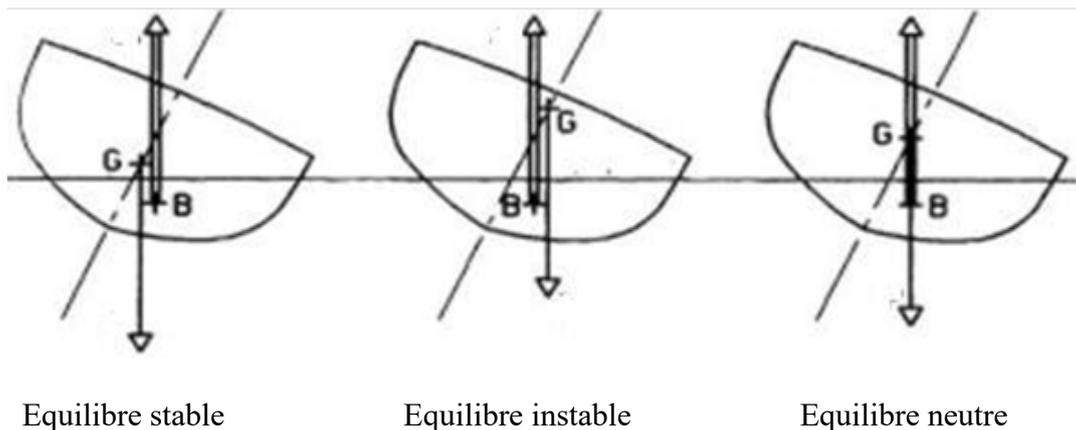


Figure 1.5. Conditions d'équilibre d'un navire.

Dans cette configuration, le navire assure sa sécurité en navigation en retrouvant sa position d'équilibre après avoir été perturbé par des forces extérieures telles que des vagues ou des vents.

Équilibre neutre : Un navire en équilibre neutre conserve sa nouvelle position après un déplacement léger, sans revenir à sa position initiale ni s'éloigner davantage. Cela se produit lorsque les centres de gravité (G) et de carène (B) sont alignés verticalement. Dans ce cas, le navire est moins sensible aux perturbations extérieures, mais peut aussi être plus difficile à contrôler.

Équilibre instable : Un navire en équilibre instable s'éloigne de sa position initiale après avoir été légèrement déplacé, ce qui peut entraîner un chavirement. Cela se produit lorsque le centre de gravité (G) est au-dessus du centre de carène (B). Un navire dans cet état d'équilibre est dangereux et nécessite une attention particulière en matière de conception, de chargement et de manœuvre pour éviter les accidents en mer.

1.3.3. Facteurs affectant la stabilité des navires

Plusieurs facteurs peuvent influencer la stabilité d'un navire, dont les suivants :

1. La forme de la coque : La conception et la forme de la coque ont un impact direct sur la stabilité du navire. Les formes plus profondes (2) et plus larges (3) présentées sur la Figure 1.6 offrent généralement une meilleure stabilité.

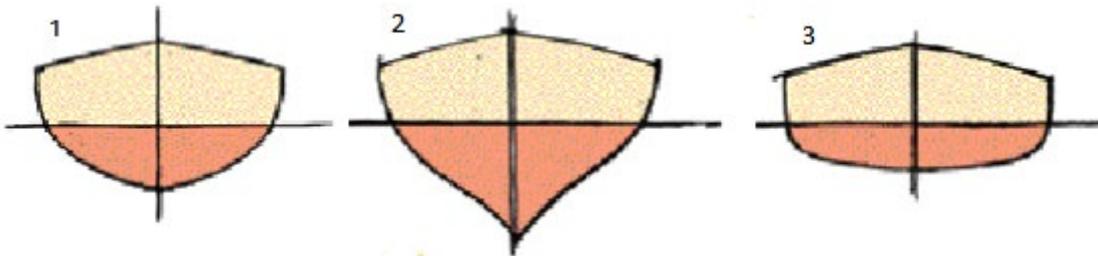


Figure 1.6. Figure 1.6. Illustration de diverses formes de coques de navire

2. La distribution du poids : La répartition du poids à bord du navire, y compris le chargement de la cargaison, le positionnement des réservoirs de carburant et d'eau comme illustré sur la Figure 1.7, et l'emplacement des équipements, affecte la position du centre de gravité (G) et, par conséquent, la stabilité.

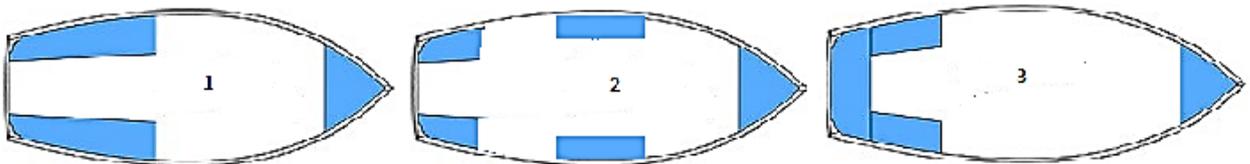


Figure 1.7. Répartition des réservoirs de carburant et d'eau à bord

3. Le déplacement : Le déplacement d'un navire, correspondant à la masse d'eau déplacée par la coque, a un impact significatif sur la flottabilité et la stabilité. Les navires avec un déplacement important ont tendance à présenter une meilleure stabilité en raison de la répartition de leur poids et du volume immergé. La comparaison entre un voilier et un navire de charge, comme illustré dans la Figure 1.8, met en évidence les différences dans la conception et la forme de la coque, ainsi que la manière dont elles affectent le déplacement. Les

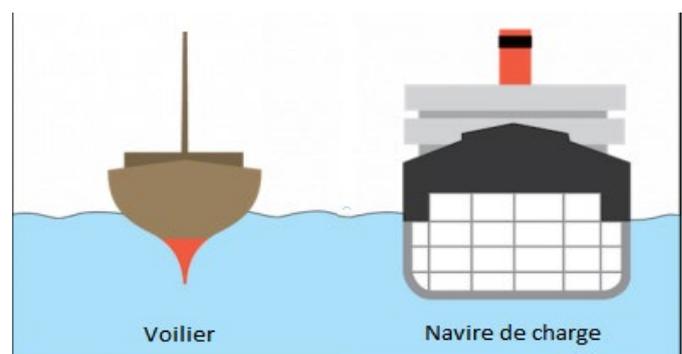


Figure 1.8. Comparaison voilier et navires de charge

voiliers ont généralement une coque plus fine et un déplacement inférieur à celui des navires de charge, qui ont une coque plus large et plus profonde pour soutenir les lourdes cargaisons transportées.

4. Les conditions météorologiques et marines :

La Figure 1.9 démontre l'influence considérable des conditions météorologiques et marines sur la stabilité des navires, en affectant leur capacité à préserver leur équilibre. Divers facteurs, tels que la force du vent, la force hydrostatique exercée par la pression de l'eau, la poussée d'Archimède et le poids du navire, contribuent à cette stabilité.

La force du vent agissant sur le côté bâbord d'un navire peut créer des moments d'inclinaison, provoquant une inclinaison du navire à

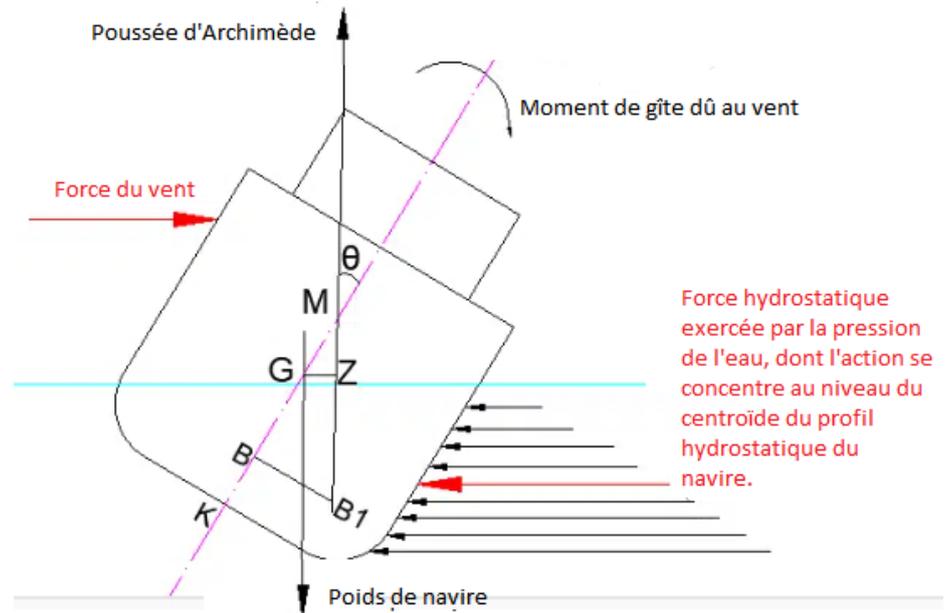


Figure 1.9. Effet du vent sur la stabilité des navires

tribord. Par ailleurs, la force hydrostatique exercée par la pression de l'eau agissant au niveau du centroïde du profil hydrostatique joue un rôle crucial dans la stabilité et l'équilibre du navire.

L'interaction entre la poussée d'Archimède et le poids du navire contribue également à maintenir l'équilibre global du navire. En outre, les vagues importantes peuvent exercer des forces latérales qui peuvent compromettre la stabilité transversale d'un navire. Il est donc essentiel de prendre en compte ces facteurs pour assurer la sécurité et la performance optimale des navires en mer.

Les modifications structurelles et opérationnelles d'un navire, telles que l'ajout de superstructures ou l'utilisation de ballasts pour ajuster la flottabilité, peuvent impacter la stabilité. Il est essentiel pour les étudiants en ingénierie navale de comprendre les concepts de stabilité transversale et longitudinale, les différents types d'équilibre et les facteurs qui influencent la stabilité. La stabilité est atteinte lorsque les forces de poids et de poussée d'Archimède sont équilibrées, avec le centre de gravité situé en dessous du centre de carène et aligné sur la même verticale.

1.4. Conclusion

En conclusion de ce chapitre consacré aux généralités sur la stabilité transversale des navires à l'état intact, nous avons mis en lumière plusieurs concepts clés et facteurs qui jouent un rôle crucial dans la stabilité des navires. Une compréhension approfondie des principes d'Archimède, de la flottabilité, du centre de gravité et du centre de carène, ainsi que des forces et des moments qui influent sur la stabilité, est essentielle pour les étudiants et les professionnels du secteur maritime.

Nous avons exploré divers facteurs affectant la stabilité des navires, tels que les conditions météorologiques et marines, la répartition du poids à bord du navire, et l'importance de la stabilité

statique et instantanée dans des conditions normales de navigation. Les étudiants doivent être capables d'évaluer la stabilité d'un navire en tenant compte de ces facteurs.

Les avancées technologiques et les innovations dans le domaine de la stabilité des navires continuent d'évoluer, offrant des opportunités pour améliorer la sécurité et la performance des navires en mer. Les étudiants et les professionnels du secteur maritime doivent se tenir informés des développements dans ce domaine et collaborer pour garantir une navigation sûre et respectueuse de l'environnement.

Les généralités abordées dans ce chapitre fournissent une base solide pour les étudiants qui souhaitent approfondir leur connaissance de la stabilité transversale des navires à l'état intact. La maîtrise de ces concepts et principes est essentielle pour réussir une carrière dans le secteur maritime et contribuer à assurer la sécurité et la durabilité de la navigation en mer.

Chapitre 2

Principe de base de la stabilité des navires

Introduction

Ce chapitre aborde les différentes lois qui régissent la flottabilité et permettent de comprendre pourquoi les navires flottent. Elle constitue un niveau de base essentiel pour appréhender l'analyse de la stabilité des navires. Les objectifs de cette section sont les suivants :

1. Comprendre les termes : densité, masse et volume, et être capable d'effectuer des calculs simples relatifs à ces termes.
2. Comprendre les principes de flottabilité.
3. Comprendre les variations du tirant d'eau et du franc-bord lors du déplacement d'une barge entre des eaux de densités différentes.
4. Appliquer ces notions à l'étude d'une barge.

2.1. Densité, masse et volume

La densité pour une substance donnée est la masse par unité de volume, définie par l'expression suivante

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}} \quad (2.1)$$

Dans les calculs de stabilité des navires, on utilise souvent les unités de mesure suivantes :

Masse : tonnes (t)

Volume : mètres cubes (m³)

Densité : tonnes par mètre cube (t/m³)

A partir de (2.1), on peut ressortir d'autres expressions :

$$\text{Volume} = \text{masse} / \text{densité} \quad (2.2)$$

$$\text{Masse} = \text{volume} \times \text{densité} \quad (2.3)$$

La densité relative (Relative Density, RD) d'une substance est souvent utilisée à la place de la densité. C'est simplement la comparaison de la densité de la substance avec celle de l'eau douce :

$$RD = \frac{\text{Densité de la substance}}{\text{Densité de l'eau douce}} \quad (2.4)$$

La densité de l'eau dans laquelle un navire flotte joue un rôle important dans la stabilité et la flottabilité du navire.

L'eau peut être classée en trois catégories principales en fonction de sa densité :

- **Eau douce** (Fresh water, Fw) : C'est une eau dont la densité est proche de 1,000 t/m³ (tonnes par mètre cube) et la densité relative (RD) est de 1. Elle constitue la principale source d'eau potable et elle occupe les lacs, les rivières et les réservoirs.

- **Eau de quai** (Dock water, DW) : C'est une eau dont la densité est comprise entre celle de l'eau douce et celle de l'eau salée. Elle résulte du mélange des eaux douces et salées dans les zones côtières, comme les estuaires et les ports à l'embouchure des rivières. La densité de l'eau de quai varie selon les conditions locales, la marée, les précipitations et d'autres facteurs.
- **Eau salée** (Salt water, Sw) : C'est une eau dont la densité avoisine $1,025 \text{ t/m}^3$ et la densité relative est de 1,025. C'est l'eau de mer qui remplit les océans et les mers.

La densité de l'eau influe sur la flottabilité d'un navire. Un navire flotte plus haut dans l'eau salée que dans l'eau douce car l'eau salée a une densité plus élevée et exerce une plus grande force d'Archimède sur le navire. Quand un navire passe d'une eau plus dense à une eau moins dense, son tirant d'eau s'accroît et son franc-bord se réduit.

Les navigateurs et les concepteurs de navires doivent prendre en compte les variations de densité de l'eau pour assurer la stabilité des navires en mer. La stabilité d'un navire dépend de son centre de gravité, de son centre de carène et de son métacentre. Ces paramètres sont affectés par le poids du navire, la forme de sa coque et le volume d'eau déplacé.

2.2. Les lois de flottabilité

Dans l'étude des principes de base de la stabilité des navires, deux règles sont à considérer : Principe d'Archimède et Loi de flottabilité

Principe d'Archimède

La loi d'Archimède est une loi fondamentale de la physique qui stipule que :

Tout corps partiellement ou totalement immergé dans un fluide reçoit une poussée verticale dirigée du bas vers le haut, égale en intensité au poids du volume de fluide déplacé.

Cette poussée est appliquée au centre du volume immergé, et elle est représentée par la force de poussée d'Archimède.

En d'autres termes, la force de poussée d'Archimède est la force résultant de toutes les pressions hydrostatiques sur la partie immergée d'un corps flottant, qui s'exerce dans une direction opposée à la force de gravité (poids du corps flottant). La figure 2.1 illustre cette relation entre les forces de gravité et la force de poussée d'Archimède, montrant comment la poussée d'Archimède s'applique au centre du volume immergé, tandis que la force de gravité s'applique au centre de gravité du corps flottant.

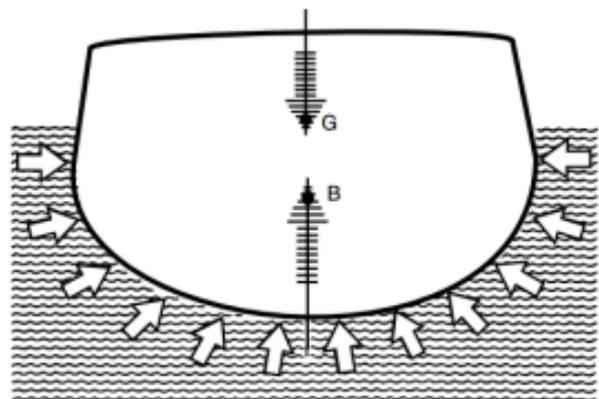


Figure 2.1. Relation entre les forces de gravité (poids du corps flottant) et la force de poussée d'Archimède (\sum des pressions sur la partie immergée du corps flottant)

La compréhension de la loi d'Archimède est essentielle pour la conception et la navigation de navires et autres structures flottantes. En comprenant comment la poussée d'Archimède et la force de gravité interagissent, il est possible de déterminer la

flottabilité et la stabilité d'un objet immergé dans un fluide, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité et l'efficacité de la navigation.

Loi de flottabilité

Tout corps flottant déplace son propre poids du fluide dans lequel il flotte (la masse du fluide déplacée par le corps est égale à la masse de ce corps).

Le déplacement, en anglais *Displacement*, d'un navire (ou tout objet flottant) est défini comme étant le nombre de tonnes de l'eau déplacée. Le volume de déplacement est le volume immergé d'un navire à flot (volume sous la flottaison).

Pour calculer le déplacement (**W**) du navire, on doit connaître :

- Volume de déplacement (**V**)⁽¹⁾
- Densité de l'eau dans laquelle il flotte (**ρ**)

D'où :

$$\text{Masse} = \text{Volume} \times \text{Densité} \quad (2.5)$$

La masse ou déplacement (**Displ**)⁽²⁾ du navire est calculé par :

$$\text{Déplacement (Displ)} = \text{Volume de déplacement} \times \text{Densité de l'eau} \quad (2.6)$$

$$W = V \times \rho \quad (2.7)$$

2.3. Tirant d'eau et franc-bord

- Le tirant d'eau, en anglais *Draught*, est un concept fondamental en matière de conception navale, décrivant la profondeur à laquelle un navire est immergé sous la surface de l'eau. Cette mesure, comme illustré dans la Figure 3.2, est la distance verticale entre la ligne de flottaison du navire et la partie la plus basse de la coque, la quille. Lorsque le navire est en équilibre parfait, connu sous l'expression maritime "à l'assiette" ou "*even keel*" en anglais, le tirant d'eau à la proue (partie avant du navire) correspond précisément à celui à la poupe (partie arrière du navire).
- Le franc-bord, appelé *freeboard* en anglais, est la distance verticale entre la ligne de flottaison et le bord supérieur du pont principal d'un navire, comme illustré dans la figure 3.2. Le franc-bord est une mesure de la sécurité d'un navire, car il indique la hauteur à laquelle le navire peut être immergé sans

¹ Le "Volume de déplacement" fait référence au volume d'eau que déplace un navire lorsqu'il est immergé dans l'eau. C'est la quantité d'eau déplacée par la partie immergée (ou carène) du navire. Ce volume est généralement exprimé en mètres cubes (m³). En d'autres termes, il s'agit du volume occupé par la carène du navire dans l'eau, qui correspond au volume d'eau déplacé lorsque le navire est mis à flot. Le volume de déplacement est donc une mesure directe du poids du navire (puisque le poids d'un volume donné d'eau est une constante), et est un facteur crucial dans la conception de la stabilité et de la flottabilité du navire.

² "Displ" est l'abréviation de "déplacement", un terme utilisé dans la construction navale pour décrire la masse de liquide déplacée par la partie immergée d'un navire dans différentes situations de chargement. Il est noté **W** ou **Δ** et il est égal au poids du navire. Le déplacement varie avec le tirant d'eau

que l'eau n'envahisse le pont. Le franc-bord dépend du type, de la taille et de la conception du navire, ainsi que des règlements internationaux (LL66)³ qui fixent les normes minimales de franc-bord pour chaque catégorie de navire." Cette mesure détermine la capacité du navire à résister aux intempéries et aux vagues, et donc sa sécurité en mer. Plus le franc-bord est important, plus le navire est à même de résister à des conditions de mer difficiles sans être submergé

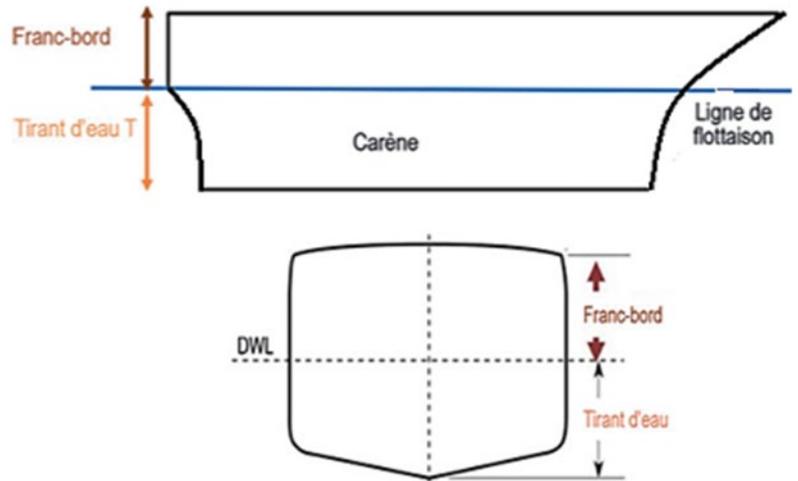


Figure 2.2. Tirant d'eau et franc-bord

2.4. Réserve de flottabilité

La réserve de flottabilité est la capacité d'un navire à résister à l'immersion, c'est-à-dire à rester à flot sans être submergé par l'eau. Cette capacité dépend à la fois du volume de la carène (Volume immergé du navire ou le volume du liquide déplacé) et du pont d'étanchéité, qui est la partie supérieure du navire conçue pour résister à l'intrusion de l'eau. Plus précisément, la réserve de flottabilité correspond au volume d'eau supplémentaire que le navire

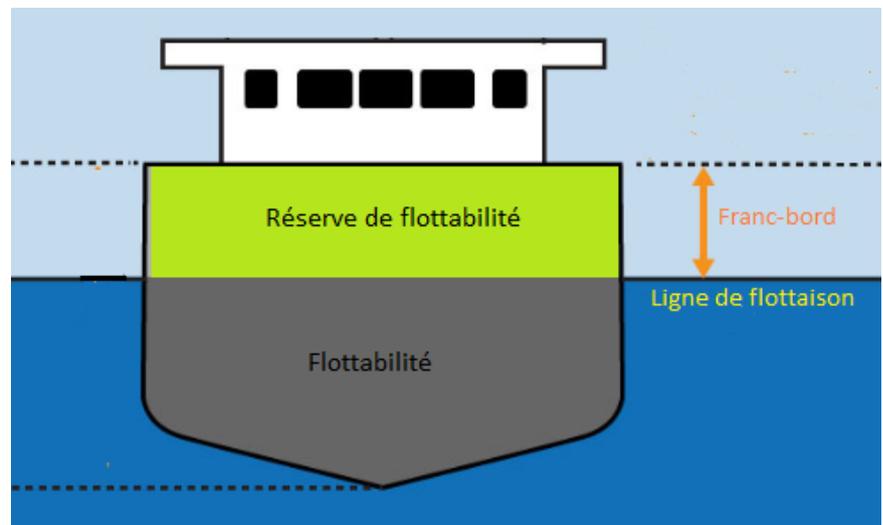


Figure 2.3. Réserve de flottabilité

peut déplacer sans que la ligne de flottaison n'atteigne le pont d'étanchéité, ligne qui délimite la partie immergée de la partie émergée du navire. En d'autres termes, la réserve de flottabilité définit le volume supplémentaire que le navire peut embarquer sans risquer de sombrer.

En complément, le volume de la carène situé sous la ligne de flottaison contribue à la flottabilité du navire, sa capacité innée à rester à la surface de l'eau.

Le franc-bord, distance verticale entre la ligne de flottaison et le pont le plus bas du navire, est déterminé précisément pour assurer cette réserve de flottabilité en toutes circonstances.

Il est donc essentiel de bien comprendre et d'évaluer ces termes et leurs interactions pour garantir une navigabilité minimale adéquate d'un navire. La distinction entre la flottabilité, qui garantit le maintien

³ LL66 est l'abréviation de la Convention internationale sur les lignes de charge (*International Convention on Load Lines* en Anglais) adoptée le 5 avril 1966 et est entrée en vigueur le 21 juillet 1968. La convention LL66 détermine le franc-bord des navires selon leur type et leur zone de navigation.

du navire à flot, et la réserve de flottabilité, qui assure la stabilité du navire face à des conditions météorologiques adverses ou en cas de surcharge, est mise en évidence dans la Figure 2.3.

Il faut savoir que le franc-bord est attribué (assigné) aux navires pour assurer la réserve de flottabilité à tout moment.

2.5. Étude de cas : Comprendre le déplacement d'une barge parallélépipédique

Pour mieux comprendre comment le déplacement d'un navire est affecté par la densité de l'eau dans laquelle il flotte, examinons le cas d'une barge parallélépipédique rectangulaire, souvent appelée "Box-Shaped Vessel". La Figure 2.4 illustre un tel navire. Voici les spécifications de cette barge :

- Longueur (L) = 80 m
- Largeur (B) = 16 m
- Densité = 1.025 t/m³
- Tirant d'eau (d) en eau salée = 4.2 m

La masse de la barge est obtenue en multipliant le volume par la densité.

Question 1 : Comment calculer le déplacement de la barge ?

Solution 1 : Pour déterminer le déplacement de la barge, nous utilisons la formule suivante : $\text{Displ} = \text{Volume de déplacement} \times \text{Densité de l'eau}$. Dans cette formule, le volume de déplacement (V) est déterminé par le produit $L \times B \times d$. Par conséquent, le déplacement de la barge s'obtient comme suit :

$$\text{Displ}_{\text{barge}} = (L \times B \times d) \times \text{Densité de l'eau} = (80 \text{ m} \times 16 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}) \times 1.025 \text{ t/m}^3 = 5491.2 \text{ tonnes.}$$

Question 2 : Que deviendrait le tirant d'eau de la barge si elle flottait dans une eau dont la densité est de 1.006 t/m³ ?

Solution 2 : En reprenant l'équation du déplacement ($\text{Displ} = (L \times B \times d) \times \text{Densité de l'eau}$), on peut réorganiser pour trouver d, le tirant d'eau. Ainsi, $d = 4.279 \text{ m}$. Par conséquent, l'augmentation du tirant d'eau serait de $4.279 \text{ m} - 4.200 \text{ m} = 0.079 \text{ m}$ (soit 79 mm).

Question 3 : Quelles seraient les conséquences pour cette barge si elle était remorquée dans une mer de densité inférieure, disons 1.006 t/m³ ?

Solution 3

Si nous nous référons à l'équation (2.6) : $\text{Displ} = \text{Volume de déplacement} \times \text{Densité de l'eau}$, nous pouvons constater que lorsque la densité de l'eau diminue, pour maintenir le déplacement constant (étant donné que le déplacement n'a pas changé), le volume de déplacement doit augmenter. Ceci est illustré dans la Figure 2.5.

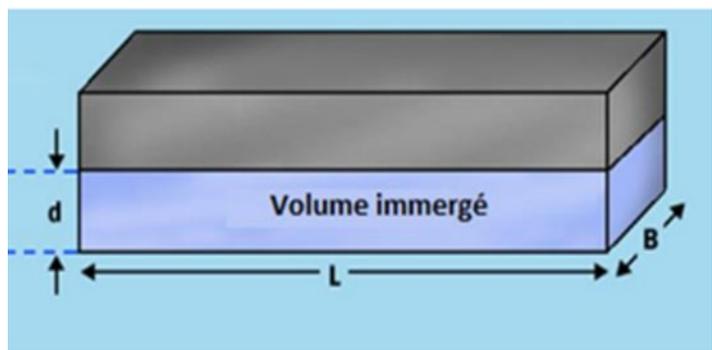


Figure 2.4. Caractéristique de la barge

Cette augmentation du volume de déplacement entraîne une légère immersion de la barge, ce qui signifie que le tirant d'eau augmente. Seule la distance 'd' peut changer pour provoquer cette augmentation du volume de déplacement, donc 'd' augmente tandis que la barge s'enfonce légèrement.

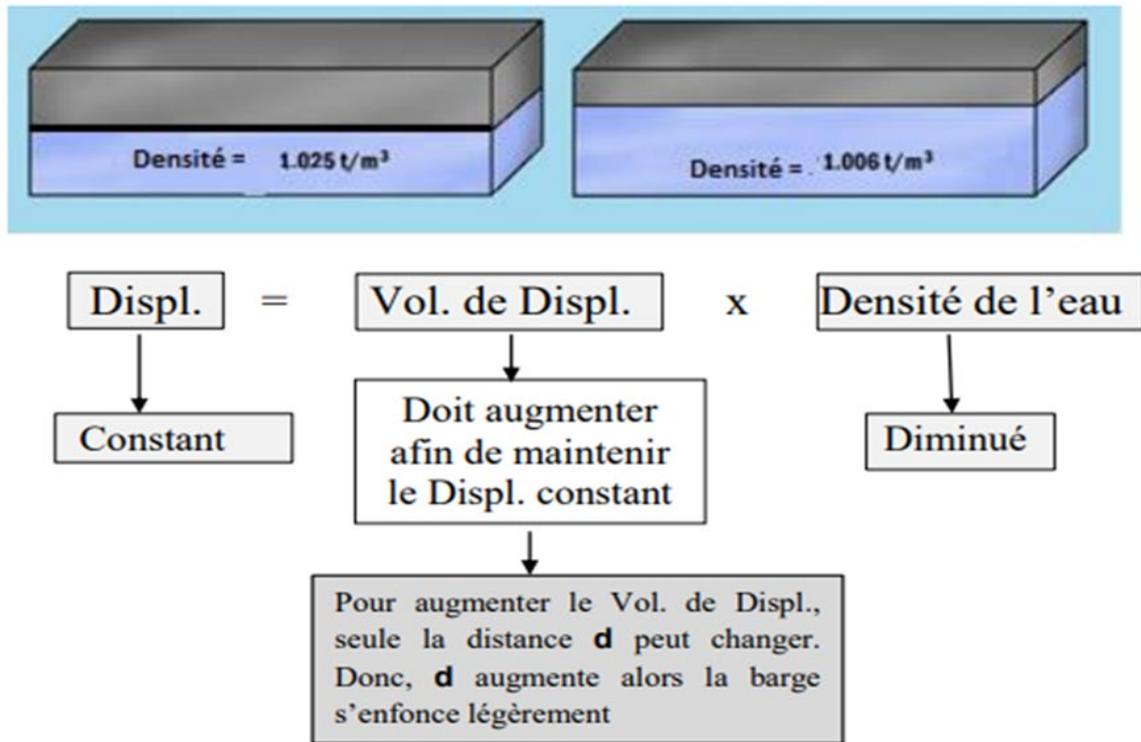


Figure 2.5. Variation du tirant d'eau en fonction de la densité de l'eau

Cela signifie que lorsqu'un navire (ou une barge) passe d'une eau à densité élevée à une eau à densité plus faible, il doit s'immerger davantage afin de déplacer le même poids d'eau et donc maintenir son déplacement constant. Il est essentiel de prendre en compte ce phénomène lors de la navigation entre différentes zones où la densité de l'eau varie, car cela peut affecter la sécurité et la stabilité du navire.

Ainsi, lorsqu'un navire (ou une barge) passe d'une eau de densité plus élevée à une eau de densité plus faible, il s'enfonce davantage pour déplacer la même masse d'eau et maintenir ainsi son déplacement constant. Il est important de prendre en compte ce phénomène lors de la navigation entre différentes zones où la densité de l'eau varie, car cela peut avoir un impact sur la sécurité et la stabilité du navire.

2.6. Stabilité initiale d'un navire

La stabilité initiale d'un navire est un élément essentiel pour s'assurer qu'il reste à flot et qu'il est capable de résister aux forces extérieures, telles que les vagues, les vents et les mouvements de cargaison. La stabilité initiale se concentre sur l'analyse des petites inclinaisons autour de la position verticale droite, jusqu'à environ 15°, et est étroitement liée au centre de gravité (G) et au centre de flottaison (B) du navire.

Un concept clé de la stabilité initiale est le métacentre (M). Lorsqu'un navire est en équilibre stable, le métacentre se situe au-dessus du centre de gravité, ce qui signifie qu'il a une hauteur métacentrique positive (GM). La distance entre G et M, appelée hauteur métacentrique, est une mesure importante de la stabilité initiale. Cette idée est illustrée dans la Figure 2.6, un navire avec un GM positif est considéré comme ayant une bonne stabilité initiale.

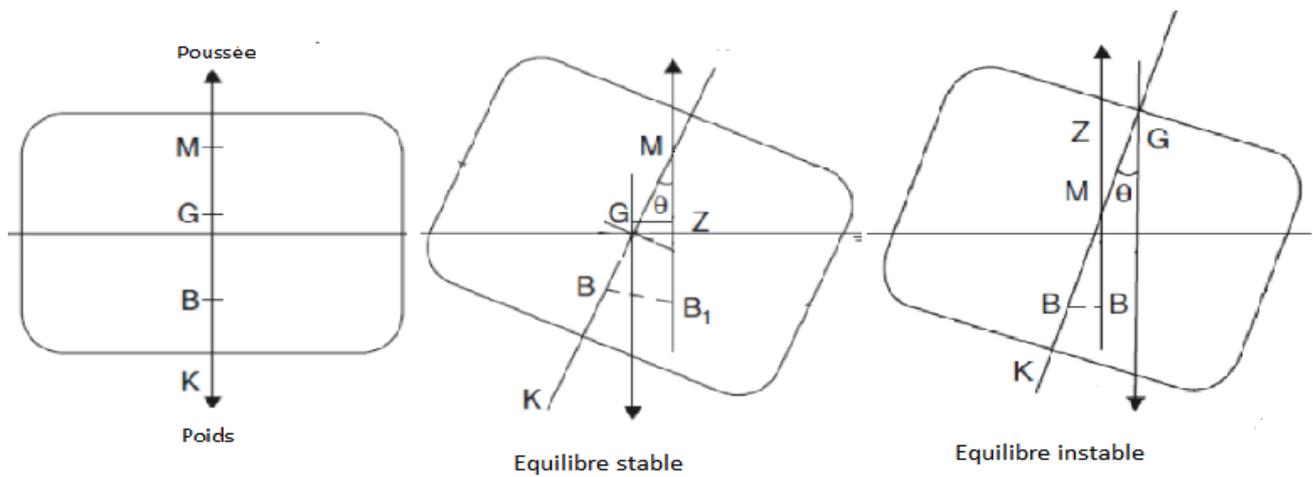


Figure 2.6. Stabilité initiale d'un navire

Dans cette figure, vous pouvez voir comment le métacentre (M) est positionné par rapport au centre de gravité (G). Le centre de gravité (G) est le point où l'on peut considérer que tout le poids du navire est concentré. Il dépend de la distribution de la masse du navire et de sa cargaison. Le centre de flottaison (B) est le point central du volume immergé du navire. Lorsque le navire est en équilibre, la poussée d'Archimède agit à travers ce point.

Si le centre de gravité (G) du navire est au-dessus du métacentre (M), on dit que le navire a un GM négatif ou une stabilité initiale négative. Un navire dans cet état a un roulis, c'est-à-dire qu'il flotte à un angle d'un côté ou de l'autre et qu'il risque de chavirer.

Dans n'importe quelle condition de chargement, le GM doit être positif pour assurer une stabilité adéquate. Les critères de l'Organisation maritime internationale (OMI) exigent qu'à toutes les étapes du chargement, du déchargement ou de la navigation, le GM minimum soit de 0,15 m.

Pour garantir la sécurité en mer, les concepteurs de navires doivent veiller à ce que la position du centre de gravité et la forme du navire permettent d'obtenir un GM suffisant pour résister aux forces extérieures rencontrées en mer.

Ce présent chapitre couvre les principes de base de la stabilité des navires, y compris les concepts de densité, masse, volume, flottabilité, tirant d'eau et franc-bord, ainsi que la hauteur métacentrique et l'équilibre instable. La compréhension de ces concepts est essentielle pour analyser la stabilité des navires et garantir leur sécurité en mer.

Conclusion

La stabilité et la flottabilité d'un navire dépendent d'un équilibre complexe entre plusieurs facteurs, notamment la masse, le volume, la densité et la poussée d'Archimède. La réserve de flottabilité, qui dépend du volume de la carène et du pont d'étanchéité, est essentielle pour résister à l'immersion. Le franc-bord, qui est la distance entre la ligne de flottaison et le pont le plus bas, garantit cette réserve. De plus, le déplacement d'un navire est affecté par la densité de l'eau, nécessitant une immersion plus importante dans des eaux de densité plus faible pour maintenir le déplacement constant. Enfin, la stabilité initiale du navire, liée au centre de gravité et au centre de flottaison, est essentielle pour résister aux forces extérieures et est mesurée par la hauteur métacentrique. La compréhension approfondie de ces concepts est fondamentale pour une conception de navire optimale, qui est en retour essentielle pour garantir la sécurité en mer.

Chapitre 3

Les coefficients de forme et de Remplissage

Introduction

Les coefficients de forme offrent une méthode mathématique pour comparer la forme immergée d'un navire avec des formes régulières qui partagent les mêmes dimensions principales. Ces coefficients sont largement utilisés lors de la phase de conception, avant la construction d'un navire, afin d'évaluer des facteurs tels que la résistance à l'avancement que le navire pourrait rencontrer en cours d'exploitation. Les résultats obtenus à partir de ces coefficients sont ensuite employés pour déterminer la puissance nécessaire pour atteindre la vitesse de croisière désirée. En outre, le coefficient de bloc est un paramètre essentiel dans le calcul et l'attribution du franc-bord du navire.

Les coefficients de forme ou de remplissage fournissent une manière simple mais efficace de caractériser les formes de la coque d'un navire et de les comparer entre elles. Ils permettent également de comprendre les formes de la coque à un niveau fondamental, avec des calculs effectués jusqu'au plan de flottaison d'été. Il est important de noter que ces coefficients sont sans dimension.

Les coefficients les plus significatifs incluent :

- Le coefficient de remplissage de la flottaison (C_W ou Water Plane Coefficient)
- Le coefficient de bloc (C_B ou Block Coefficient)
- Le coefficient de remplissage du maître-couple (C_M ou Midship Coefficient)
- Le coefficient prismatique (C_P ou Prismatic Coefficient)

3.1. Coefficient de remplissage de la flottaison C_w

Le coefficient de remplissage de la flottaison, noté C_w , est un paramètre important pour l'analyse de la stabilité d'un navire. Il mesure le rapport entre la surface du plan de flottaison (S_1) et la surface du rectangle qui le contient (S), c'est-à-dire la projection horizontale du navire. La figure 3.1 montre ces deux surfaces en bleu et en orange.

Le coefficient de remplissage de la flottaison, noté C_w , est un paramètre important pour l'analyse de la stabilité d'un navire. Il mesure le rapport entre la surface du plan de flottaison (S_1) et la surface du rectangle qui le contient (S), c'est-à-dire la projection horizontale du navire. La figure 3.1 montre la surface du plan de flottaison en bleu.

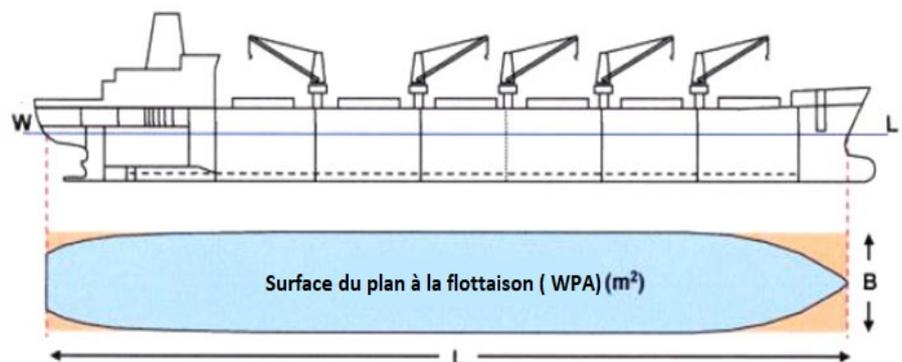


Figure 3.1. Surface du plan de flottaison et du rectangle circonscrit

$$C_W = \frac{S_1}{S} \quad (3.1)$$

Où :

S_1 : Surface du plan de flottaison en bleu

S : Surface du rectangle circonscrit en Jaune ($L \times B$)

Ce coefficient varie en fonction du tirant d'eau du navire, car la surface du plan de flottaison (S_1) change avec la hauteur d'eau. Il est toujours inférieur à 1, car le navire n'occupe pas tout le rectangle circonscrit ($L \times B$).

Autrement ;

$$C_W = \frac{\text{Surface du plan de flottaison}}{L \times B} \quad (3.2)$$

Le coefficient de remplissage de la flottaison reflète la forme du navire au niveau de l'eau. Plus il est élevé, plus le navire est large et court par rapport à sa longueur. Plus il est faible, plus le navire est étroit et long par rapport à sa largeur. Ce coefficient influe sur la résistance à l'avancement du navire, car il détermine la surface mouillée et la vague engendrée par le navire. Il influe aussi sur la stabilité transversale du navire, car il détermine le bras de levier du poids et de la poussée d'Archimède.

3.2. Coefficient de Bloc C_B

Le coefficient de bloc, noté C_B , est un paramètre qui quantifie le remplissage du volume immergé du navire par rapport au volume du parallélépipède rectangle qui l'englobe. Ce parallélépipède a pour dimensions la longueur (L), la largeur (B) et le tirant d'eau (d) du navire.

Comme l'illustre la figure 3.2, le volume du parallélépipède, appelé volume du bloc circonscrit, se calcule en multipliant la longueur, la largeur et le tirant d'eau :

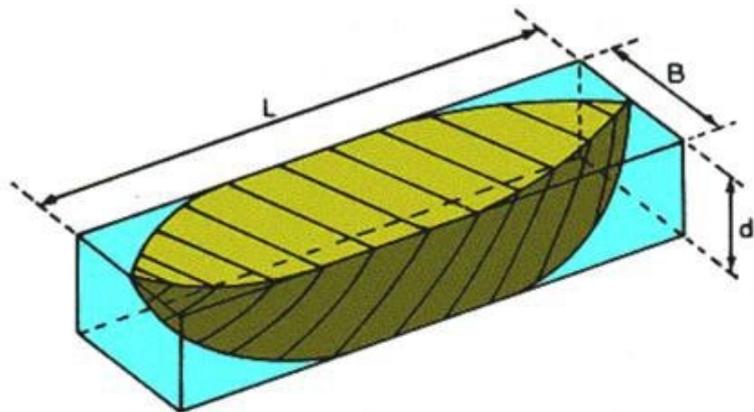


Figure 3.2: Schéma du volume immergé et du bloc circonscrit

$$\text{Volume du bloc circonscrit} = L \times B \times d \quad (3.3)$$

Le volume de déplacement, qui représente le volume immergé du navire, est une fraction du volume du bloc circonscrit. Cette fraction est représentée par le coefficient de bloc :

$$\text{Volume de déplacement} = (L \times B \times d \times C_B) \times \rho \quad (3.4)$$

A partir des équations (3.3) et (3.4) :

$$C_B = \frac{\text{Volume du bloc circonscrit}}{\text{Volume de déplacement}} \quad (3.5)$$

On peut aussi exprimer le coefficient de bloc en fonction de la densité de l'eau (ρ), du poids du navire (W) et de la surface de flottaison (S), qui est la surface du plan d'eau coupant le navire :

$$C_B = \frac{W}{\rho \times L \times B \times d} = \frac{W}{\rho \times S \times d} \quad (3.6)$$

Ces expressions permettent de calculer le coefficient de bloc à partir des caractéristiques du navire et de l'eau.

Notez que le volume de déplacement est systématiquement inférieur au volume du bloc circonscrit. Par conséquent, le coefficient de bloc est toujours inférieur à 1 ($C_B < 1$).

Le coefficient de bloc dépend essentiellement de la forme de la carène du navire, c'est-à-dire de la partie immergée de sa coque. Plus la carène est fine et élancée, plus le coefficient de bloc est faible. Au contraire, plus la carène est large et trapue, plus le coefficient de bloc est élevé.

Le coefficient de bloc influence directement la résistance à l'avancement du navire dans l'eau. En effet, plus le coefficient de bloc est faible, moins le navire crée de vagues et de turbulences en se déplaçant, et donc moins il consomme d'énergie pour avancer. En revanche, plus le coefficient de bloc est élevé, plus le navire a besoin de puissance pour vaincre la résistance hydrodynamique.

Le choix du coefficient de bloc optimal dépend donc du compromis recherché entre la vitesse et la capacité de transport du navire. Par exemple, un navire rapide comme un yacht aura un coefficient de bloc faible pour minimiser la résistance à l'avancement, tandis qu'un navire lent comme un pétrolier aura un coefficient de bloc élevé pour maximiser le volume de chargement.

3.3. Coefficient de remplissage au maître-couple C_M

Le coefficient de remplissage au maître-couple C_M est un coefficient de forme qui caractérise le remplissage de la section transversale maximale du navire par rapport au rectangle circonscrit. Il se définit comme le rapport entre la surface transversale immergée de la section au maître-couple A_M et la surface d'un rectangle ayant pour côtés la largeur B et le tirant d'eau d du navire .

Le coefficient de remplissage au maître-couple (C_M) donne un aperçu précis de la forme de la carène d'un navire en mettant en relation l'aire immergée à la section transversale maximale (ou maître-couple) avec celle d'un rectangle qui l'encadre. Ce rapport est exprimé en termes de pourcentage.

La Figure 3.3 illustre la représentation graphique de ce coefficient pour un navire non-prismatique. L'aire transversale immergée de la section au maître-couple (A_M), illustrée en bleu, et l'aire du rectangle formé par la largeur

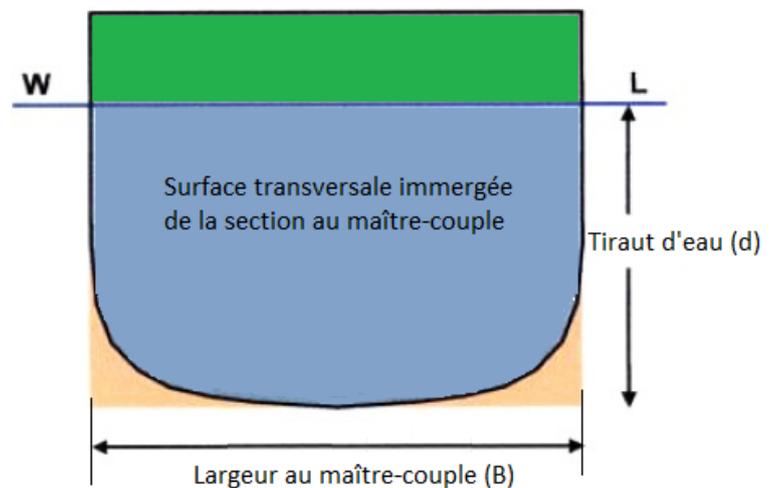


Figure.3.3. Surfaces Immergée et du Rectangle Circonscrit au Maître-Couple

(B) et le tirant d'eau (d) du navire, affichée en jaune, sont les deux éléments principaux de cette illustration.

Le coefficient de remplissage au maître-couple est déterminé à partir de la formule suivante :

$$C_M = \frac{A_M}{B \times D} \quad (3.7)$$

où :

A_M : surface transversale immergée de la section au maître-couple

B : largeur du navire

d : tirant d'eau du navire

Ce coefficient est inférieur à 1 et il varie selon la forme de la carène et le degré de vitesse du navire. Plus le coefficient est élevé, plus la carène est pleine et plus le navire est adapté à une vitesse faible ou moyenne. Plus le coefficient est faible, plus la carène est fine et plus le navire est adapté à une vitesse élevée.

Il est important de noter que ce coefficient est toujours inférieur à 1. Sa valeur varie en fonction de la forme de la carène et de la vitesse attendue du navire. Un C_M élevé indique une carène plus remplie, adaptée aux vitesses faibles ou moyennes, tandis qu'un C_m faible est caractéristique d'une carène plus fine, plus adaptée aux vitesses élevées.

L'aire transversale immergée de la section au maître-couple (A_M) est obtenue en intégrant la courbe de la section transversale le long de l'axe longitudinal du navire. L'aire du rectangle circonscrit est calculée en multipliant la largeur et le tirant d'eau du navire.

Le coefficient de remplissage au maître-couple a un impact direct sur la résistance hydrodynamique du navire. Un navire avec un C_M élevé aura une plus grande surface frontale, entraînant une traînée de pression plus importante. Cependant, la surface mouillée sera plus petite, ce qui diminue la traînée de frottement. Il est donc crucial de trouver un équilibre optimal entre ces deux aspects pour optimiser la résistance hydrodynamique en fonction de la vitesse du navire

3.4. Coefficient prismatique C_p

Le coefficient prismatique, noté C_p , est un autre indicateur essentiel utilisé pour caractériser la forme d'un navire. Ce coefficient compare le volume immergé du navire (c'est-à-dire le volume de déplacement) à celui d'un prisme dont la base est la section transversale au maître-couple (la plus grande section transversale) et dont la hauteur équivaut à la longueur du navire. En termes plus simples, C_p représente le rapport entre le volume réel du navire et le volume du prisme le plus large possible ayant la même longueur et la même section transversale au maître-couple.

Mathématiquement, le coefficient prismatique peut être exprimé par la formule suivante :

$$C_p = \frac{\text{Volume de déplacement du navire}}{\text{Aire de la section maître couple} \times \text{Longueur du navire}} \quad (3.8)$$

$$C_p = \frac{V}{A_m \times L} \quad (3.9)$$

où :

C_p : Coefficient prismatique

V : Volume de déplacement du navire

A_m : Aire de la section au maître-couple

L : Longueur du navire entre perpendiculaires

La figure 3.4 illustre ces concepts en représentant à la fois le volume de la carène et celui du prisme circonscrit.

Le coefficient prismatique donne une indication du remplissage de la forme du navire. Un C_p élevé indique que le navire est plein, c'est-à-dire qu'il se rapproche de la forme d'un prisme⁽¹⁾. Un C_p faible, au contraire, suggère un navire plus fin ou élancé. Ce coefficient influence directement la résistance à l'avancement du navire dans l'eau et, par conséquent, sa vitesse. Pour les navires destinés à des vitesses élevées, un C_p plus bas est généralement préféré car il diminue la résistance de l'eau. Cependant, un C_p plus bas peut aussi rendre le navire moins stable. Il faut donc trouver un équilibre entre stabilité et vitesse lors de la conception du navire."

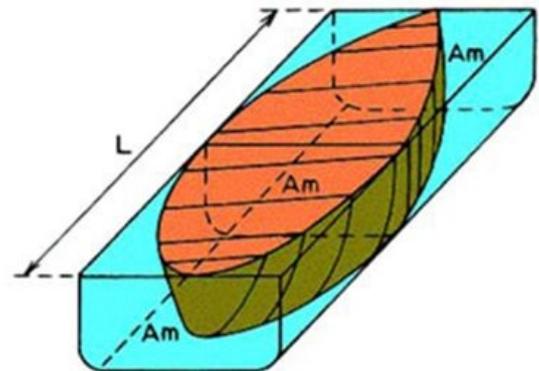


Figure 3.4. Illustration du volume de la carène et du prisme circonscrit immergés.

Par conséquent, pour un déplacement donné, un navire avec un C_m élevé aura un C_p plus élevé, et donc un volume plus faible par rapport à un navire avec un C_m faible. Un volume plus faible suggère une surface mouillée réduite, entraînant une traînée de frottement moindre. Cependant, un C_m élevé suggère aussi une surface frontale plus large, entraînant une traînée de pression plus élevée. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux effets pour optimiser la résistance hydrodynamique en fonction de la vitesse du navire

3.5. Relations entre les coefficients de forme et de remplissage

Les coefficients de forme et de remplissage sont des paramètres géométriques qui caractérisent la forme d'un navire et son aptitude à utiliser efficacement l'espace disponible. Il existe quatre coefficients principaux : le coefficient de bloc (C_B), le coefficient de remplissage de la flottaison (C_W), le coefficient de remplissage du maître-couple (C_M) et le coefficient prismatique (C_P). Ces coefficients ne sont pas indépendants les uns des autres, mais sont reliés par des relations mathématiques qui découlent directement de leur définition et de leur méthode de calcul.

La première relation importante est celle qui lie le coefficient de bloc au produit du coefficient de remplissage de la flottaison et du coefficient de remplissage du maître-couple :

$$C_B = C_W \times C_M \quad (3.10)$$

Cette relation montre que le coefficient de bloc, qui représente le rapport entre le volume immergé du navire et le volume du parallélépipède rectangle qui l'englobe, est directement influencé par la forme du plan de flottaison et par la forme du maître-couple.

¹ Dans le contexte de l'architecture navale et du coefficient prismatique, le prisme se réfère à un volume théorique circonscrit dont la base correspond à la plus grande section transversale du navire (la section maître-couple) et dont la hauteur est égale à la longueur du navire. Ce prisme sert de référence pour comparer le volume réel du navire, aidant ainsi à évaluer la plénitude de la forme du navire. Ce volume est illustré en bleu dans la Figure 3.4. Il convient de noter que ce prisme, malgré sa base correspondant à la section maître-couple, ne représente pas nécessairement la forme exacte du navire tout au long de sa longueur. C'est plutôt un outil de comparaison abstrait pour analyser la forme générale du navire.

La deuxième relation importante est celle qui lie le coefficient prismatique au quotient du coefficient de bloc et du coefficient de remplissage de la flottaison :

$$C_P = \frac{C_B}{C_W} \quad (3.11)$$

Cette relation montre que le coefficient prismatique, qui représente le rapport entre le volume immergé du navire et le volume du prisme droit qui a la même longueur, la même section maximale et le même plan de flottaison que le navire, est lié à la fois au coefficient de bloc et au coefficient de remplissage de la flottaison.

Une autre relation utile est celle qui lie le coefficient de bloc au produit du coefficient prismatique et du coefficient de remplissage du maître-couple :

$$C_B = C_P \times C_M \quad (3.12)$$

Cette relation montre que le coefficient de bloc est le produit du coefficient prismatique et du coefficient de remplissage du maître-couple. C'est une formule utile pour vérifier la cohérence des calculs des coefficients de forme.

Enfin, une relation qui démontre les limites du coefficient prismatique est la suivante :

$$\frac{C_B}{C_M} \leq C_P \leq 1 \quad (3.13)$$

Cette relation démontre que le coefficient prismatique doit toujours être supérieur ou égal au coefficient de bloc divisé par le coefficient de remplissage du maître-couple et inférieur ou égal à 1. Cela s'explique par le fait que le volume du navire (que le C_B représente) ne peut jamais être plus grand que le volume du prisme de référence (que le C_P représente), et que la section transversale la plus large du navire (que le C_M représente) est toujours plus petite que la section transversale du prisme de référence.

Ces relations mettent en évidence l'interdépendance des différents coefficients de forme et de remplissage. Ils doivent être considérés ensemble dans l'analyse de la stabilité transversale d'un navire, car toute modification de l'un d'eux peut avoir des répercussions sur les autres et, par conséquent, sur la performance globale du navire.

Conclusion

Ce chapitre a exploré les quatre principaux coefficients de forme et de remplissage qui jouent un rôle crucial dans l'étude de la stabilité transversale des navires à l'état intact. Il s'agit du coefficient de remplissage de la flottaison (C_W), du coefficient de bloc (C_B), du coefficient de remplissage du maître-couple (C_M), et du coefficient prismatique (C_P).

Ces coefficients ont été choisis pour leur pertinence et leur capacité à donner une image précise et complète de la forme d'un navire. Ensemble, ils permettent de caractériser la forme globale du navire et de décrire la répartition du volume immergé. Chacun a une incidence sur des aspects clés du comportement du navire, comme la résistance à l'avancement, la vitesse et la stabilité.

Par ailleurs, ces coefficients ne sont pas indépendants les uns des autres. Ils sont reliés par des relations mathématiques précises. Par exemple, nous avons montré que le coefficient de bloc peut être exprimé comme le produit du coefficient de remplissage de la flottaison et du coefficient de remplissage du

maître-couple. De même, le coefficient prismatique peut être obtenu en divisant le coefficient de bloc par le coefficient de remplissage de la flottaison.

L'étude de ces coefficients et de leurs relations nous aide à comprendre comment les variations de la forme d'un navire peuvent affecter sa performance et sa stabilité. Cela fournit une base précieuse pour la conception et l'analyse des navires, contribuant à l'amélioration de leur sécurité et de leur efficacité.

Chapitre 4

TPC

Introduction

L'acronyme TPC provient de l'anglais "Tonnes per Centimetre Immersion", qui se traduit en français par "Tonne par Centimètre de variation de Tirant d'Eau", fait référence à la masse qui doit être ajoutée ou retirée pour provoquer une modification d'un centimètre du tirant d'eau moyen réel du navire. C'est donc une mesure essentielle pour contrôler et ajuster la flottabilité et la stabilité d'un navire. Cette caractéristique, cruciale dans l'étude de la stabilité transversale à l'état intact des navires, permet de quantifier la variation du tirant d'eau suite à un changement de poids à bord du navire.

La pertinence du TPC se retrouve dans sa capacité à évaluer les effets d'ajout ou de retrait de poids sur le tirant d'eau du navire, permettant ainsi de prendre des décisions éclairées lors du chargement ou du déchargement du navire. C'est un facteur déterminant de la stabilité et de la sécurité du navire.

Pour illustrer la définition du TPC, considérons le scénario suivant : un poids " w " de 20 tonnes est ajouté sur le pont d'un navire flottant sur l'eau. Cela provoque une augmentation du tirant d'eau moyen du navire de 1 cm. Nous supposons alors que la surface de flottaison A_{WL} à ce tirant d'eau ($d + 1$ cm) est identique à celle d'un tirant d'eau d (voir Figure 4.1). Par le principe de flottabilité, on sait que la masse d'eau déplacée par cette augmentation de tirant d'eau de 1 cm est équivalente au poids ajouté soit 20 tonnes. On en déduit donc que le TPC du navire à ce tirant d'eau est de 20.

Il est essentiel de noter que la valeur " w " ne peut être déterminée que si A_{WL}^1 est connue, soulignant ainsi l'importance des données précises sur les caractéristiques hydrostatiques du navire.

Par conséquent, la connaissance et l'utilisation correcte du TPC sont des éléments essentiels à la sécurité, à la stabilité et à l'efficacité opérationnelle d'un navire.

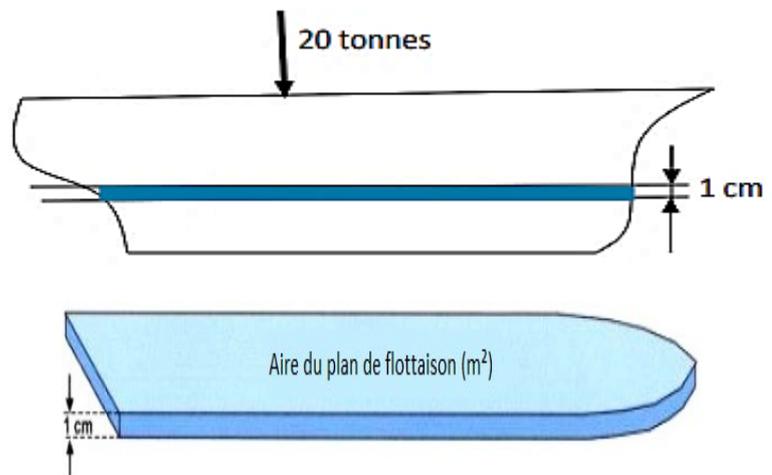


Figure 4.1. Illustration du concept du TPC avec un exemple

4.1 Formulation du TPC

Le TPC est le poids supplémentaire qu'il faut ajouter au navire pour augmenter son tirant d'eau de 1 cm. On peut le calculer à partir de la formule (2.3) :

¹ A_{WL} est l'acronyme de "Above Water Line", qui signifie "au-dessus de la ligne de flottaison". La surface de flottaison A_{WL} est la surface du plan d'eau coupant le navire. Elle dépend du tirant d'eau et de la forme de la carène du navire

Masse = volume x densité

En supposant que la forme du navire ne change pas beaucoup entre les deux flottaisons, on peut dire que le TPC est égal à la masse du volume d'eau déplacé par la surface de flottaison (A_{WL}) pour 1 cm de tirant d'eau supplémentaire.

W = poids de la tranche immergée = volume de la tranche immergée x densité de l'eau

Le volume de la tranche immergée est égal à la surface de flottaison (A_{WL}) multipliée par l'épaisseur de la tranche (1 cm). Pour avoir des unités cohérentes, on convertit le cm en m en le divisant par 100. On obtient donc :

$$W = A_{WL} (m^2) \times 0.01 (m) \times \rho_{\text{eau}} (t/m^3)$$

On peut simplifier cette expression en remarquant que les m^2 et les m^3 se compensent. On obtient :

$$W = 0.01 \times A_{WL} \times \rho_{\text{eau}} (t),$$

$$W = \frac{\rho_{\text{eau}} A_{WL}}{100} = \text{TPC} \quad (4.1)$$

Cette expression donne le poids de la tranche immergée en tonnes, en fonction de la surface de flottaison en mètres carrés et de la densité de l'eau en tonnes par mètre cube. L'indice "eau" indique que la densité est celle de l'eau dans laquelle le navire flotte, qui peut varier selon la salinité et la température.

Les valeurs du TPC varient en fonction du tirant d'eau car les formes de la carène et donc des aires de flottaison changent selon l'enfoncement du navire. Ces valeurs sont généralement calculées par le constructeur du navire et sont indiquées sur un graphique : les tables hydrostatiques ou l'échelle de charge (Deadweight scale).

La valeur TPC est pratiquement toujours donnée en eau de mer (souvent $1.025 t/m^3$). Si le navire flotte dans une eau de densité différente, la valeur TPC sera corrigée de la manière suivante :

$$\text{TPC}_{\text{eau de quai}} = \text{TPC}_{\text{eau de mer}} \frac{\rho_{\text{quai}}}{\rho_{\text{mer}}} \quad (4.2)$$

4.2. Facteurs influençant le TPC

Le TPC (tonnes par centimètre) est la masse qui doit être chargée ou déchargée pour changer le tirant d'eau moyen du navire de 1 cm. Le TPC dépend de la surface du plan d'eau et de la densité de l'eau. Pour un navire de forme standard, la surface du plan d'eau augmente proportionnellement au tirant d'eau. Les données hydrostatiques du navire fournissent généralement deux valeurs de TPC : le TPC_{EM} (EM pour l'eau de mer) et le TPC_{ED} (ED pour l'eau douce)².

² Dans ce document, nous utilisons les indices EM pour l'eau de mer et ED pour l'eau douce. Par exemple, la densité ρ_{EM} est la densité de l'eau de mer, tandis que la densité ρ_{ED} est la densité de l'eau douce (EM signifie eau de mer et ED signifie eau douce.)

La densité de l'eau varie en fonction de la salinité, de la température et de la pression. L'eau de mer étant plus dense que l'eau douce, le TPC_{EM} est plus élevé que le TPC_{ED} . Le TPC peut être calculé à l'aide de la formule (4.1) :

$$TPC = \frac{\rho_{eau} A_{WL}}{100}$$

Où A_{WL} est la surface du plan d'eau en m^2 , ρ_{eau} est la densité de l'eau en t/m^3 et 100 est le facteur de conversion entre cm et m.

Exemple :

Si un navire a un A_{WL} de 2 000 m^2 et qu'il flotte dans une eau dont la densité est de 1,025 t/m^3 , son TPC_{EM} sera :

$$TPC_{EM} = \frac{1,025 \times 2000}{100} = 20,5 \text{ tonnes/cm}$$

Si le même navire flotte dans une eau dont la densité est de 1 t/m^3 , son TPC_{ED} sera :

$$TPC_{ED} = \frac{1,000 \times 2000}{100} = 20 \text{ tonnes/cm}$$

Cela signifie qu'il faut ajouter 20,5 tonnes au déplacement du navire pour augmenter son tirant d'eau d'un centimètre en eau de mer, et 20 tonnes en eau douce.

La forme du navire influence également le TPC. Un navire large et plat aura une plus grande surface de flottaison et donc un TPC plus élevé. À l'inverse, un navire étroit et profond aura une surface de flottaison plus petite et un TPC plus faible

La variation du TPC en fonction du tirant d'eau dépend de la forme du navire. Pour la plupart des navires, le TPC augmente avec le tirant d'eau, comme l'illustre la figure 4.2. Cela signifie qu'il faut ajouter plus de poids au navire pour faire varier son tirant d'eau de 1 cm quand il est plus immergé. Cela s'explique par le fait que la surface du navire en contact avec l'eau augmente également avec le tirant d'eau, ce qui implique que le volume d'eau déplacé par une variation de tirant d'eau de 1 cm est plus important. Ainsi, le TPC dépend de la surface du navire en contact avec l'eau.

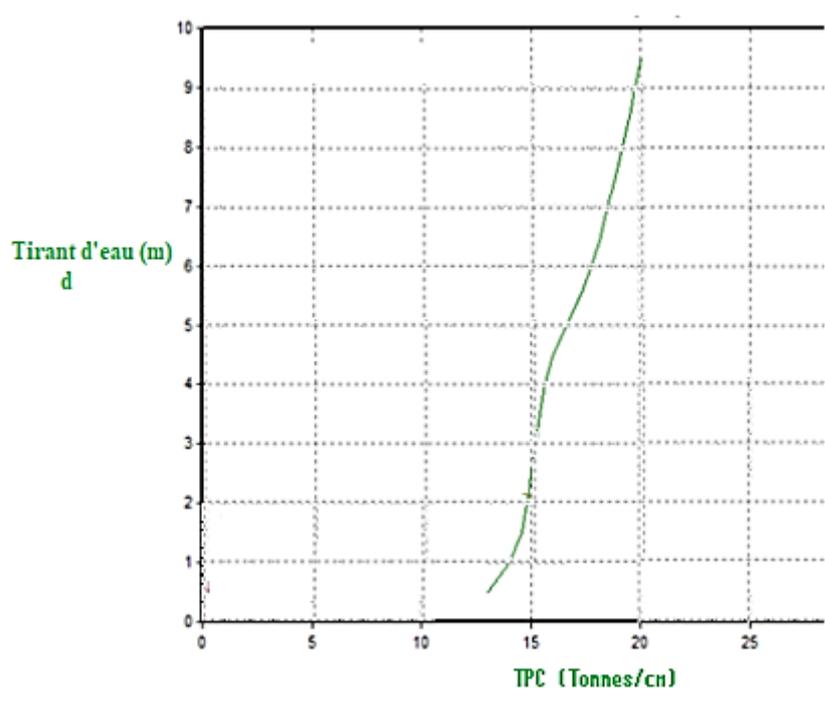


Figure 4.2 Variation du TPC en fonction du tirant d'eau.

4.3. Interpolation des données hydrostatiques

Dans la réalité, le tirant d'eau peut prendre des valeurs intermédiaires qui ne sont pas directement fournies dans la table ou la courbe hydrostatique. Pour estimer ces valeurs intermédiaires correspondantes, nous utilisons des méthodes d'interpolation.

Si les données hydrostatiques sont présentées sous forme de table, nous pouvons utiliser des méthodes d'interpolation, telles que l'interpolation linéaire, pour obtenir des estimations des valeurs intermédiaires. Par exemple, supposons que nous ayons les valeurs de TPC_{SW} (TPC en eau de mer) pour des tirants d'eau de 5,20 mètres ($TPC_{SW}(5,20)$) et 5,30 mètres ($TPC_{SW}(5,30)$). Nous pouvons utiliser l'interpolation linéaire suivante pour estimer le TPC_{SW} pour un tirant d'eau de 5,26 mètres.

Tirant d'eau (d)	DISPL _{EM}	TPC _{EM}
5.30	10737	22.10
5.26	?	?
5.20	10516	22.05

$$TPC_{SW}(5,26) = TPC_{SW}(5,20) + ((TPC_{SW}(5,30) - TPC_{SW}(5,20)) \times \frac{5,26 - 5,20}{5,30 - 5,20})$$

$$22.5 + ((22.10 - 22.05) \times \frac{0.06}{0.10})$$

5.26-5.20
5.30-5.20

$TPC_{SW}(5,26) = \mathbf{22,08}$

Dans cet exemple, le TPC_{SW} estimé pour un tirant d'eau de 5,26 mètres serait de 22,08 tonnes/cm. Nous utilisons la différence entre les valeurs adjacentes et la distance relative entre elles pour obtenir une approximation pour la valeur intermédiaire.

Cependant, si les données hydrostatiques sont fournies sous forme de courbe, l'interpolation n'est pas nécessaire. Nous pouvons directement lire les valeurs correspondantes sur la courbe pour obtenir des estimations pour les tirants d'eau intermédiaires.

Il est important de noter que l'interpolation est utilisée lorsque nous avons besoin d'estimer des valeurs pour des tirants d'eau spécifiques qui ne sont pas répertoriés dans les données fournies. Cela nous permet

d'obtenir une meilleure approximation des valeurs réelles du TPC pour les tirants d'eau intermédiaires. L'interpolation est une méthode pratique pour obtenir des informations précises sur la stabilité des navires dans des conditions de tirant d'eau variées.

4.4. Conséquences du chargement et du déchargement

Le chargement ou le déchargement de poids modifie le tirant d'eau du navire, c'est-à-dire la profondeur à laquelle il s'enfonce dans l'eau. Cette modification est appelée "enfoncement" si le tirant d'eau augmente ou "élévation" s'il diminue. On peut la calculer avec la formule suivante :

$$\frac{\text{Enfoncement}}{\text{Élévation}} = \frac{W}{\text{TPC}} \quad (4.3)$$

où

W représente le poids total chargé ou déchargé. Cette formule permet aussi de déterminer le poids à charger ou à décharger pour obtenir le tirant d'eau désiré :

$$W = \text{Enfoncement ou Élévation} \times \text{TPC}$$

Le TPC est le tonnage par centimètre d'immersion, c'est-à-dire le poids nécessaire pour faire varier le tirant d'eau d'un centimètre. Il dépend de la densité de l'eau dans laquelle le navire se trouve. Si le navire change de type d'eau, par exemple de l'eau de mer à l'eau douce ou inversement, il faut corriger la valeur du TPC par l'expression (4.2), en utilisant les rapports suivants :

$$\text{TPC}_{\text{ED}} = \text{TPC}_{\text{EM}} \times \frac{\text{Densité}_{\text{ED}}}{\text{Densité}_{\text{EM}}} \quad (4.4)$$

De même, si le navire passe d'une eau à une autre dont la densité est différente, on utilise la formule suivante :

$$\text{TPC}_{\text{Nouvelle Eau}} = \text{TPC}_{\text{Eau Initial}} \times \frac{\text{Densité}_{\text{Nouvelle Eau}}}{\text{Densité}_{\text{Eau Initial}}} \quad (4.5)$$

Il est donc essentiel de connaître le TPC et ses facteurs d'influence pour optimiser la stabilité et l'efficacité opérationnelle des navires.

Ainsi, il est essentiel de comprendre le TPC et comment il est influencé par différents facteurs afin d'optimiser la stabilité et l'efficacité opérationnelle des navires.

Conclusion

Le TPC est un facteur crucial dans l'étude de la stabilité transversale à l'état intact des navires. Il permet de quantifier la variation du tirant d'eau suite à un changement de poids à bord du navire et d'évaluer les effets d'ajout ou de retrait de poids sur le tirant d'eau du navire. La connaissance et l'utilisation correcte du TPC sont des éléments essentiels à la sécurité, à la stabilité et à l'efficacité opérationnelle d'un navire. Il est donc important de disposer de données précises sur les caractéristiques hydrostatiques du navire pour déterminer le poids de la cargaison (la valeur w) nécessaire pour augmenter le tirant d'eau du navire.

Chapitre 5

Les lignes de charge (Load lines)

Introduction

Ce chapitre traite les lignes de charge et plus particulièrement la marque de franc-bord. Le franc-bord est la distance verticale entre la ligne de pont et la ligne de flottaison du navire. Il assure la sécurité du navire en évitant qu'il ne soit submergé par les vagues ou qu'il ne perde sa stabilité. Le franc-bord dépend du poids embarqué, qui influe directement sur le tirant d'eau du navire, c'est-à-dire la profondeur à laquelle il s'enfonce dans l'eau. Pour limiter le poids embarqué et garantir un franc-bord minimum, l'Organisation maritime internationale (OMI) a adopté la Convention internationale sur les lignes de charge, dite en anglais LL66, qui est représentée par les marques de franc-bord.

5.1 Marque de franc-bord

Le franc-bord est la distance verticale entre la ligne de pont et la ligne de flottaison du navire. Il assure la sécurité du navire en évitant qu'il ne soit submergé par les vagues ou qu'il ne perde sa stabilité. Le franc-bord dépend du poids embarqué, qui influe directement sur le tirant d'eau du navire, c'est-à-dire la profondeur à laquelle il s'enfonce dans l'eau. Pour limiter le poids embarqué et garantir un franc-bord minimum, l'Organisation maritime internationale (OMI) a adopté la Convention internationale sur les lignes de charge, dite en anglais LL66, qui est représentée par les marques de franc-bord (voir la figure 5.1). Ce franc-bord minimum est souvent calculé par les bureaux de classification en fonction des critères de stabilité transversale à l'état intact.

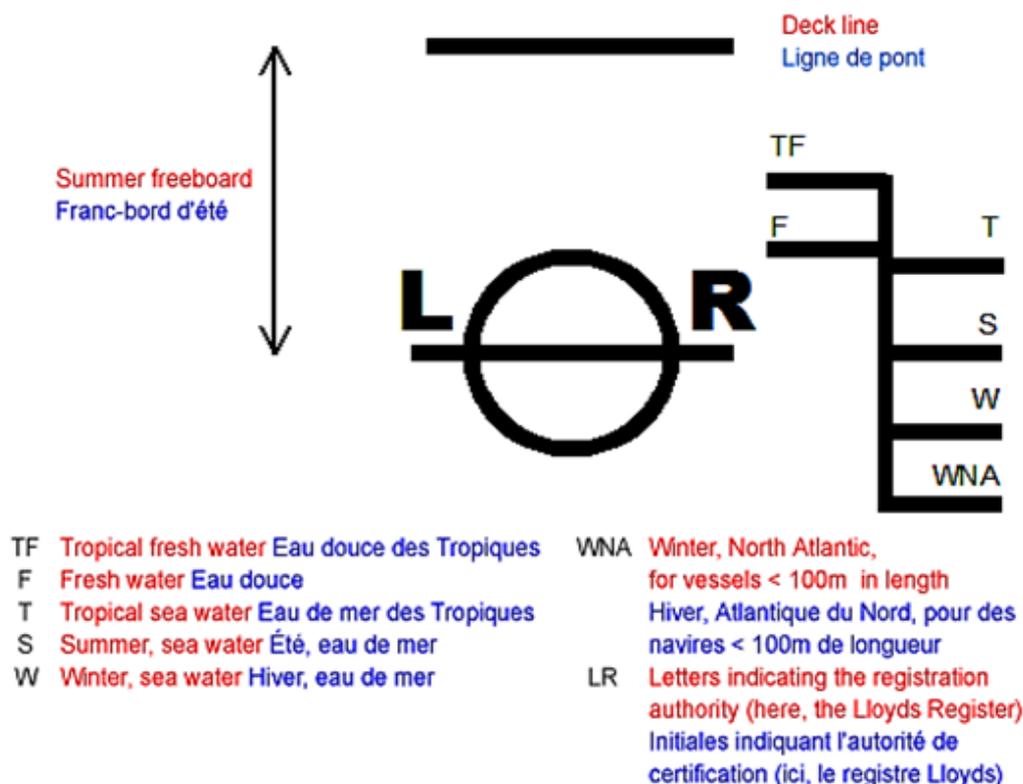


Figure 5.1. Marque de franc-bord selon la convention LL66

Les marques de franc-bord incluent les lignes de charge indiquant, sur les côtés, le tirant d'eau maximum auquel le navire peut être chargé dans différentes consistances d'eau au cours des diverses saisons de l'année. Le navire ne peut embarquer marchandises, combustible et approvisionnements au-delà d'un certain degré d'enfoncement dans la mer. C'est là une question primordiale de sécurité qui justifie l'intervention de l'Administration de l'Etat du pavillon¹ ou par délégation d'un bureau de société de classification tel que Bureau Veritas, qui a donc fait buriner, puis peindre sur les flancs du navire, un disque et diverses lignes que, selon les circonstances, le commandant doit garder émergées. Il faut aussi mentionner la ligne de pont peinte à hauteur du pont principal. Ce sont là les marques du franc-bord. La marque du franc-bord se compose d'une ligne horizontale qui correspond à la ligne de pont, d'un cercle qui indique le centre du symbole et de plusieurs lignes horizontales qui représentent les lignes de charge pour différentes conditions de navigation. La figure 5.1 montre un exemple schématique de marque du franc-bord et ses éléments.

Selon la convention LL66 sur le franc-bord des navires, les termes utilisés pour la marque du franc-bord sont définis ci-dessous. Les distances spécifiques entre ces marques sont illustrées dans la Figure 5.3 :

- La "ligne de pont" désigne une ligne horizontale tracée là où le pont supérieur rencontre le côté extérieur du navire.
- Le "cercle" fait référence à un cercle de 300 mm de diamètre dont le centre est aligné avec la ligne médiane du navire.
- La ligne "S" (Summer) est alignée sur la ligne horizontale passant par le centre du cercle. Elle représente la charge maximale en eau salée d'été
- La ligne "T" (Tropical) est déterminée à une distance spécifique en dessous de la ligne "S", illustrant la charge maximale en eau salée tropicale.
- La ligne "F" (Fresh Water) se situe à une distance précise au-dessus de la ligne "S", indiquant la charge maximale en eau douce.
- La ligne "TF" (Tropical Fresh Water) est placée à une distance plus grande au-dessus de la ligne "S", signifiant la charge maximale en eau douce tropicale.
- La ligne "W" (Winter) est située à une distance définie en dessous de la ligne "T" et représente la charge maximale en eau salée d'hiver.
- La ligne "WNA" (Winter North Atlantic) est positionnée à une distance spécifique en dessous de la ligne "W", indiquant la charge maximale en eau salée d'hiver pour l'Atlantique Nord.
- Les "initiales" se réfèrent aux initiales d'une société de classification reconnue qui a validé le calcul du franc-bord. Elles sont placées sur la ligne médiane, à gauche ou à droite du cercle, selon que le navire a été construit dans l'hémisphère nord ou sud².

La marque du franc-bord permet donc au capitaine du navire de connaître le poids maximum qu'il peut charger selon le type et la température de l'eau, ainsi que la zone et la saison du voyage. Il doit respecter ces limites pour assurer la stabilité transversale du navire et sa sécurité face aux risques d'envahissement ou de chavirement.

¹ L'Etat du pavillon est l'Etat sous lequel un navire est immatriculé et qui lui confère sa nationalité. C'est l'Etat qui est responsable de l'application des règles et des normes internationales en matière de sécurité maritime.

² Cette règle de placement des initiales de la société de classification a pour objectif de signaler rapidement et facilement l'hémisphère dans lequel le navire a été construit. Cette information peut être pertinente pour diverses raisons, y compris des considérations réglementaires ou de navigation

La figure 5.2 montre deux exemples photographiques sur la marque du franc-bord, lignes de charge et ligne de pont apposées sur la coque d'un navire.

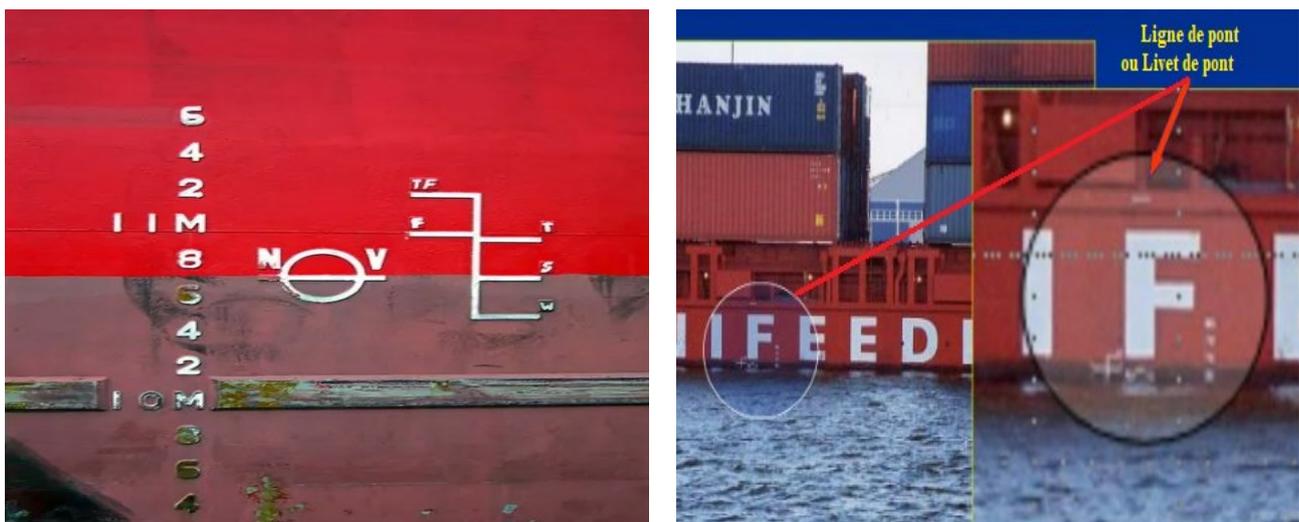


Figure 5.2. Marque du franc-bord apposée sur la coque d'un navire

Sur la première photographie, on peut voir que le sommet de la ligne horizontale du cercle est aligné avec la ligne S, qui correspond à la ligne de charge maximale en eau salée d'été. Les initiales NV indiquent que le navire est classé par « Det Norske Veritas ».

Sur la figure 5.2, la deuxième photographie montre la ligne de pont tracée sur le côté du navire à l'intersection du pont supérieur et du bordé extérieur. Le livet du pont ou la ligne de pont est la ligne d'intersection entre le pont principal d'un navire et la coque. Il sert à mesurer le creux du navire, c'est-à-dire la hauteur entre le livet et la quille. Le livet du pont fait partie de la marque du franc-bord, qui indique les limites autorisées pour l'immersion du navire selon les zones, les régions et les périodes saisonnières.

5.2. Dimensions des lignes de charge

Les dimensions des lignes de charge sont déterminées par des calculs précis tenant compte du compartimentage et de la stabilité transversale du navire à l'état intact. Ces calculs sont basés sur les règles établies par la convention internationale sur les lignes de charge de 1966 (LL66), qui tient compte des risques auxquels les navires pourraient être exposés dans différentes zones et à différentes saisons. La figure 5.3 présente les dimensions réglementaires des lignes de charge pour les navires de haute mer selon la LL66.

On y distingue deux types de symboles : la marque du franc-bord et les lignes de charge.

- La marque du franc-bord (load line mark) est représentée par un cercle traversé par une ligne horizontale correspondant à la ligne de charge d'été (S). Le cercle a un diamètre (diameter) de 300 mm et une épaisseur (thickness) de 25 mm. Les initiales d'une société de classification (classification society) sont apposées de part et d'autre du cercle.
- La ligne de pont (deck line) est une ligne horizontale traversant le haut du cercle. Elle indique le niveau du pont principal (main deck), qui est le pont le plus haut complètement fermé sur toute sa longueur. Le franc-bord d'été assigné (assigned summer freeboard) est la distance verticale entre la ligne de charge d'été (S) et la ligne de pont (deck line). Il représente le minimum de hauteur libre

entre la surface de l'eau et le pont principal lorsque le navire est chargé au maximum en eau salée en saison estivale (d'été)³.

- Les lignes de charge (load lines) sont des symboles peints ou soudés sur les flancs du navire qui indiquent la hauteur maximale de la ligne de flottaison selon la nature de l'eau et la zone saisonnière. Elles ont une longueur (length) de 230 mm et une épaisseur (thickness) de 25 mm.

La figure 5.3 présente également les symboles des différentes lignes de charge selon la nature de l'eau et la zone saisonnière :

- TF : eau douce tropicale (tropical fresh water)
- F : eau douce (fresh water)
- T : eau salée tropicale (tropical sea water)
- S : eau salée en saison estivale (summer sea water)
- W : eau salée en saison hivernale (winter sea water)
- WNA : eau salée en saison hivernale sur l'Atlantique nord (winter North Atlantic sea water)

Ces symboles indiquent le tirant d'eau maximal autorisé pour le navire selon les conditions environnementales spécifiques à chaque zone et saison.

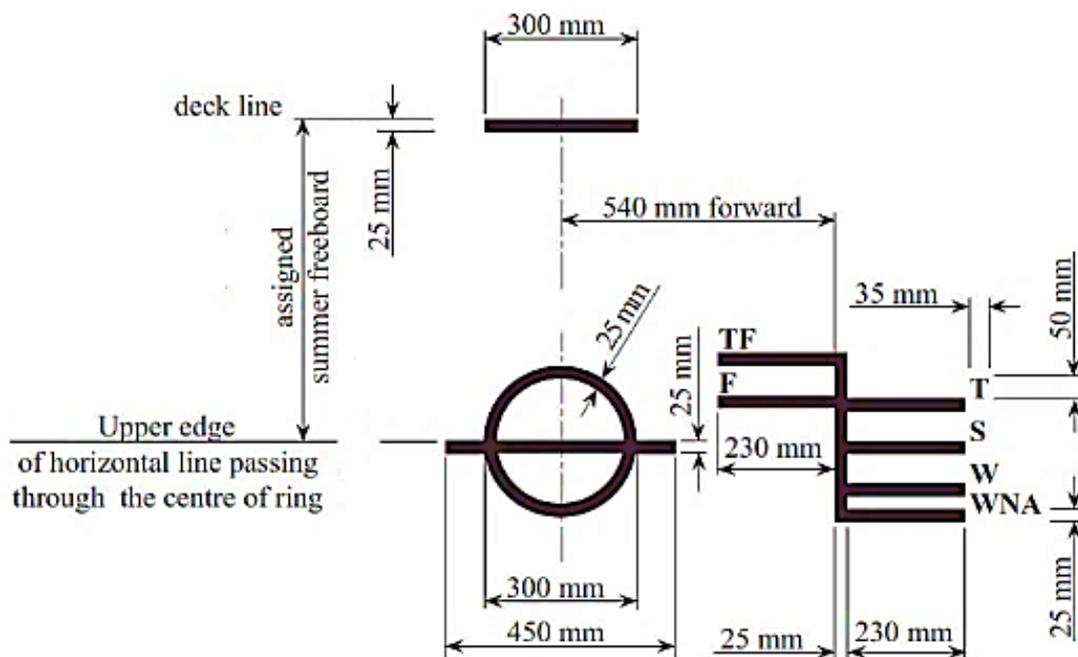


Figure 5.3. Marquage des lignes de charge pour les navires de haute mer

Par exemple :

- Le symbole TF signifie que le navire peut charger davantage lorsqu'il navigue en eau douce tropicale, car il flotte plus haut que dans l'eau salée.
- Le symbole WNA signifie que le navire doit charger moins lorsqu'il navigue en eau salée en saison hivernale sur l'Atlantique nord, car il flotte plus bas que dans l'eau salée en saison estivale et qu'il doit affronter des vagues plus fortes.

Lorsque le navire est conçu pour transporter du bois, des lignes de charge différentes sont peintes et les symboles sont précédés de la lettre L (de l'anglais lumber). Les symboles d'eau douce et d'eau salée

sont séparés par une ligne verticale. Ces lignes de charge tiennent compte du fait que le chargement en pontée offre une protection contre l'impact des vagues.

Ces dimensions indiquent la position relative des lignes de charge par rapport à la ligne horizontale qui traverse le centre du cercle. Elles permettent au navire d'adapter son tirant d'eau selon les variations saisonnières et géographiques."

5.3. Tolérance du franc bord en eau douce (FRESH WATER ALLOWANCE, FWA)

La tolérance du franc bord en eau douce (FWA) est une mesure importante pour évaluer la variation du tirant d'eau d'un navire lorsque celui-ci passe de l'eau salée à l'eau douce, ou vice-versa. Elle est exprimée en millimètres et correspond à la distance entre la bordure supérieure de la ligne de charge (S) et la bordure supérieure de la ligne de charge (F). Cela permet de quantifier le changement moyen du tirant d'eau dans ces conditions. La figure 5.4 illustre visuellement la tolérance du franc bord en eau douce (FWA).

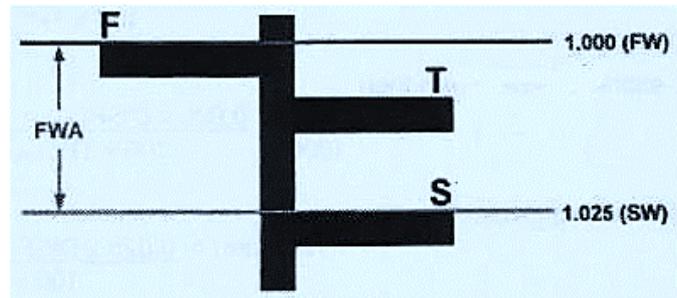


Figure 5.4. Tolérance du franc bord en eau douce (FWA)

Pour mieux comprendre la relation entre le déplacement du navire et la tolérance du franc bord en eau douce, référons-nous à la figure 5.5. Cette figure représente un navire chargé jusqu'à la ligne de charge estivale (S) qui flotte à la fois dans l'eau salée (1) et dans l'eau douce (2). Le tirant d'eau (d) reste **constant**, et le déplacement du navire **évolue** en fonction de la densité de l'eau salée ρ_{SW} et de l'eau douce ρ_{FW} , avec $\rho_{SW} > \rho_{FW}$.

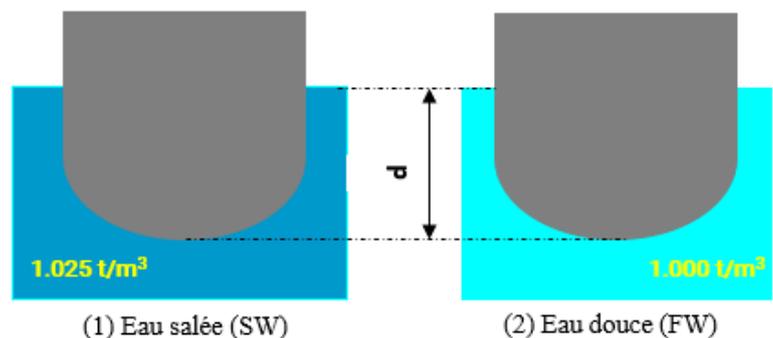


Figure 5.5. Effet de la densité sur le tirant d'eau

La formule mathématique pour calculer le FWA est obtenue en considérant les déplacements et les volumes de déplacement du navire dans les deux types d'eau.

Lorsqu'un navire flotte avec un tirant d'eau (d) en eau douce, pour trouver le déplacement équivalent en eau salée avec le même tirant d'eau (d), nous utilisons la formule du déplacement :

$$DISPL_{SW} = DISPL_{FW} \times 1.025 \quad (5.1)$$

Cette formule indique que le déplacement en eau salée ($DISPL_{SW}$) est égal au déplacement en eau douce ($DISPL_{FW}$) multiplié par 1.025. Il est important de noter que même si les déplacements diffèrent entre les deux types d'eau, les volumes de déplacement restent les mêmes.

Pour le navire présenté sur la figure 5.5, nous avons l'équation suivante :

$$DISPL_{FW} \times 1.025 = DISPL_{FW} + (WPA \times FWA \times 1.000t/m^3) \quad (5.2)$$

Dans cette équation (5.2), WPA est la superficie du plan d'eau à la ligne de flottaison de charge d'été en mètres carrés. Il est obtenu à partir de la formule du TPC (Tons per Centimeter), où TPC_{SW} correspond au poids requis pour enfoncer le navire d'un centimètre au déplacement d'été en eau salée :

$$TPC_{SW} = \frac{WPA \times 1.025}{100} \quad (5.3)$$

En réarrangeant cette formule, nous pouvons déterminer WPA :

$$WPA = \frac{TPC_{SW} \times 100}{1.025}$$

En substituant cette valeur de WPA dans l'équation précédente, nous obtenons :

$$0.025 \times DISPL_{FW} = \frac{100 \times TPC_{SW} \times FWA}{1.025}$$

Ce qui nous permet de calculer FWA en mètres :

$$FWA(m) = \frac{0.025 \times DISPL_{FW} \times 1.025}{100 \times TPC_{SW}} \quad (5.4)$$

Si nous souhaitons exprimer FWA en millimètres, nous appliquons le facteur de conversion (1000) :

$$FWA(mm) = \frac{0.025 \times DISPL_{SW} \times 1000}{100 \times TPC_{SW}}$$

En fin de compte, nous obtenons :

$$FWA(mm) = \frac{0.25 \times DISPL_{SW}}{TPC_{SW}}$$

Ainsi, la formule finale pour calculer la tolérance du franc bord en eau douce (FWA) en millimètres est donné par :

$$FWA(mm) = \frac{0.25 \times DISPL_{SW}}{TPC_{SW}} \quad (5.5)$$

Il est important de prendre en compte la tolérance du franc bord en eau douce lors des opérations de chargement et de navigation pour assurer la sécurité et la stabilité du navire dans différentes conditions d'eau. En comprenant la variation du tirant d'eau entre l'eau salée et l'eau douce, il est possible de

planifier et de réaliser les ajustements nécessaires pour maintenir les performances du navire dans des conditions optimales.

En résumé, la tolérance du franc bord en eau douce (FWA) est une mesure cruciale pour évaluer la variation du tirant d'eau lors du passage d'un navire de l'eau salée à l'eau douce, ou vice-versa. Cette variation est calculée en utilisant la formule $DISPL_{SW} = DISPL_{FW} \times 1.025$, qui prend en compte les déplacements et les volumes de déplacement dans les deux types d'eau.

$$FWA(mm) = \frac{0.25 \times DISPL_{SW}}{TPC_{SW}}$$

De plus, la formule permet de quantifier cette tolérance en millimètres. Il est essentiel de prendre en compte la tolérance du franc bord en eau douce lors des opérations de chargement et de navigation pour assurer la sécurité et la stabilité du navire dans différentes conditions d'eau. Cependant, dans certaines situations, on peut simplifier la formule à :

$$FWA(mm) = \frac{DISPL_{Summer}}{4 \times TPC_{SW}} \tag{5.6}$$

Lorsque le déplacement d'été en eau salée est utilisé ($DISPL_{SW} = DISPL_{Summer}$).

5.4. Tolérance du franc bord en eau de quai (Dock Water Allowance, DWA)

La tolérance du franc bord en eau de quai (DWA) correspond à la distance mesurée en millimètres qui représente la variation moyenne du tirant d'eau lorsque le navire passe de l'eau salée à l'eau de quai, ou vice-versa, lorsqu'il est chargé à un déplacement d'été. Figure 5.6. Tolérance du franc bord en eau de quai (DWA)

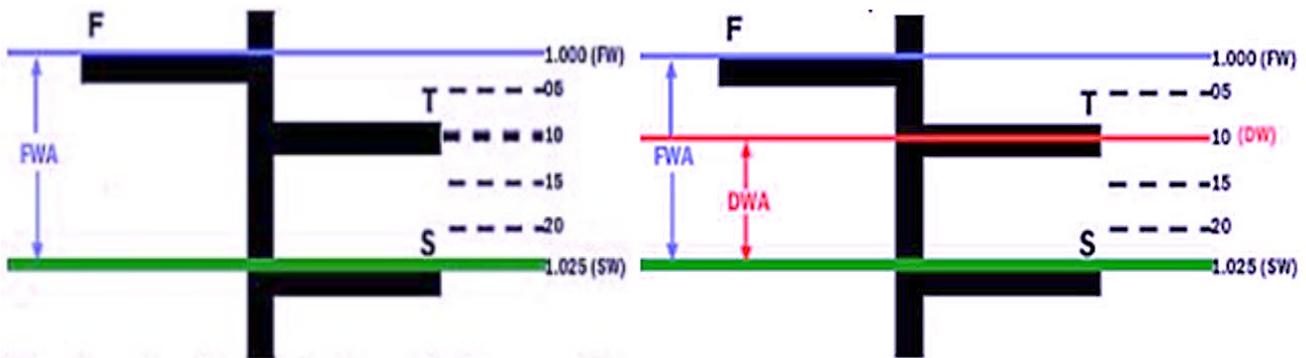


Figure. 5.6. Tolérance du franc bord en eau de quai (DWA)

La figure 5.6 montre les marques des lignes de charge suivantes :

- S pour la ligne de charge d'été en eau salée ;
- F pour la ligne de charge en eau douce et
- DW pour la ligne de charge en eau de quai.

On constate que, si un tel navire devait flotter dans l'eau d'une densité intermédiaire, appelée EAU DE QUAI (DOCK WATER), le changement de tirant d'eau salée vers les différentes eaux de quai peut être facilement déterminé.

Si on suppose que le tirant d'eau varie quand le navire se déplace de SW vers DW (par exemple $RD=1.010$), on voit simplement sur la figure 5.6 que cette variation est équivalent à $3/5$ de FWA ou $15/25$ de FWA.

Donc

$$DWA(mm) = FWA(mm) \times \frac{15}{25} \quad (5.7)$$

Par la multiplication des densités par 1000 pour simplifier la formule, on obtient :

$$15 = (25-10) = (1025-1010)$$

$$DWA(mm) = FWA(mm) \times \frac{1025 - RD_{dockwater}}{25} \quad (5.8)$$

Note : les densités ont été multipliées par 1000 pour simplifier la formule. Cette formule peut être facilement modifiée pour déterminer le tirant d'eau obtenu, si le navire se déplace depuis une eau de bassin vers une autre eau de bassin.

$$DWA(mm) = FWA(mm) = \frac{RD_{W1} \sim RD_{W2}}{1025} \quad (5.9)$$

Où :

- DWA est le Dock Water Allowance, exprimé en millimètres
- $RD_{dockwater}$ est la densité relative de l'eau de quai par rapport à l'eau salée
- RD_{W1} et RD_{W2} sont les densités relatives de deux eaux de bassin différentes
- (\sim) : signifie la différence entre (la plus grande - la plus petite)

Cette formule peut être facilement modifiée pour déterminer le tirant d'eau obtenu, si le navire se déplace depuis une eau de bassin vers une autre eau de bassin.

Notes :

1. Quand on charge un navire, on veut le charger au maximum. Si le navire est chargé dans une eau moins dense que l'eau salée, comme l'eau de quai, il faut savoir que le navire va monter au-dessus de l'eau quand il arrive à la mer, où la densité de l'eau salée est de $1,025 \text{ t/m}^3$. Cela peut affecter le tirant d'eau et il faut le prendre en compte quand on planifie le chargement du navire.
2. Le terme "eau de quai" désigne l'eau qui se trouve dans le port ou le quai où le navire est chargé ou déchargé. Le terme "eau de bassin" désigne l'eau qui se trouve dans un bassin fermé ou semi-fermé, comme un lac, un étang ou une baie. L'eau de quai est un type d'eau de bassin, mais pas tous les bassins sont des quais. L'eau de quai et l'eau de bassin ont une densité intermédiaire entre celle de l'eau salée et celle de l'eau douce. La densité de l'eau de quai peut varier entre $1,000$ et $1,025 \text{ t/m}^3$, alors que la densité de l'eau salée est de $1,025 \text{ t/m}^3$ et celle de l'eau douce est de $1,000 \text{ t/m}^3$. Parfois, on utilise le terme "eau de bassin" à la place de "eau de quai" dans certaines formules ou certains contextes pour être plus général et plus précis.

Conclusion

En conclusion, nous avons vu que les marques de franc-bord sont un élément primordial pour assurer la sécurité des navires. Elles permettent de limiter le poids embarqué et garantir un franc-bord minimum en fonction des critères de stabilité transversale à l'état intact. Les marques de franc-bord incluent les lignes de charge indiquant, sur les côtés, le tirant d'eau maximum auquel le navire peut être chargé dans différentes consistances d'eau au cours des diverses saisons de l'année. C'est là une question primordiale de sécurité qui justifie l'intervention de l'Administration de l'Etat du pavillon ou par délégation d'un bureau de société de classification tel que Bureau Veritas.

Chapitre 6

Centre de gravité et centre de carène

Introduction

L'équilibre d'un navire dans l'eau dépend de l'interaction entre deux forces principales : le poids du navire et la flottabilité du navire. Le poids du navire (W_f) est la force qui tend à faire couler le navire, et qui s'applique au centre de gravité (G) du navire. La flottabilité du navire (B_f) est la force qui tend à faire remonter le navire, et qui s'applique au centre de carène (B) du navire. Ces deux notions, le centre de gravité et le centre de carène, sont essentielles pour comprendre le comportement d'un navire dans l'eau, et pour assurer sa sécurité et sa stabilité. Dans ce chapitre, nous allons définir ces notions, expliquer comment elles varient en fonction des conditions du navire, et étudier leur influence sur l'équilibre du navire.

La figure 6.1 montre les notions de centre de gravité et de centre de carène pour un navire en équilibre et pour un navire avec gîte. La gîte est l'inclinaison transversale du navire par rapport à la verticale. Elle peut être due à la répartition des poids à bord du navire, à la pression du vent sur les voiles, ou à une force extérieure comme une vague ou un remorquage. La gîte peut être volontaire, pour faciliter certaines opérations, ou involontaire, en cas de déséquilibre du navire. La gîte d'instabilité est le cas où le navire trouve son équilibre à la gîte et non pas en position droite.

La figure 6.1a) montre un navire en équilibre. On peut observer que le centre de gravité (G) ne change pas, alors que le centre de carène (B) se déplace en fonction du volume immergé du navire. La figure 1b) montre un navire avec gîte. On peut observer que le centre de carène se déplace de B en B_1 , qui est la nouvelle position du centre de carène après l'inclinaison du navire. La distance entre B et B_1 dépend du volume immergé du navire et de l'angle d'inclinaison. Plus le volume immergé est grand et plus l'angle d'inclinaison est petit, plus la distance entre B et B_1 est faible. Plus le volume immergé est petit et plus l'angle d'inclinaison est grand, plus la distance entre B et B_1 est importante. La distance entre B et B_1 influence le bras de levier GZ et donc la stabilité du navire.

La figure 6.1 montre également les forces qui s'exercent sur le navire : la force de poids total (W_f), qui est égale au déplacement

en charge du navire (le poids total du navire chargé au maximum), et la force de flottabilité (B_f), qui est égale à la poussée d'Archimède qui fait flotter le navire. Ces deux forces sont opposées et alignées sur la même verticale lorsque le navire est en équilibre. Lorsque le navire s'incline, il se forme un couple de redressement dont le bras de levier est GZ , qui tend à ramener le navire à sa position initiale.

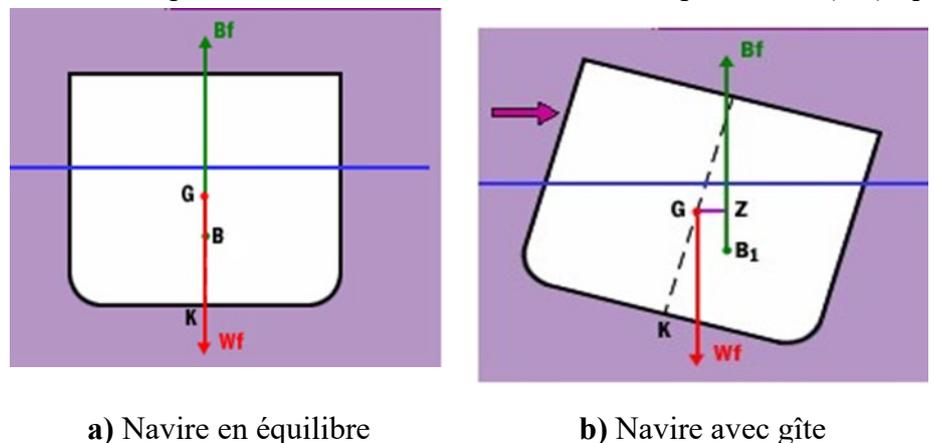


Figure 6.1. Centre de gravité et le centre de carène d'un navire

Définitions des termes en français et en anglais⁽¹⁾ :

- Centre de gravité (G) : le point où s'applique la force du poids total du navire, dirigée vers le bas.
Center of gravity: the point where the total weight force of the ship is applied, directed downwards.
- Centre de carène (B) : le point où s'applique la force de flottabilité, qui est la poussée d'Archimède qui fait flotter le navire, dirigée vers le haut.
Center of buoyancy (B): the point where the buoyancy force is applied, which is the Archimedes' thrust that makes the ship float, directed upwards.
- Gîte : l'inclinaison transversale du navire par rapport à la verticale.
Heel: the transverse inclination of the ship relative to the vertical.
- Poids total (Wf) : la force qui tend à faire enfoncer le navire, égale au déplacement en charge du navire.
Total weight (Wf): the force that tends to sink the ship, equal to the weight of the water displaced by the ship when fully loaded..
- Flottabilité (Bf) : la force qui tend à faire remonter le navire, égale à la poussée d'Archimède.
Buoyancy (Bf): the force that tends to raise the ship, equal to the buoyant force described by Archimedes' principle.
- Bras de levier (GZ) : la distance horizontale entre G et B, qui détermine le moment du couple de redressement.
Lever arm (GZ): the horizontal distance between G and B, which determines the moment of the righting couple.

6.1. Centre de gravité

Dans la conception des navires, le centre de gravité joue un rôle essentiel. Identifié par le symbole "G", ce point représente l'emplacement où le poids total du navire et de son chargement sont supposés se concentrer. Sa position est définie par la répartition des masses à bord du navire. Notons que le centre de gravité demeure fixe même lorsque le navire s'incline, à moins qu'un changement soit effectué dans la répartition des charges à bord.

Le centre de gravité influence de manière significative la stabilité du navire. Ainsi, lors de la conception d'un navire, il est crucial d'optimiser la position de G. L'officier en charge de la gestion des charges à bord doit parfaitement comprendre comment la position de G est affectée lorsque des charges sont ajoutées, retirées ou déplacées à bord du navire.

La distance verticale entre G et la quille est généralement désignée par KG. De même, la hauteur du centre de gravité des charges à bord, désignée par "g", par rapport à la quille est désignée par Kg. La figure 6.2 illustre ces concepts, mettant en évidence les positions de G et g, ainsi que les distances KG et Kg. Ces éléments sont fondamentaux pour garantir la stabilité du navire, et sont donc des aspects clés de la conception navale.

¹Note :

- La carène est la partie immergée de la coque d'un bateau. On peut aussi appeler cette partie les œuvres vives.
- La forme de la carène influence la stabilité, la vitesse et le confort du navire. La carène change de géométrie lorsque le navire s'incline ou s'enfonce, mais la coque reste inchangée.
- Le centre de gravité et le poids du navire lège sont déterminés à la construction. Ils constituent une donnée de base du navire

En outre, lors de la conception, le chantier naval estime la position de G pour le navire lège "light ship"². Le poids du "light ship" peut être déterminé de manière assez précise en fonction des matériaux utilisés. Une expérience d'inclinaison est effectuée pour vérifier la position de G, laquelle est ensuite ajustée en tenant compte des poids connus qui doivent être ajoutés ou retirés. Cela constitue le point de départ pour le calcul de G dans toute autre condition de chargement.

La position de G peut être déterminée de plusieurs manières :

1. Par la sommation de tous les poids, chacun multiplié par sa distance relative par rapport à la ligne de base ou à l'aplomb arrière, le tout divisé par le poids total.
2. Par le déplacement de poids conséquents, comme c'est le cas lors de l'expérience d'inclinaison.
3. De manière empirique en mesurant la période de roulis.

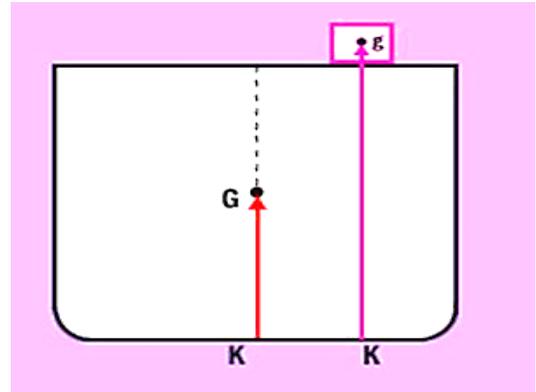


Figure 6.2. Concept de centre de gravité

En conclusion, lors de la conception des navires, une attention particulière doit être accordée à la gestion du centre de gravité du navire (G). Une compréhension précise de ces concepts est essentielle pour toute personne impliquée dans la conception et l'exploitation des navires. En effet, cette connaissance permet d'optimiser les performances de navigation et de garantir la sécurité de l'ensemble du navire et de son équipage.

6.2. Conséquences du déplacement de poids déjà à bord

Quand on change la position d'un poids qui se trouve déjà sur le navire, cela provoque un déplacement parallèle du centre de gravité du navire (G). Ce déplacement suit la même direction que celle du centre de gravité du poids déplacé (g). Ce mouvement de G est important pour la stabilité du navire et doit être calculé avec soin.

La figure 6.3 montre le phénomène de déplacement de poids à bord du navire et son effet sur la position de G.

Pour calculer le déplacement vertical de G (GGV), on utilise la formule suivante :

$$GGV = \frac{w \times d}{W} \quad (6.1)$$

Où :

- w représente le poids déplacé,
- d est la distance parcourue par le poids déplacé,
- W est le déplacement total du navire, qui inclut le poids qui a été déplacé.

² Le terme "navire lège" ou "light ship" fait référence à un navire totalement vidé de sa cargaison et ne transportant aucun liquide autre que ceux en circuit. Dans le contexte spécifique de l'étude de stabilité, il est utilisé pour analyser le comportement du navire en se concentrant uniquement sur l'équipement fixe à bord, comme les ancres et les dispositifs de sauvetage. Cela permet d'évaluer la stabilité dans des conditions spécifiques en isolant les effets de la cargaison et des liquides. Le poids du "light ship" peut être déterminé avec précision en fonction des matériaux de construction et de l'équipement requis pour la sécurité et la navigation. Il est important de tenir compte du contexte pour une interprétation précise du terme "navire lège".

G_v , dans ce contexte, désigne la nouvelle position verticale de G après le déplacement du poids.

Si GG_v est positif, cela signifie que G s'est déplacé vers le haut, augmentant ainsi la distance KG - la distance entre le centre de gravité du navire et la quille.

Donc, tout changement de position du poids à bord a une influence directe sur la position du centre de gravité (G) et, par conséquent, sur la stabilité générale du navire. C'est pourquoi il est essentiel pour les ingénieurs navals et les officiers responsables de la gestion du chargement d'avoir une connaissance précise de ces concepts, afin de maintenir l'équilibre et la sécurité du navire.

Exemple :

Supposons un navire ayant un déplacement total de 5000 tonnes avec un centre de gravité initial (KG) à 4,5 m au-dessus de la quille. Une charge " w " de 20 tonnes est déplacée du pont inférieur (où elle se situe à 2,0 m au-dessus de la quille, Kg initial) au pont supérieur (où elle se situe à 6,5 m au-dessus de la quille, Kg final).

La question est de déterminer la position finale du centre de gravité du navire (KG final) après ce déplacement de charge.

Solution :

1. Déterminer la distance de déplacement du poids (d) :

$$d = K_g \text{ final} - K_g \text{ initial} = 6,5 \text{ m} - 2,0 \text{ m} = 4,5 \text{ m}$$

2. Calculer le déplacement du centre de gravité du navire (GG_v) en utilisant l'équation :

$$GG_v = \frac{w \times d}{W}$$

$$= (20 \text{ t} \times 4,5 \text{ m}) / 5000 \text{ t} = 0,018 \text{ m}$$

3. Enfin, calculer la position finale du centre de gravité (KG final) :

$$KG \text{ final} = KG \text{ initial} + GG_v = 4,5 \text{ m} + 0,018 \text{ m} = 4,518 \text{ m}$$

Le déplacement de la charge de 20 tonnes du pont inférieur au pont supérieur résulte en un nouveau centre de gravité du navire à 4,518 m au-dessus de la quille.

6.3. Influence du chargement des poids sur l'équilibre du navire

La figure 6.4 montre comment le chargement d'un poids modifie la position du centre de gravité (G) et du centre de carène du navire.

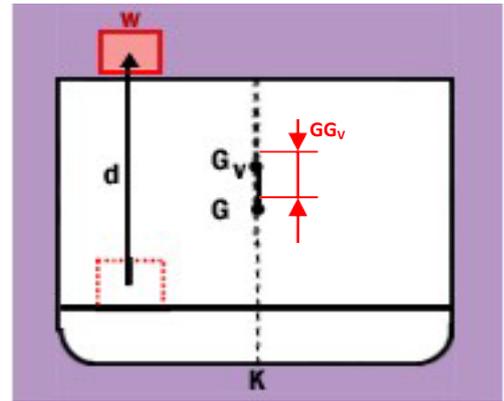


Figure 6.3. Déplacement du poids déjà à bord

Le centre de gravité (G) est le point d'application du poids total du navire. Il change selon la répartition des masses à bord et il se déplace avec le chargement ou le déchargement des poids.

Quand on charge un poids à bord du navire, G se dirige vers le centre de gravité du poids chargé (g).

On considère le navire ci-dessous où un poids w est chargé sur le côté tribord du pont du navire. G se déplace vers G_1 .

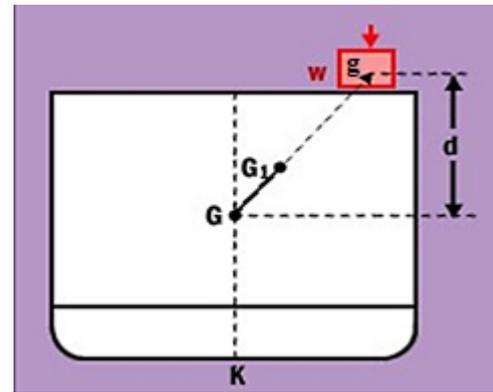
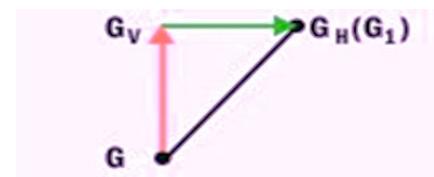


Figure 6.4. Influence du chargement des poids sur la position du centre de gravité

Pour le calcul, le déplacement de G vers G_1 a deux composantes :

GG_V : Composante verticale

GG_H : Composante horizontale



Le point g représente le centre de gravité du poids chargé w

Le point G représente le centre de gravité du navire avant le chargement

Le point G_V représente le centre de gravité du navire après le chargement

La distance d représente la distance verticale entre G et g

La flèche GG_V représente la composante verticale du déplacement de G vers G_1

La flèche GG_H représente la composante horizontale du déplacement de G vers G_1

A ce stade, on va étudier seulement la composante verticale du déplacement de G, puisque c'est la seule composante qui affecte le KG. Dans ce cas, le KG du navire va **augmenter**.

La composante verticale du déplacement de G est calculée par la formule :

$$GG_V = \frac{w \times d}{W + w} \quad (6.2)$$

Où :

- w est le poids chargé
- d est la distance verticale entre G du navire et g du poids chargé
- W est le déplacement initial du navire

G_V , dans ce contexte, désigne la nouvelle position verticale de G après le chargement du poids. Si GG_V est positif, cela signifie que G s'est élevé, augmentant ainsi la distance KG - la distance entre le centre de gravité du navire et la quille.

Donc, tout chargement de poids à bord a une influence directe sur la position du centre de gravité (G) et, par conséquent, sur l'équilibre général du navire. C'est pourquoi il est essentiel pour les ingénieurs navals et les officiers responsables de la gestion du chargement d'avoir une connaissance précise de ces concepts, afin de maintenir l'équilibre et la sécurité du navire.

Exemple

Un navire a un déplacement de 17200 t et un KG initial de 8.4 m. Calculer le KG final si 1400 t de cargaison sont chargées sur le pont principal à Kg 10.5 m.

Solution

$$GG_V = \frac{w \times d}{W + w} = \frac{1400 \times (10.5 - 8.4)}{17200 + 1400} = \frac{2940}{18600} = 0.158m$$

Comme G se déplace vers le haut (GG_V positif), on ajoute GG_V au KG initial :

$$KG_{final} = KG_{initial} + GG_V = 8.4 + 0.158 = 8.558m$$

6.4. Influence du déchargement des poids sur la stabilité du navire

Dans cette section, nous allons analyser l'effet du déchargement d'un poids à bord d'un navire sur la position de son centre de gravité (G), ainsi que les implications potentielles pour sa stabilité.

Lorsqu'un poids est déchargé d'un navire, le centre de gravité (G) se déplace à l'opposé de la position du centre de gravité du poids déchargé (g). Prenez l'exemple illustré par la figure 6.5, où un poids est déchargé depuis la cale inférieure d'un navire.

Dans cette situation, G se déplace vers une nouvelle position, G₁. Il convient de noter que seul le déplacement vertical de G est pris en compte à ce stade. Par conséquent, dans ce cas, la hauteur du centre de gravité du navire par rapport à la quille (KG) va augmenter.

Le déplacement vertical de G peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$GG_V = \frac{w \times d}{W - w} \quad (6.3)$$

où :

w est le poids déchargé,

d est la distance verticale entre le centre de gravité du navire (G) et celui du poids déchargé (g),

W est le déplacement initial du navire.

L'augmentation de KG résulte en une diminution de la distance entre G et le métacentre (M), connue sous le nom de GM. Par conséquent, la stabilité du navire diminue après le déchargement des poids.

Il est donc crucial de gérer soigneusement la distribution des poids à bord du navire, afin de minimiser les fluctuations de KG et de maximiser GM. Cette gestion contribuera à maintenir une stabilité adéquate pour le navire.

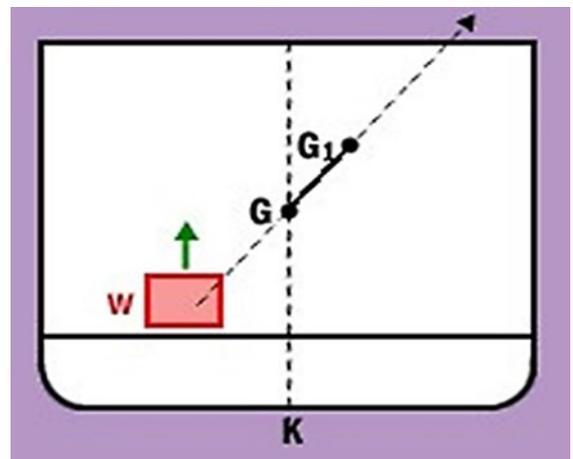


Figure 6.5 : Impact du déchargement de poids sur la stabilité du navire.

Exemple

Prenons un navire dont le déplacement est de 18 000 tonnes avec un KG initial de 5,30 mètres. Nous allons déterminer le KG final dans le cas où 10 000 tonnes de marchandises sont déchargées depuis le fond de la cale (où le KG est de 3,0 m).

Solution

Nous utilisons l'équation du déplacement vertical du centre de gravité (GGv) :

$$GGv = \frac{w \times d}{W - w}$$

Ici, w est le poids de la marchandise déchargée (10 000 t), d est la différence entre le KG initial du navire et celui du poids déchargé (5,3 m - 3,0 m = 2,3 m), et W est le déplacement initial du navire (18 000 t).

Donc,

$$GGv = \frac{10000t \times 2,3m}{18000t - 10000t}$$

Ce qui donne

$$GGv = 2,875m$$

C'est donc le déplacement vertical du centre de gravité après le déchargement de la marchandise. Ainsi, le KG final du navire sera le KG initial plus ce déplacement, soit

$$KG_{\text{final}} = KG_{\text{initial}} + GGv = 5,30 \text{ m} + 2,875 \text{ m} = 8,175 \text{ m}$$

Il est crucial de noter que le déchargement de poids a augmenté le KG du navire, ce qui, si on ne fait pas attention, pourrait potentiellement diminuer la stabilité du navire.

6.5. Problèmes de poids multiples

Traiter les problèmes de déplacement, de chargement et de déchargement de plusieurs poids sur un navire peut sembler ardu. Toutefois, cela peut être simplifié en utilisant les "moments par rapport à la quille" pour déterminer le KG final du navire.

Pour rappel, les "moments" (t-m) sont obtenus en multipliant le poids (t) par la distance (m). Pour un navire, le moment est équivalent à son déplacement (t) multiplié par son KG (m) :

$$\text{Moments } (t - m) = \text{Displacement } (t) \times \text{KG } (m) \quad (6.4)$$

Lorsque plusieurs poids sont déplacés, chargés ou déchargés, nous calculons les moments pour chaque poids, les additionnons, puis les divisons par le déplacement final du navire pour trouver le KG final.

Exemple

Examinons un exemple pour illustrer cette approche. Supposons qu'un navire ait un déplacement initial de 10000 t et un KG de 4.5 m. Pendant son voyage, le navire subit les opérations suivantes :

- Chargement de 120 t à Kg = 6.0 m
- Chargement de 730 t à Kg = 3.2 m
- Déchargement de 68 t depuis Kg = 2.0 m
- Déchargement de 100 t depuis Kg = 6.2 m
- Déplacement de 86 t depuis Kg = 2.2 m vers Kg = 6.0 m

Comment allons-nous calculer le KG final dans cette situation ?

Solution

Nous allons établir le tableau suivant où chaque poids est multiplié par son KG pour obtenir la valeur du moment correspondant. Le signe de cette valeur (+ ou -) dépend si le poids est chargé (+) ou déchargé (-). Dans le cas d'un poids déplacé, ce poids est traité comme deux poids séparés : un poids qui est déchargé, et un autre poids équivalent qui est chargé.

Ensuite, tous ces moments sont additionnés et divisés par le déplacement final pour obtenir le KG final. L'équation devient :

$$\text{KG (m)} = \Sigma \text{ Moments (t.m)} / \Sigma \text{ Déplacement (t)}$$

Opération	Poids (t)	KG (m)	Moments (t.m)	Remarques
Navire (initial)	+10 000.00	4.50	45 000.00	-
Chargement	+120.00	6.00	720.00	-
Chargement	+730.00	3.20	2336.00	-
Déchargement	-68.00	2.00	-136.00	-
Déchargement	-100.00	6.20	-620.00	-
Déplacement (déchargement)	-86.00	2.20	-189.20	Déplacement de 86 t Depuis Kg=2.2m vers Kg = 6.0m
Déplacement (chargement)	+86.00	6.00	516.00	
Total (Final)	+10 682.00	-	47 626.80	-
KG final	-	4.46	-	KG (m) = Moments (t.m) / Déplacement (t)

Pour calculer le KG final, nous utilisons la formule :

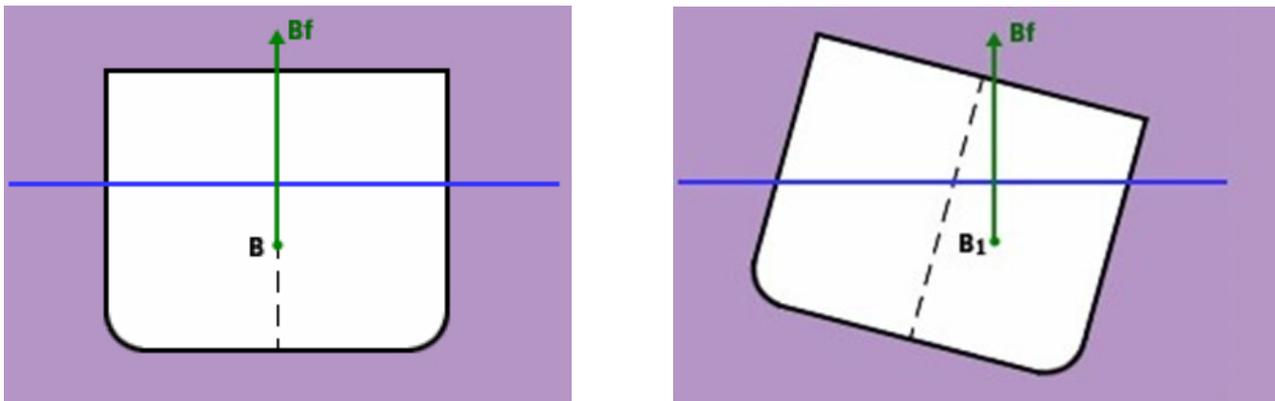
$$\text{KG final (m)} = \frac{\text{Moments totaux (t.m)}}{\text{Déplacement final (t)}} = \frac{47626.80 \text{ t.m}}{10682.00 \text{ t}} = 4.46$$

Cette méthode offre une stratégie systématique pour gérer plusieurs problèmes de poids lors des opérations de chargement, de déchargement et de déplacement d'un navire. Elle prend en compte automatiquement le déplacement du centre de gravité sans se préoccuper de sa direction. De plus, elle simplifie le calcul du KG final. Dans le cas d'un déplacement de poids, il est considéré comme un déchargement et un chargement à deux endroits distincts. Enfin, la méthode rend la gestion de multiples problèmes de poids plus maniable et intuitive.

6.6. Centre de Carène

Le centre de carène (B) est le point central géométrique du volume immergé d'un navire à un moment précis. Il s'agit du point d'application de la force de flottabilité, aussi connue sous le nom de poussée d'Archimède, qui est orientée vers le haut. Cette force est égale au poids du fluide déplacé par le navire et sert à contrebalancer le poids propre du navire.

La figure 6.6 illustre la manière dont le centre de carène se déplace lorsqu'un navire subit une force induisant une gîte, c'est-à-dire une inclinaison latérale. Il existe deux situations distinctes : celle où le navire est en équilibre (B) et celle où le navire est en gîte (B_1).



a) Centre de carène pour navire en équilibre (B)

b) Centre de carène pour navire en gîte (B_1)

Figure 6.6. Déplacement du centre de carène

Lorsqu'un navire est en gîte, le centre de carène se déplace vers le côté de l'inclinaison en raison du changement du volume immergé. Cela crée un couple qui tend à ramener le navire à sa position d'origine, assurant ainsi sa stabilité. Le métacentre, étant le point d'application des variations de la poussée d'Archimède, joue un rôle crucial dans ce processus. En référence à la Figure 6.6, lorsque le navire est incliné vers la droite, le centre de carène (B) se déplace aussi vers la droite, adoptant ainsi sa nouvelle position, B_1 .

En effet, Lorsqu'un navire s'incline ou gîte d'un côté - disons vers la droite pour l'explication - le côté droit de la coque du navire pénètre plus profondément dans l'eau, tandis que le côté gauche remonte et sort partiellement de l'eau. Il s'agit de la réaction naturelle du navire à une force qui le fait gîter.

À cause de cela, la forme de la coque du navire qui est submergée dans l'eau (le volume sous-marin) change. Plus de côté droit du navire est submergé, et moins de côté gauche est submergé. Ainsi, le centre de ce volume sous-marin - le centre de carène - se déplace vers la droite.

Maintenant, lorsque nous parlons du "centre de gravité du fluide déplacé", nous faisons référence au centre du volume d'eau que le navire repousse lorsqu'il est submergé. Comme plus de côté droit du navire est maintenant sous l'eau, il déplace plus d'eau de ce côté. Moins de côté gauche est sous l'eau, donc il déplace moins d'eau de ce côté. Par conséquent, le centre du volume d'eau déplacé se déplace également vers la droite.

Le déplacement du centre de carène et du centre de gravité du fluide déplacé contribue à rétablir le navire à l'équilibre. La force de flottabilité agit par le centre de carène et essaie de redresser le navire, tandis que le poids du navire agit par son centre de gravité et essaie de le maintenir incliné. L'interaction de ces forces aboutit à la stabilisation du navire et à son retour à une position droite, à moins que la force provoquant la gîte ne soit trop forte

Pour un navire ayant la forme d'un caisson sur une quille droite, la distance entre la quille et le centre de carène (KB) est égale à la moitié du tirant d'eau ($Draught/2$). Cette distance demeure constante quelle que soit l'inclinaison du navire.

L'analyse du centre de carène est d'une importance capitale pour comprendre et prévoir la stabilité d'un navire. En effet, le centre de carène est en relation avec deux autres points cruciaux : le centre de gravité (G) et le métacentre (M).

Le centre de gravité est le point d'application du poids du navire, dirigé vers le bas. Le métacentre est le point d'intersection des lignes verticales passant par les centres de carène pour différentes inclinaisons du navire.

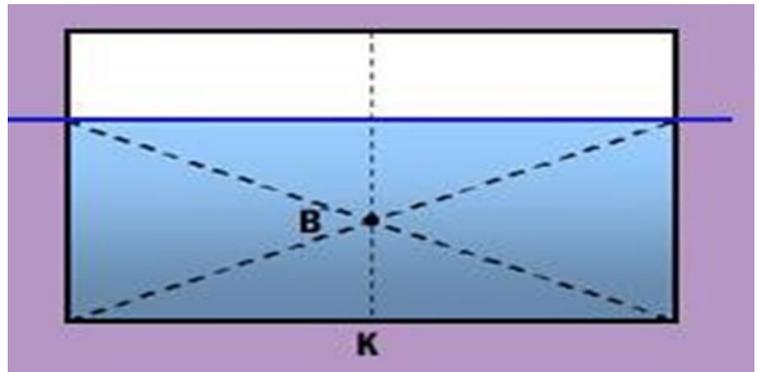


Figure 6.7. Centre de carène d'un navire de forme d'un caisson

La figure 6.8 illustre la relation entre ces trois points pour un navire en équilibre (a) et un navire en gîte (b).

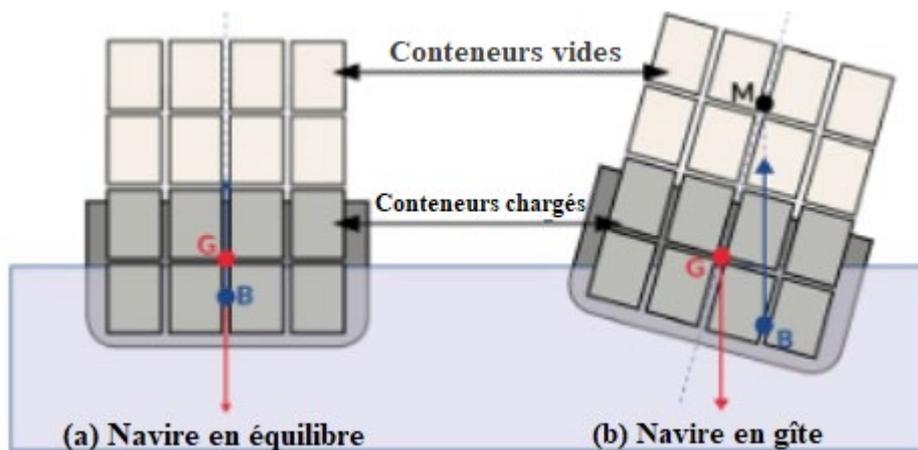


Figure 6.8 : Relation entre le centre de gravité, le centre de carène et le métacentre

Comme illustré dans la Figure 6.8, lorsqu'un navire est soumis à une gîte, en l'occurrence une inclinaison vers la droite, une transformation significative se produit dans la position du centre de carène. Ce déplacement se manifeste non seulement sur le plan latéral, en se dirigeant vers la droite, mais également sur le plan vertical, en se déplaçant vers le bas par rapport au centre de gravité du navire. Cette dynamique revêt une importance majeure dans le cadre de la stabilité transversale du navire. En effet, lorsque le navire fait face à des inclinaisons légères³, le métacentre, élément fondamental pour l'évaluation de la stabilité, reste stable et se positionne au-dessus du centre de gravité. Cette disposition

³ Le terme "inclinaisons légères" est généralement utilisé pour se référer à des situations où le navire est légèrement incliné par rapport à sa position d'équilibre. Dans ces cas, les forces de restauration qui ramènent le navire à l'équilibre sont proportionnelles à l'angle d'inclinaison. Cela signifie que pour de petites inclinaisons, le navire se comporte de manière linéaire : si l'angle d'inclinaison double, la force de restauration double également. Cependant, pour des inclinaisons plus grandes, le comportement devient non linéaire et plus complexe, avec des forces de restauration qui ne sont plus proportionnelles à l'angle d'inclinaison. En conséquence, le métacentre peut ne plus rester fixe et la stabilité du navire peut être affectée de manière plus significative

participe à la capacité du navire à conserver son équilibre et à retrouver sa position verticale suite à une perturbation.

La stabilité transversale d'un navire dépend du bras de levier entre la force de flottabilité et le poids du navire, qui correspond à la distance horizontale entre les points B et G. Plus cette distance est grande, plus le couple de redressement est important, et donc la stabilité du navire est renforcée.

La hauteur métacentrique (GM) est la distance verticale entre les points G et M. C'est une mesure de la stabilité initiale du navire contre le chavirement. Plus cette distance est grande, plus le navire est stable. La position de B_1 après une inclinaison peut être déterminée en prenant en compte plusieurs facteurs, notamment la forme de la coque du navire et la quantité d'eau déplacée lors de l'inclinaison. Cette évaluation nécessite souvent l'utilisation de méthodes d'ingénierie sophistiquées qui prennent en compte une représentation détaillée de la géométrie de la coque.

Toutefois, une approximation simplifiée peut consister à déterminer le volume immergé après l'inclinaison, à calculer le centre de gravité de ce volume, et à ajouter le déplacement latéral dû à l'inclinaison à la position de B avant l'inclinaison.

Il convient de noter que pour une précision optimale, ces calculs sont souvent effectués à l'aide de logiciels d'ingénierie spécialisés, qui prennent en compte la géométrie complexe de la coque du navire.

L'analyse et la compréhension du centre de carène sont donc essentielles pour garantir la stabilité d'un navire. En comprenant comment le centre de carène se déplace et interfère avec d'autres forces, il est possible de concevoir et d'opérer des navires de manière plus sûre et efficace. En particulier, il est crucial de veiller à ce que le centre de carène soit toujours situé au-dessus ou au même niveau que le centre de gravité du navire (G) pour éviter un renversement ou un chavirement.

Conclusion

En conclusion du chapitre 6, nous avons abordé l'importance primordiale du centre de gravité (G) et du centre de carène (B) dans la stabilité d'un navire. Nous avons souligné que l'équilibre du navire est déterminé par l'interaction entre le poids (W_f) et la flottabilité (B_f). Nous avons également mis en évidence l'impact du déplacement des poids à bord du navire sur la position du centre de gravité (G), et par conséquent sur la stabilité du navire. Ce point est crucial lors de la conception et de l'exploitation d'un navire. De plus, lors d'une gîte, le centre de flottaison (B) se déplace vers le côté de l'inclinaison, ce qui peut affecter la stabilité du navire et entraîner des problèmes de sécurité. Enfin, nous avons rappelé l'importance de comprendre l'interaction entre le centre de gravité et le centre de carène pour assurer la stabilité d'un navire. Dans les chapitres à venir, nous approfondirons ces concepts et examinerons d'autres facteurs de stabilité tels que le bras de levier de stabilité (GZ)

Chapitre 7

Stabilité statique transversale

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu les principes de base de la stabilité du navire, en mettant l'accent sur le rôle fondamental du centre de gravité et du centre de carène et de leur position relative dans la détermination de l'équilibre du navire. Dans ce septième chapitre, nous allons approfondir l'étude de la stabilité statique transversale, un concept clé dans la conception et l'exploitation des navires qui peut faire la différence entre flotter et couler.

La stabilité statique transversale désigne la capacité d'un navire à retrouver son alignement vertical après une perturbation externe - une condition essentielle pour la navigabilité sûre et efficace. Pour comprendre ce phénomène, nous examinerons deux aspects complémentaires de la stabilité : la stabilité statique et la stabilité dynamique.

La stabilité statique concerne l'équilibre du navire en conditions calmes, en analysant les facteurs tels que la gîte (inclinaison latérale) et l'assiette (inclinaison longitudinale). La stabilité dynamique, en revanche, examine la réaction du navire face à des forces extérieures, comme une rafale de vent ou une vague, entraînant des mouvements de roulis (oscillation latérale), de tangage (oscillation avant-arrière) et l'interaction des couples.

La stabilité est d'une importance capitale pour le design et la construction des navires. Les ingénieurs navals doivent prendre en compte la stabilité statique transversale lors de la conception de la coque et de la structure du navire, ainsi que la distribution de la charge et la position du centre de gravité. Une bonne stabilité signifie que le navire peut maintenir sa position verticale dans diverses conditions de mer et de charge, tout en résistant aux forces environnementales qui pourraient le déstabiliser.

Ce chapitre propose une évaluation quantitative de la stabilité du navire sous l'effet de faibles angles d'inclinaison. Pour illustrer ce concept, nous utiliserons la Courbe de Stabilité Statique ou Courbe GZ, un outil graphique qui représente le bras de levier redressant en fonction de l'angle d'inclinaison du navire. La stabilité statique transversale est donc une composante essentielle de la conception et de l'exploitation d'un navire

7.1. Stabilité statique transversale

La stabilité statique transversale représente l'une des caractéristiques les plus fondamentales dans la conception et le fonctionnement d'un navire. C'est une mesure qui indique la capacité intrinsèque d'un navire à rétablir sa position verticale après avoir été incliné par une force externe, alors que le navire est temporairement au repos en eau calme. La capacité d'un navire à maintenir son équilibre en dépit des forces externes changeantes est cruciale pour sa performance et sa sécurité.

Les facteurs clés qui influencent la stabilité statique transversale comprennent la position relative du centre de gravité (G) et du centre de carène (B) d'un navire à un angle donné d'inclinaison. Le centre de gravité est le point d'équilibre de toutes les forces de poids agissant sur le navire, tandis que le centre de carène est le point central de la force de poussée hydrostatique qui agit pour soutenir le navire en eau calme.

Prenons la Figure 7.1 pour mieux illustrer cette dynamique.

- Figure 7.1 a) représente un navire flottant en eau calme, dans une position droite et verticale. Dans cette position d'équilibre, les lignes d'action de la force du poids (W_f) et de la force de

poussée (B_f), passant respectivement par les centres G et B , coïncident. Cela indique qu'il n'y a pas de moment de redressement agissant sur le navire, il est donc stable.

- Figure 7.1 b) représente un navire qui a été incliné par une force externe. Dans cette situation, la position de B change, provoquant une séparation horizontale entre les lignes d'action de W_f et B_f . Cette séparation crée un moment de redressement qui agit pour ramener le navire à sa position droite.

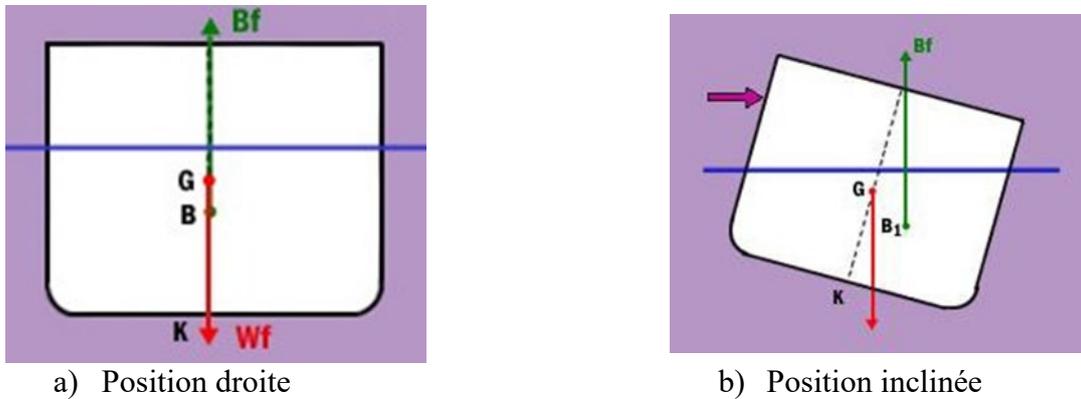


Figure 7.1. Positions relatives du centre de gravité G et centre de carène B

Le comportement illustré dans la Figure 7.1 b) est crucial pour la survie d'un navire dans des conditions maritimes difficiles. Si le moment de redressement est suffisamment fort et si la répartition du poids à bord du navire est bien gérée, le navire peut résister à des inclinaisons importantes sans risque de chavirer.

En conclusion, la stabilité statique transversale est une mesure clé de la robustesse et de la sécurité d'un navire. Comprendre son fonctionnement et son influence sur la performance d'un navire est d'une importance primordiale pour les concepteurs de navires, les officiers de pont et tout le personnel impliqué dans les opérations maritimes. Une conception et une exploitation judicieuses, en tenant compte de la stabilité statique transversale, peuvent grandement contribuer à la prévention des incidents en mer.

7.2 Analyse du bras de levier transversal (GZ)

La stabilité d'un navire est une considération cruciale dans sa conception et son fonctionnement. Un concept central de cette stabilité est le bras de levier transversal (GZ), qui correspond à la distance horizontale entre le centre de gravité du navire (G) et la ligne verticale d'action de la force de flottabilité (B_f) passant par le nouveau centre de carène (B_1) lorsque le navire est incliné.

La figure 7.2, intitulée " Bras de levier Transversal GZ", met en évidence cette relation dynamique entre W_f , B_f , G , et B_1 . Elle illustre la distance perpendiculaire GZ entre les lignes d'action de la force de flottabilité et du poids du navire lors de l'inclinaison.

La manière dont le bras de levier transversal évolue avec l'angle d'inclinaison est explorée en détail dans la figure 7.3. Cette figure se compose de deux sous-sections :

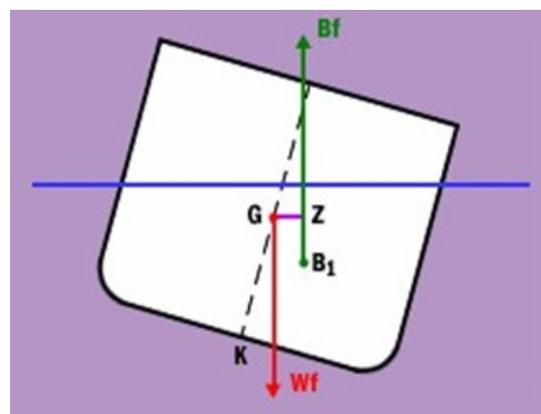


Figure 7.2. Bras de levier Transversal GZ

La figure 7.3(a), intitulée "Évolution progressive du bras de levier transversal avec l'angle d'inclinaison", démontre comment la distance GZ change en fonction de l'angle d'inclinaison du navire. La figure 7.3(b), intitulée "Tracé graphique de la variation du bras de levier transversal", présente une courbe de GZ illustrant son évolution en fonction de l'angle d'inclinaison.

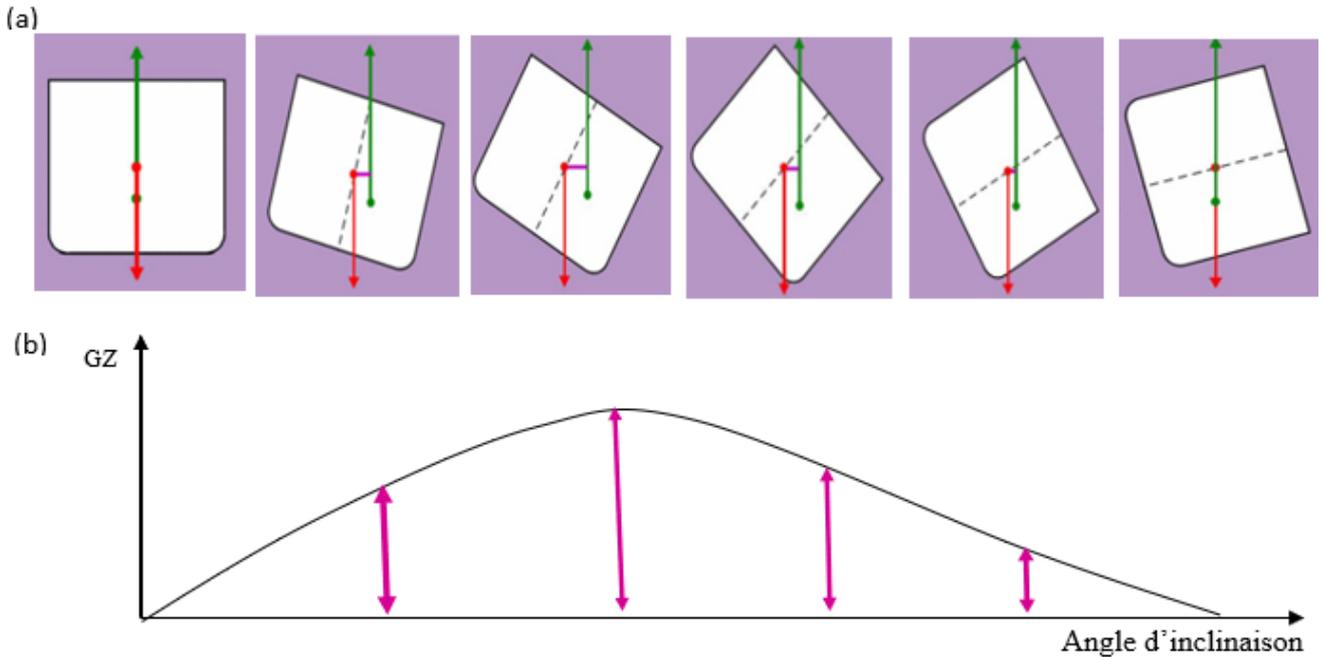


Figure 7.3. Représentation de l'évolution du bras de levier transversal (GZ) en fonction de l'angle d'inclinaison du navire. (a) Évolution progressive du bras de levier transversal avec l'angle d'inclinaison. (b) Tracé graphique de la variation du bras de levier transversal

La figure 7.4, "Exemple détaillé de la courbe du bras de levier transversal", offre un aperçu concret d'une courbe GZ typique. Elle démontre l'évolution de GZ en fonction de l'angle d'inclinaison, et met l'accent sur le point où GZ atteint sa valeur maximale, un indicateur crucial de la stabilité du navire.

L'Organisation Maritime Internationale, connue sous le nom d'OMI, a fixé des critères réglementaires relatifs à la valeur maximale de GZ et à l'angle d'inclinaison correspondant. Il est prévu que les exigences concernant le GM max soient détaillées ultérieurement dans le chapitre 11. Ces critères sont essentiels lors de la conception des navires afin de garantir leur sécurité et leur navigabilité en toutes circonstances, et donc pour assurer une stabilité adéquate des navires.

En conclusion, une analyse minutieuse du bras de levier transversal (GZ) est indispensable pour comprendre la stabilité statique d'un navire. La compréhension de son évolution en fonction de l'angle d'inclinaison, de sa valeur maximale, et de son rôle déterminant dans la capacité du navire à résister à l'inclinaison et à retrouver sa position verticale sont des éléments essentiels pour une conception, une construction et une exploitation sûres d'un navire.

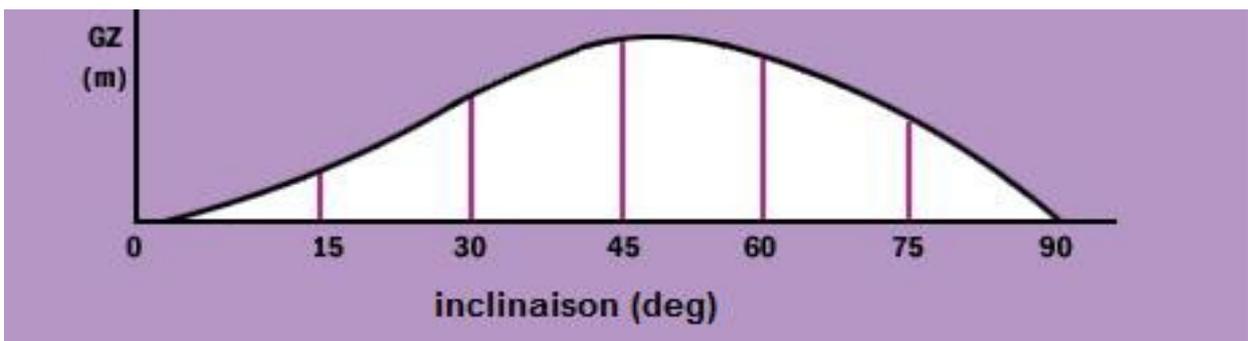


Figure 7.4 : Exemple détaillé de la courbe du bras de levier transversal

Au-delà de l'analyse quantitative, il est également crucial de comprendre les implications qualitatives de GZ. Par exemple, si le bras de levier transversal atteint son maximum à un angle d'inclinaison trop faible, le navire pourrait être instable dans des conditions de mer plus agitées. D'un autre côté, si le maximum est atteint à un angle d'inclinaison très élevé, le navire pourrait être excessivement stable, rendant difficile la correction de l'inclinaison.

De plus, le moment où GZ commence à diminuer est également un point d'intérêt. Si ce moment intervient à un angle d'inclinaison trop grand, le navire pourrait chavirer¹ avant que la force de redressement ne commence à diminuer. Si ce point est atteint à un angle d'inclinaison trop faible, le navire pourrait ne pas être suffisamment stable dans des conditions de mer plus calmes.

Enfin, il est important de noter que la forme globale de la courbe GZ est également significative. Une courbe qui augmente de manière rude puis diminue lentement pourrait indiquer un navire avec une grande stabilité initiale mais une diminution progressive de la stabilité avec l'inclinaison. Une courbe qui augmente lentement puis diminue rapidement pourrait indiquer un navire avec une faible stabilité initiale mais une grande stabilité à des angles d'inclinaison plus importants.

Ces éléments démontrent bien que la compréhension de la dynamique de GZ ne se limite pas à la lecture des valeurs numériques, mais nécessite une compréhension approfondie des implications de ces valeurs pour la stabilité globale du navire. La maîtrise de ces connaissances est cruciale pour tout ingénieur naval qui vise à assurer une navigation à la fois sûre et efficace lors de la conception d'un navire.

7.3. Analyse du moment de stabilité statique (moment de redressement)

Le moment de stabilité statique, également défini comme "moment de redressement", représente une mesure fondamentale de la capacité d'un navire à résister à une inclinaison et à retourner à une position verticale. Pour chaque angle d'inclinaison, ce moment est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Moment de redressement (t.m)} = GZ(m) \times \text{Displacement (t)} \quad (7.1)$$

Où :

- $GZ(m)$ est la distance horizontale entre les lignes d'action des forces de gravité (W_f) et de flottabilité (B_f). Cette distance est communément appelée le bras de levier transversal.
- $\text{Displacement}(t)$ représente le déplacement, ou le poids du navire à vide, qui est équivalent à la poussée d'Archimède, la force qui permet au navire de flotter.

Autrement dit, le moment de redressement est le produit de la force de flottabilité (B_f) par le bras de levier transversal (GZ).

Cette force de flottabilité, qui agit au bout du bras GZ , tourne autour du point G , le centre de gravité du navire. C'est cette force rotative qui pousse le navire à se redresser après une inclinaison.

Pour chaque angle d'inclinaison, le moment de redressement donne une mesure instantanée de la capacité du navire à retourner à une position verticale. Cette mesure est exprimée en tonnes-mètres (t.m), en supposant que le navire se trouve en eau calme.

¹ Chavirage : le retournement complet d'un navire, souvent causé par une perte de stabilité. C'est un événement dangereux qui peut entraîner le naufrage du navire et la perte de vies humaines.

La Figure 7.5 illustre ce concept en représentant les deux forces (W_f et B_f) qui engendrent le moment de redressement. Ces forces sont appliquées au bout du bras GZ et tournent autour du point G.

La compréhension et le contrôle du moment de redressement sont essentiels pour les ingénieurs et les navigateurs afin de maintenir la stabilité d'un navire, même dans des conditions météorologiques et océaniques difficiles. C'est un aspect fondamental de la conception, de la construction et de l'exploitation sécurisée d'un navire.

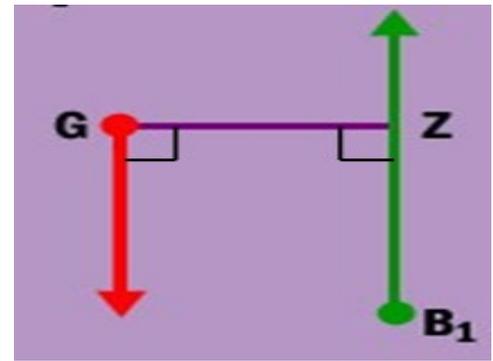


Figure 7.5. Moment de redressement

7.4. Le métacentre transversal initial (M)

La stabilité d'un navire est un domaine essentiel de la science navale. Au cœur de cette stabilité se trouve un point appelé le métacentre, noté M. Ce point est défini comme le point d'intersection des lignes d'action de la force de flottabilité (B_f) pour différentes inclinaisons du navire.

La force de flottabilité est la force verticale qui s'exerce sur le navire et qui est égale à son poids. Elle s'applique au centre de flottabilité (B), le point représentant le centre géométrique du volume immergé du navire.

Dans un état d'équilibre initial, lorsque le navire est parfaitement droit, la force de flottabilité s'aligne avec le poids du navire, passant par le centre de gravité (G). Cependant, dès que le navire s'incline, le centre de flottabilité B se déplace à cause du changement de la forme du volume immergé, créant une force de redressement qui tente de ramener le navire à la verticale.

Pour les petites inclinaisons, on considère généralement que le centre de flottabilité B se déplace le long d'un arc de cercle dont le centre est le métacentre M. Il est aussi courant de supposer que le métacentre reste fixe pour de petites inclinaisons. La figure 7.6 illustre clairement ces concepts à travers trois vues différentes.

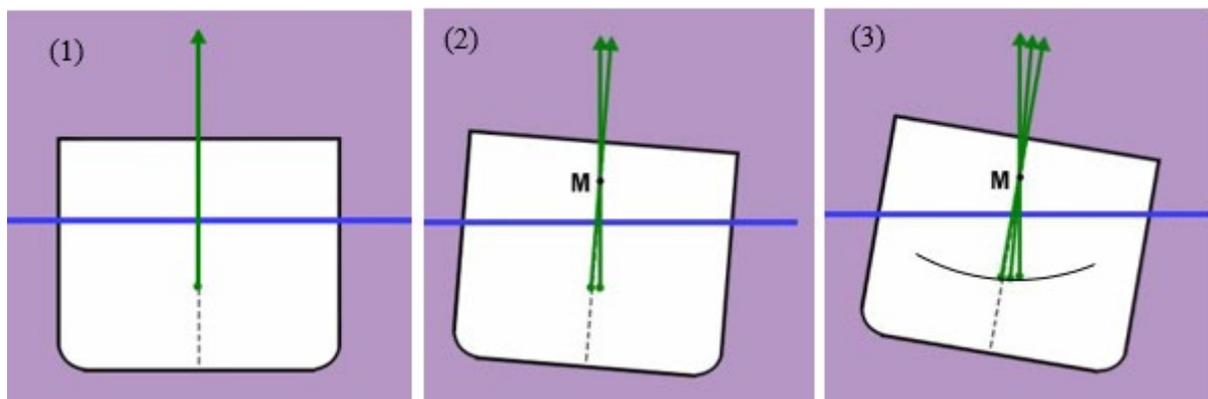


Figure 7.6. Illustration du métacentre transversal initial (M)

Sur la première vue, on ne voit pas le point M, qui est le point de passage de la force B_f pour un navire à l'équilibre vertical.

La deuxième vue montre comment le point M est déterminé par l'intersection des lignes d'action de la force B_f pour deux positions successives du centre de carène B. Le centre de carène varie avec l'inclinaison du navire.

La troisième vue montre que le point M reste le même pour trois cas de centres B différents, tant que

l'inclinaison du navire est petite. On peut aussi voir sur la figure l'arc de cercle dont le centre est le métacentre M et qui passe par les différents points B , surtout sur la troisième vue. Cet arc de cercle représente le déplacement du centre de carène B lors des petites inclinaisons du navire. Cet arc de cercle a pour rayon la distance BM .

La position du métacentre par rapport au centre de gravité du navire est cruciale pour la stabilité. Si le métacentre est situé au-dessus du centre de gravité ($M > G$), le navire est stable et reviendra à sa position initiale après une petite inclinaison. Si le métacentre est situé en dessous du centre de gravité ($M < G$), le navire est instable et continuera à basculer après une petite inclinaison.

La hauteur du métacentre au-dessus de la quille est désignée par KM . Cette hauteur est déterminée par des calculs basés sur la forme et les dimensions du navire et est généralement fournie par le constructeur du navire.

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) établit des critères réglementaires pour la stabilité des navires, afin d'assurer leur sécurité et celle de leurs équipages. Selon l'OMI, la hauteur métacentrique transversale initiale (GM) doit être suffisante pour assurer une stabilité adéquate. Pour les navires de charge, une hauteur GM minimale de **0,15 m** est généralement requise, bien que ce chiffre puisse varier en fonction de la taille et du type de navire.

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) impose effectivement des règles strictes pour assurer la stabilité des navires. Elle exige que chaque navire conserve une courbe de redressement satisfaisante jusqu'à un angle d'inclinaison de 30° . De plus, l'angle d'inclinaison maximal, c'est-à-dire l'angle à partir duquel la courbe de redressement atteint son maximum, ne doit pas dépasser 40° . Ces critères essentiels servent à s'assurer que le navire possède une réserve de stabilité suffisante pour résister à des conditions de mer défavorables.

En outre, pour prévenir le risque de chavirement, l'OMI stipule que l'angle de talonnement², ne doit pas être inférieur à 30° . Un angle de talonnement insuffisant pourrait signifier que le navire ne se redresserait pas assez rapidement ou efficacement après une inclinaison, ce qui accroît le risque de chavirement. Il est donc crucial de maintenir l'angle de talonnement en dessous de l'angle de chavirement pour assurer la stabilité du navire.

Il convient de noter que ces exigences sont des minimums généraux, et que des normes plus spécifiques peuvent s'appliquer à certains types de navires ou dans certaines conditions. Par exemple, les navires à passagers ou les navires transportant des marchandises dangereuses peuvent être soumis à des exigences plus strictes.

En résumé, le métacentre est un concept fondamental dans la stabilité des navires. Sa position détermine si un navire est stable ou instable. Comprendre le rôle du métacentre et les calculs qui y sont associés est essentiel pour assurer la sécurité en mer, ainsi que pour respecter les réglementations internationales et les obligations légales.

La formulation

Pour calculer la hauteur du métacentre transversal initial (KM), on utilise la formule suivante :

$$KM = \frac{I}{V} + KB \quad (7.1)$$

² L'angle de talonnement est l'angle d'inclinaison auquel un navire commence à se redresser après une inclinaison. Il est un paramètre essentiel pour la sécurité maritime. En effet, c'est le moment où le navire, après avoir été incliné par une force externe, entame son redressement pour retrouver une position plus verticale.

Où :

- I est le moment quadratique de la surface de flottaison par rapport à son axe d'inclinaison ;
- V est le volume immergé du navire ;
- KB est la hauteur du centre de carène (B) au-dessus de la quille.

Le moment quadratique (I) est une mesure de la répartition de la surface autour d'un axe. Plus la surface est éloignée de l'axe, plus le moment quadratique est grand. Le moment quadratique s'exprime en mètres à la puissance quatre (m⁴).

Le volume immergé (V) est le volume du fluide déplacé par le navire. Il correspond au poids lège ou au déplacement du navire divisé par la masse volumique de l'eau. Le volume immergé s'exprime en mètres cubes (m³).

Pour définir le point métacentre M, on peut utiliser le théorème des moments qui dit que le moment résultant des forces appliquées à un corps rigide est égal au produit du bras de levier et de la résultante des forces. Ainsi, si on considère un navire incliné d'un angle θ , on a :

$$W_f \times GZ = B_f \times BM \quad (7.2)$$

Où :

- W_f est le poids du navire ;
- GZ est le bras de levier transversal ;
- B_f est la force de flottabilité ;
- BM est la distance du centre de carène au métacentre
- $W_f * GZ$: Ceci représente le moment de force dû au poids du navire agissant à travers le centre de gravité (G). W_f est le poids du navire, et GZ est le bras de levier transversal, c'est-à-dire la distance horizontale entre le centre de gravité du navire (G) et la ligne d'action de la force de flottabilité (Z).
- $B_f * BM$: Ceci représente le moment de force dû à la flottabilité du navire agissant à travers le centre de flottabilité (B). B_f est la force de flottabilité (qui est égale au poids du navire dans l'équilibre), et BM est la distance du centre de carène (B) au métacentre (M).

Lorsque le navire est en équilibre, ces deux moments de force sont égaux, c'est-à-dire que

$$W_f * GZ = B_f * BM.$$

Cette égalité assure que le navire reste stable et ne bascule pas lorsqu'il est incliné.

Il est à noter que cette formule est une approximation qui suppose que l'inclinaison du navire est petite. Pour des inclinaisons plus importantes, la distance BM varie en fonction de l'angle d'inclinaison, et la formule devient plus complexe.

7.5. Hauteur métacentrique (GM)

La hauteur métacentrique (GM) est une mesure fondamentale pour évaluer la stabilité initiale d'un navire. Cette distance, qui sépare le centre de gravité (G) du métacentre transversal initial (M), est particulièrement pertinente lors de l'analyse de la stabilité du navire à faibles angles d'inclinaison.

Le métacentre (M), illustré à la Figure 7.6 de la section 7.4, agit comme un pivot pour le redressement du navire. En cas d'inclinaison, le centre de flottabilité (B) se déplace et génère une force de redressement visant à restaurer la position verticale du navire. Cette force dépend de la forme et des dimensions du navire, des données généralement fournies par le constructeur.

La hauteur métacentrique (GM) est un indicateur clé de la stabilité du navire, influençant directement la rapidité et l'efficacité de son redressement après une inclinaison.

La figure 7.7 apporte une illustration supplémentaire en mettant en évidence la relation entre la hauteur métacentrique, le bras de levier GZ et l'angle d'inclinaison θ . Dans cette figure, on peut observer que la force de redressement (RM), qui est la force qui tend à ramener le navire à la verticale, est égale au produit du bras de levier GZ (en mètres) et du déplacement du navire (en tonnes) :

$$RM = GZ \times \text{Déplacement} \quad (7.3)$$

Il est également important de noter la relation entre GZ et GM en utilisant l'angle d'inclinaison θ . Mathématiquement, cela se traduit par :

$$GZ = GM \times \sin(\theta) \quad (7.4)$$

Cette équation montre que le bras de levier de redressement (GZ) est directement proportionnel à la hauteur métacentrique (GM), et varie en fonction de l'angle d'inclinaison du navire.

La stabilité d'un navire est largement déterminée par la position de quatre points clés :

- K (le centre de la quille), est le point le plus bas de la structure d'un navire.
- G (le centre de gravité), est le point où la masse totale du navire peut être considérée comme concentrée.
- M (le métacentre), est le point de pivotement autour duquel le navire se redresse après une inclinaison. Enfin,
- B (le centre de flottabilité), est le point qui représente le centre géométrique du volume immergé du navire. Lorsque le navire s'incline, B se déplace et génère une force de redressement qui cherche à ramener le navire à sa position verticale).

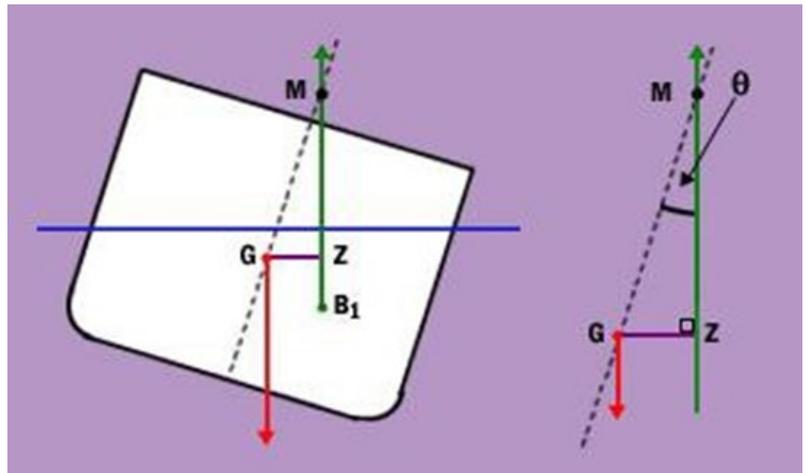


Figure 7.7. Relation entre la hauteur métacentrique, le bras de levier et l'angle d'inclinaison.

Dans le domaine de la conception et de la construction navale, les hauteurs KB (distance entre le centre de la quille et le centre de flottabilité), BM (distance entre le centre de flottabilité et le métacentre), GM (distance entre le centre de gravité et le métacentre) et KG (distance entre le centre de la quille et le centre de gravité) constituent les fondements de la stabilité d'un navire. Alors que KB et BM sont déterminés par la forme géométrique du navire, KG est affecté par la distribution de la charge à bord du navire.

D'un point de vue réglementaire, l'Organisation maritime internationale (OMI) stipule que la hauteur métacentrique initiale GM ne doit pas être inférieure à 0.15m. Cette exigence s'assure que le navire

maintient une stabilité adéquate même dans des conditions de mer défavorables.

La figure 7.8 est une représentation qui illustre les quatre paramètres fondamentaux de la stabilité d'un navire : KB, BM, GM et KG. Ces quatre hauteurs sont définies comme suit :

1. KB : La distance entre le centre de la quille du navire (K) et le centre de flottabilité (B). Cette hauteur est directement liée à la forme du navire et est déterminée par la géométrie de la coque du navire.
2. BM : La distance entre le centre de flottabilité (B) et le métacentre transversal initial (M). Tout comme KB, cette hauteur est liée à la forme géométrique du navire et est déterminée par la géométrie de la coque du navire.
3. GM : La distance entre le centre de gravité du navire (G) et le métacentre transversal initial (M). Cette hauteur est particulièrement importante lors de l'évaluation de la stabilité du navire sous de petits angles d'inclinaison.
4. KG : La distance entre le centre de la quille du navire (K) et le centre de gravité du navire (G). Cette hauteur dépend du chargement du navire.

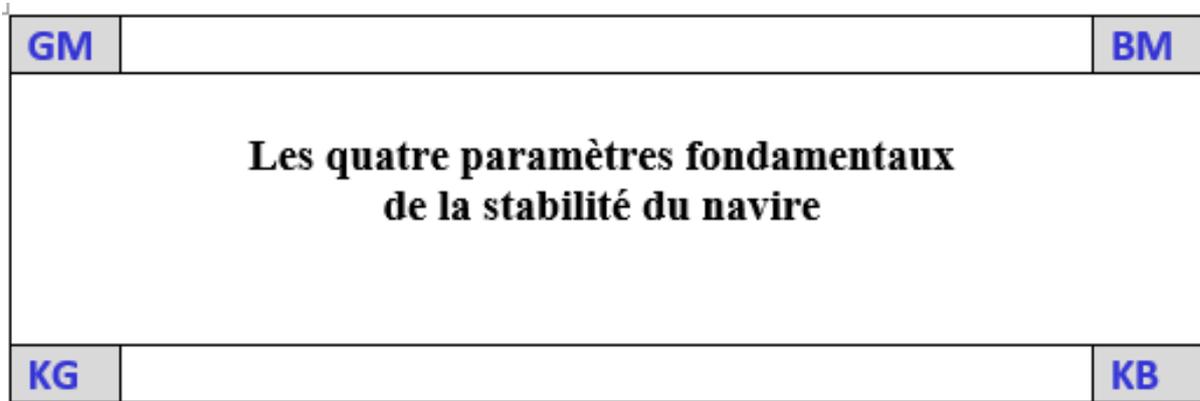


Figure 7.8 : Les quatre paramètres fondamentaux de la stabilité d'un navire

Ces quatre paramètres sont liés et jouent tous un rôle essentiel dans la stabilité du navire. La figure 7.8 permet de visualiser ces relations et aide à comprendre comment elles affectent la stabilité d'un navire. Il est important pour les officiers chargés du chargement du navire de comprendre ces concepts et de les prendre en compte lors de la planification du chargement et du déchargement du navire.

Dans la conception navale, les distances KB, BM, GM et KG sont essentielles pour la stabilité d'un navire. KB et BM sont déterminées par la forme du navire, tandis que KG dépend de la charge. L'officier de chargement doit s'assurer que le centre de gravité est toujours en dessous du métacentre pour garantir la stabilité.

Conclusion

Ce chapitre offre une exploration détaillée de la stabilité statique transversale, un élément fondamental dans la conception et l'exploitation des navires. Cette forme de stabilité, qui évalue la capacité d'un navire à revenir à l'alignement vertical suite à une perturbation, est vitale pour une navigation sûre et efficace. En se concentrant sur les aspects de stabilité statique, ce chapitre souligne leur importance primordiale dans l'architecture et la construction navale. Les ingénieurs navals, dans leur recherche de créer des navires solides et durables, doivent impérativement tenir compte de la stabilité statique lors de l'élaboration de la coque, de la structure, de la distribution de la charge, et du positionnement du centre de gravité. Une stabilité optimisée garantit que le navire peut maintenir son alignement vertical dans une

variété de conditions maritimes et de charges, tout en résistant efficacement aux forces environnementales potentiellement déstabilisantes.

Chapitre 8

Conditions de Stabilité des Navires

Introduction :

La stabilité d'un navire est une caractéristique essentielle pour tous les professionnels du secteur maritime, qu'ils soient impliqués dans la conception, la construction, le chargement ou l'exploitation du navire. La compréhension des principes fondamentaux de l'équilibre stable, neutre et instable est vitale pour assurer la stabilité d'un navire. Ces états d'équilibre sont déterminés par les positions respectives du centre de gravité (G), du centre de flottaison (B) et du métacentre (M).

8.1. Condition d'équilibre stable

Dans un état d'équilibre stable, le navire tend à retourner à sa position initiale après une inclinaison légère. C'est le cas lorsque le métacentre (M) est au-dessus du centre de gravité (G), ce qui est exprimé par l'inégalité $GM > 0$, où GM est la hauteur métacentrique, calculée comme la différence entre la hauteur du métacentre et la hauteur du centre de gravité par rapport au keel ($KG = KM - GM$).

La figure 8.1 illustre l'équilibre stable d'un navire incliné par une force externe F. Le centre de flottaison B se déplace vers B1 en raison du changement de forme du volume immergé du navire. Le métacentre M reste fixe, car il dépend uniquement des dimensions du navire et non de son inclinaison. Le centre de gravité G reste également inchangé, car il dépend uniquement de la distribution du poids à bord. Le bras de levier GZ est positif et crée un moment de redressement RM qui s'oppose à la force F, ramenant le navire à sa position verticale.

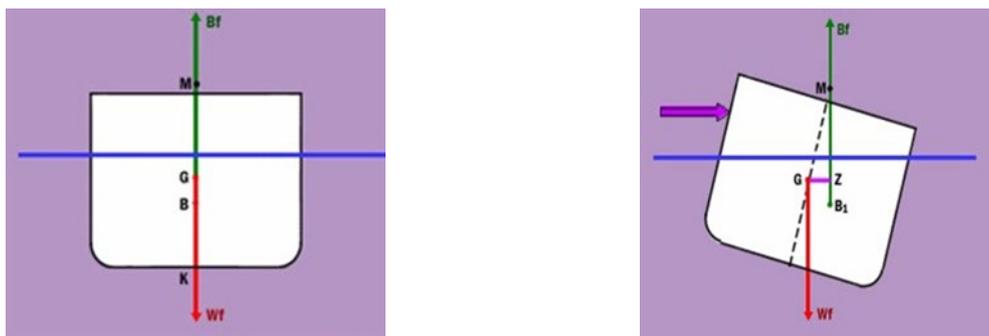


Figure 8.1. Illustration de la Stabilité d'un Navire: Positionnement du Centre de Gravité, du Centre de Flottaison et du Métacentre en Équilibre Stable.

Le moment de redressement (RM), qui est la force à surmonter pour incliner le navire, est donné par l'équation :

$$RM = W_f \cdot GZ = B_f \cdot GZ \quad (8.1)$$

où

- W_f est le poids du navire (qui est égal à la force de flottabilité B_f dans un état d'équilibre).
- GZ est le bras de levier.

Par exemple :

Considérons un navire avec une force de flottabilité de 10 000 t et une hauteur métacentrique GM de 0,5 m. Si ce navire est incliné d'un angle de 5 degrés, le bras de levier peut être approximé par :

$$\begin{aligned} GZ &\approx GM * \sin(\theta) \\ &\approx 0,5 \text{ m} * \sin(5 \text{ deg}) \\ &\approx 0,044 \text{ m.} \end{aligned}$$

Le moment de redressement serait donc :

$$\begin{aligned} RM &= 10\,000 \text{ t} * 0,044 \text{ m} \\ &= 440 \text{ t.m.} \end{aligned}$$

8.2. Condition d'équilibre neutre

Dans un état d'équilibre neutre, le navire reste incliné lorsqu'il est perturbé. C'est le cas lorsque le centre de gravité (G) et le métacentre (M) sont au même niveau, ce qui signifie que $GM = 0$. Dans cette situation, il n'y a pas de bras de levier ($GZ = 0$), donc le moment de redressement est nul ($RM = 0$).

La figure 8.2 démontre ce cas. On y voit un navire en équilibre neutre qui a été incliné par une force extérieure F. Le centre de flottaison B se déplace vers B₁, mais le métacentre M coïncide avec le centre de gravité G. Dans cette situation, le bras de levier GZ est nul et aucun moment de redressement RM n'est généré. Par conséquent, le navire reste dans sa position inclinée tant qu'aucune autre force ne le perturbe.

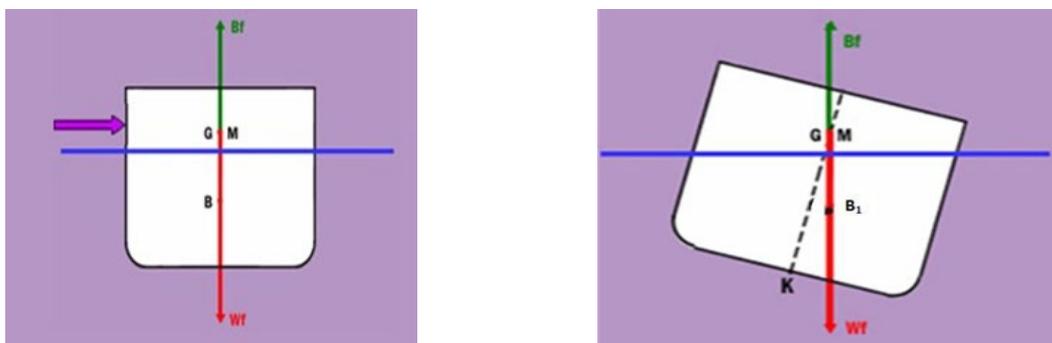


Figure 8.2. Représentation d'un navire en équilibre neutre : Coïncidence du centre de gravité et du métacentre.

8.3. Condition d'équilibre instable

Dans un état d'équilibre instable, le navire continue à s'incliner lorsqu'il est perturbé. C'est le cas lorsque le centre de gravité (G) est au-dessus du métacentre (M), ce qui signifie que $GM < 0$. Dans cette situation, le bras de levier (GZ) est négatif, indiquant que le couple formé par la force de flottabilité et le poids du navire tend à augmenter l'inclinaison.

La figure 8.3 illustre l'équilibre instable. Le navire, incliné par une force extérieure F, voit son centre de flottaison B se déplacer vers B₁, mais dans ce cas, le métacentre M est sous le centre de gravité G. Le bras de levier GZ est négatif et crée un moment de chavirement RM qui renforce la force F, faisant basculer le navire. Dans cette situation, si aucune mesure corrective n'est prise, le navire pourrait chavirer.

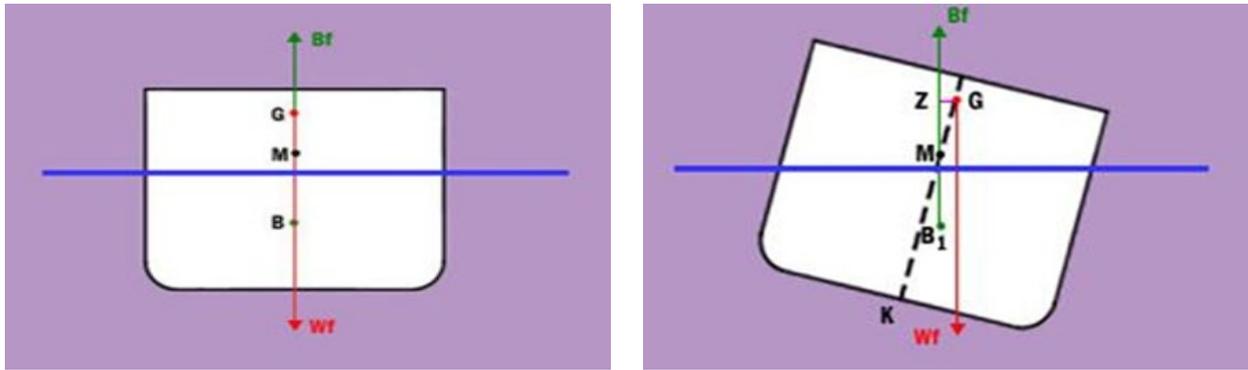


Figure 8.3. Visualisation de l'Équilibre Instable d'un Navire: Position du Centre de Gravité au-dessus du Métacentre.

Par exemple :

Si un navire avec une hauteur métacentrique négative de $GM = -0,2$ m est incliné d'un angle de 10 degrés, le bras de levier serait :

$$\begin{aligned} GZ &= GM * \sin(\theta) \\ &= -0,2 \text{ m} * \sin(10 \text{ deg}) \\ &\approx -0,035 \text{ m.} \end{aligned}$$

☞ Ce bras de levier négatif indique que le couple agit pour augmenter l'inclinaison.

Le couple formé par la force de flottabilité et le poids du navire, lorsqu'il a un bras de levier négatif, augmente l'inclinaison. Dans cette situation, si on ne prend pas de mesures correctives, le navire pourrait chavirer.

Si nous revenons à notre exemple avec un bras de levier négatif de $-0,035$ m et une force de flottabilité de 10 000 t, le moment de redressement (ou plutôt, dans ce cas, le moment de chavirement) serait :

$$\begin{aligned} RM &= 10\,000 \text{ t} * -0,035 \text{ m} \\ &= -350 \text{ t.m.} \end{aligned}$$

8.4. Maintien de la stabilité des navires

Le maintien de la stabilité d'un navire est essentiel pour assurer sa sécurité en mer. Cette section présentera les mesures correctives pour rétablir la stabilité ainsi que l'importance de la stabilité des navires.

8.4.1 Mesures correctives pour rétablir la stabilité

Si un navire se retrouve dans un état d'équilibre instable, l'application de mesures correctives est impérative. Ces mesures peuvent inclure des ajustements dans la répartition des masses à bord du navire ou des modifications du volume immergé. Les deux principales mesures correctives sont les suivantes :

- Ajustement de la répartition des masses : La disposition des masses à bord du navire influence la position du centre de gravité (G) et affecte la stabilité. Pour accroître la stabilité, il convient de diminuer le centre de gravité ou d'augmenter la hauteur métacentrique (GM). Cela peut être réalisé en réagénçant les charges à bord, par exemple en transférant le poids des structures supérieures vers des zones inférieures, ou en ajustant le ballast conformément aux directives de l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

- **Modification du volume immergé :** Le volume immergé du navire détermine la position du centre de flottaison (B) et a un impact sur la stabilité. Pour améliorer la stabilité, il est possible d'augmenter le volume immergé ou d'augmenter la hauteur du métacentre. Cela peut être réalisé par des modifications de la conception de la coque ou l'ajout d'appareils stabilisateurs, tout en respectant les normes édictées par l'OMI.

8.4.2 Importance de la stabilité des navires

La stabilité est un aspect crucial de l'architecture navale. Elle influence le comportement d'un navire en mer, que ce soit dans des eaux calmes ou agitées, et qu'il soit intact ou endommagé. Les calculs de stabilité se concentrent sur les centres de gravité, de flottabilité et les métacentres des navires, ainsi que sur leurs interactions. La stabilité des navires est prise en compte depuis des siècles dans la conception navale, avec l'évolution des méthodes de calcul.

En résumé, le maintien de la stabilité des navires nécessite des mesures correctives telles que l'ajustement de la répartition des masses et la modification du volume immergé. La stabilité des navires est d'une importance primordiale pour garantir leur comportement sûr en mer, et elle est étroitement liée aux paramètres de gravité, de flottabilité et de métacentre.

8.5. Évaluation et amélioration de la stabilité des navires

Cette section se concentrera sur l'évaluation de la stabilité des navires et les approches pour l'améliorer.

Évaluation de la stabilité :

L'évaluation de la stabilité d'un navire est une étape essentielle pour garantir sa sécurité en mer. Elle nécessite une compréhension précise des positions du centre de gravité, du centre de flottaison et du métacentre. Ces informations peuvent être obtenues à partir des plans du navire ainsi que des données sur la répartition du poids à bord. Différentes méthodes d'évaluation de la stabilité sont utilisées, chacune ayant ses avantages en fonction de la situation :

- **Méthode graphique** : Cette méthode implique la création d'un graphique de la courbe de bras de levier (GZ) en fonction de l'angle d'inclinaison (θ). La conformité du navire aux critères de stabilité établis par l'OMI est vérifiée en analysant la courbe de GZ pour s'assurer qu'elle satisfait aux exigences de stabilité, telles que les limites d'angle de gîte admissibles.
- **Méthode analytique** : Cette méthode utilise des formules mathématiques pour calculer les paramètres de stabilité tels que le moment de redressement, l'angle de gîte limite ou l'énergie potentielle. Les calculs analytiques permettent d'évaluer la stabilité du navire en utilisant des équations qui prennent en compte les dimensions, les masses et les forces agissant sur le navire.
- **Méthode numérique** : Cette méthode repose sur l'utilisation de logiciels informatiques avancés pour simuler le comportement du navire en fonction des conditions de chargement, de la forme de la coque et des forces extérieures. Les modèles numériques permettent une évaluation plus précise de la stabilité en prenant en compte des facteurs tels que les mouvements de la mer, les effets du vent et les interactions entre les différentes parties du navire.

L'évaluation de la stabilité des navires doit toujours être réalisée en conformité avec les normes et directives de l'OMI afin de garantir la sécurité du navire et de son équipage.

Amélioration de la stabilité :

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité des navires. Ces approches peuvent être liées à la conception du navire ou aux pratiques d'exploitation :

- Conception du navire : L'amélioration de la stabilité peut être réalisée dès la phase de conception en prenant en compte des éléments tels que la forme de la coque, la position des réservoirs de carburant et de cargaison, ainsi que l'ajout d'appendices stabilisateurs. Les appendices stabilisateurs comprennent des dispositifs tels que les quilles de roulis, les ailerons et les réservoirs anti-roulis, qui sont conçus pour réduire le roulis et améliorer la stabilité du navire. Les quilles de roulis, également connues sous le nom de "Bilge keels", sont des dispositifs nautiques en forme de V fixés le long de la coque du navire pour réduire la tendance au roulis. Elles augmentent la résistance hydrodynamique à la rotation, ce qui rend le navire moins sujet au roulis. Les ailerons sont des dispositifs stabilisateurs attachés sur les côtés du navire qui modifient leur angle d'attaque en fonction de l'angle de gîte et du taux de roulis, agissant de manière similaire aux ailerons d'un avion. Les réservoirs anti-roulis, quant à eux, sont des réservoirs intérieurs équipés de cloisons conçues pour ralentir le transfert d'eau d'un côté à l'autre du navire. Ces réservoirs piègent une plus grande quantité d'eau du côté le plus haut du navire, réduisant ainsi l'effet de surface libre et améliorant la stabilité.
- Pratiques d'exploitation sûres : Outre la conception du navire, certaines pratiques d'exploitation contribuent également à maintenir la stabilité. Cela inclut le respect des plans de chargement appropriés, qui déterminent la répartition adéquate des charges à bord du navire pour maintenir une stabilité optimale. Également, l'élimination de l'effet de surface libre en assurant que les réservoirs de liquide à bord du navire soient soit complètement remplis, soit totalement vidés, conformément aux recommandations de l'OMI. En outre, le respect des procédures de sécurité et des réglementations de l'OMI concernant la stabilité des navires est essentiel pour garantir une exploitation sûre et stable.

En mettant en œuvre ces approches de conception et de pratiques d'exploitation, il est possible d'améliorer significativement la stabilité des navires et de réduire les risques associés aux mouvements excessifs. Cependant, il est important de souligner que toutes les modifications ou ajustements doivent être effectués en conformité avec les normes et directives établies par l'OMI, afin de garantir la sécurité et la stabilité du navire dans toutes les conditions de navigation.

Cette section fournit un aperçu complet de l'évaluation et de l'amélioration de la stabilité des navires, mettant en évidence l'importance de prendre en compte ces aspects dès la phase de conception et tout au long de l'exploitation pour assurer la sécurité et la stabilité optimale des navires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les conditions de stabilité des navires, un aspect crucial pour tous les professionnels du maritime. Nous avons exploré les principes fondamentaux de l'équilibre stable, neutre et instable, et comment ces états sont influencés par les positions clés du navire, à savoir le centre de gravité (G), le centre de flottaison (B) et le métacentre (M).

Nous avons souligné l'importance d'un équilibre stable, où le navire revient à sa position initiale après une inclinaison légère, ce qui se produit lorsque le métacentre (M) est situé au-dessus du centre de gravité (G). Nous avons également abordé les défis liés à l'équilibre instable et mis en évidence la nécessité d'appliquer des mesures correctives pour rétablir la stabilité.

La stabilité des navires a été présentée comme un élément crucial pour assurer la sécurité et l'efficacité des opérations maritimes. Nous avons examiné différentes méthodes d'évaluation de la stabilité, notamment la méthode graphique, la méthode analytique et la méthode numérique, toutes conformes aux normes établies par l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

Enfin, nous avons souligné que l'amélioration de la stabilité des navires ne se limite pas à la conception initiale, mais englobe également des pratiques d'exploitation judicieuses. Le respect des réglementations de l'OMI, telles que les plans de chargement appropriés et l'élimination de l'effet de surface libre, est essentiel pour maintenir une stabilité optimale.

En conclusion, ce chapitre nous a fourni une compréhension approfondie des conditions de stabilité des navires, de leur évaluation et des approches pour les améliorer. Il est essentiel de reconnaître que la stabilité des navires joue un rôle central dans la sécurité maritime et qu'elle doit être prise en compte à toutes les étapes, de la conception à l'exploitation, pour garantir des opérations maritimes sûres et efficaces.

Chapitre 9

Métacentre Transversal Initial

Introduction

Le présent chapitre offre un aperçu approfondi du métacentre transversal initial, un concept crucial pour assurer la stabilité des navires. Lorsqu'un navire est soumis à une inclinaison, la position de son centre de poussée, représentée par le point B, se déplace le long d'un arc de cercle centré au métacentre M. Cette trajectoire, déterminée par des calculs précis, joue un rôle essentiel dans la stabilité du navire. Dans ce chapitre, nous explorerons l'explication détaillée du métacentre transversal initial, les calculs spécifiques pour les navires de type "barge" et l'importance de comprendre cette notion pour assurer la sécurité en mer. En comprenant pleinement le métacentre transversal initial, les professionnels du maritime seront en mesure de prendre des décisions éclairées pour optimiser la stabilité des navires et garantir des opérations maritimes sûres et efficaces.

9.1 Explication du Métacentre transversal initial

Lorsqu'un navire est incliné sous un petit angle, le centre de poussée (B) se déplace de B à B₁ (bb₁) comme illustré sur la Figure 9.1. La distance BB₁ est calculée en utilisant l'expression :

$$BB_1 = \frac{v \times bb_1}{V} \quad (9.1)$$

Où :

- v : volume de la tranche de poussée transférée
- bb₁ : distance de déplacement du centroïde de la tranche
- V : volume de déplacement du navire

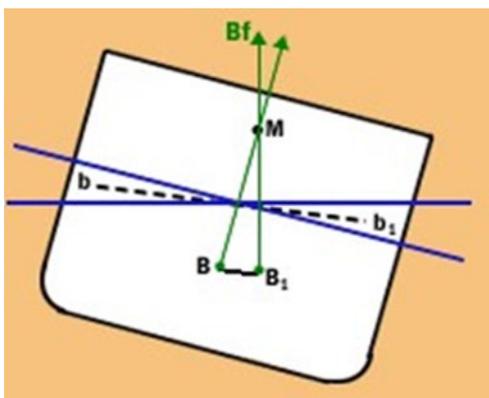


Figure 9.1. Navire incliné sous un petit angle

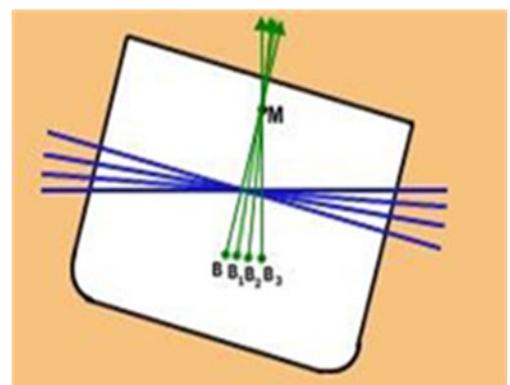


Figure 9.2. Formation d'arc d'un cercle centré au point M

La trace de B pour plusieurs petits angles d'inclinaison forme un arc de cercle centré au point M, comme illustré dans la Figure 9.2.

BM est appelé rayon métacentrique.

9.2 Calcul de KM pour un navire type "Barge"

Pour un navire de type "barge", le rayon métacentrique BM peut être calculé à l'aide de la formule :

$$BM = \frac{LB^3}{12V} \quad (9.2)$$

Comme illustré dans la figure 9.3, pour une barge, la hauteur KM (Hauteur Métacentrique) varie de manière non-linéaire avec le tirant d'eau. Initialement, lorsque le tirant d'eau est faible, la hauteur KM commence par une valeur élevée, puis diminue à mesure que le tirant d'eau augmente. Toutefois, à partir d'un certain tirant d'eau, la hauteur KM augmente à nouveau.

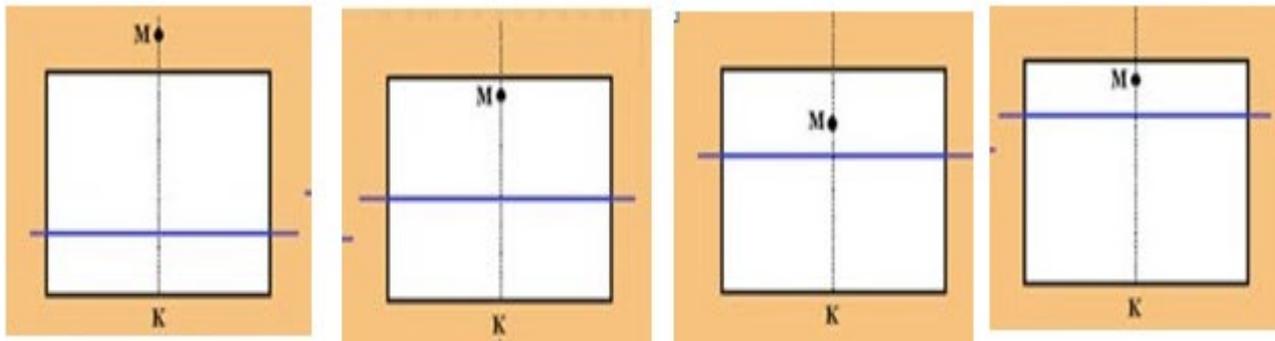


Figure 9.3. Variation de KM avec le tirant d'eau

La hauteur KM est calculée en additionnant les hauteurs de la quille au centre de flottaison (KB) et le Rayon Métacentrique (BM) :

$$KM = KB + BM \quad (9.3)$$

Exemple de calcul

Nous démontrons ici comment le KM d'un navire de type "barge" varie avec le tirant d'eau. Pour ce faire, nous utilisons les formules précédentes pour une barge de 100 m de longueur et 20 m de largeur.

Le KM est calculé pour une gamme de tirants d'eau allant de 1.00 m à 15.00 m. Les valeurs de KB et BM sont d'abord déterminées, puis ajoutées pour obtenir les valeurs correspondantes de KM. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 9.1 ci-dessous.

Il est intéressant de noter que le KM diminue de 33.83 à 8.17 lorsque le tirant d'eau augmente de 1 à 8. Cependant, à partir d'un tirant d'eau de 9, le KM commence à augmenter, atteignant une valeur de 9.72 à un tirant d'eau de 15.

Draught (m)	KB (m)	BM (m)	KM (m)
1	0.50	33.33	33.83
2	1.00	16.67	17.67
3	1.50	11.11	12.61
4	2.00	8.33	10.33
5	2.50	6.67	9.17
6	3.00	5.56	8.56
7	3.50	4.76	8.26
8	4.00	4.17	8.17
9	4.50	3.70	8.20
10	5.00	3.33	8.33
11	5.50	3.03	8.53
12	6.00	2.78	8.78
13	6.50	2.56	9.06
14	7.00	2.38	9.38
15	7.50	2.22	9.72

}

KM diminue

}

KM augmente

Tableau 9.1. Variation de KM en fonction du tirant d'eau pour une barge

Cette analyse illustre l'importance de considérer les variations de la hauteur métacentrique en relation avec le tirant d'eau lors de la planification du chargement et de la navigation d'un navire.

Après avoir exploré l'importance de la variation de la hauteur métacentrique (KM) en fonction du tirant d'eau, il est bénéfique de l'illustrer graphiquement pour une meilleure appréhension et une facilitation de la planification du chargement et de la navigation du navire.

La Figure 9.4 décrit graphiquement la variation de KM en fonction du tirant d'eau. Ce tracé est vital pour visualiser comment KM évolue avec le tirant d'eau pour un navire de type "barge". L'interprétation de ce diagramme offre une indication claire de la façon dont la stabilité d'un navire peut varier en fonction des différentes valeurs du tirant d'eau.

De plus, pour enrichir le diagramme, nous avons également inclus une représentation graphique des valeurs de la hauteur du centre de gravité (KG) en fonction du tirant d'eau. Dans cet exemple, nous avons pris en compte un **KG constant de 9.00m**, ce qui est représenté par une ligne droite dans le diagramme ci-

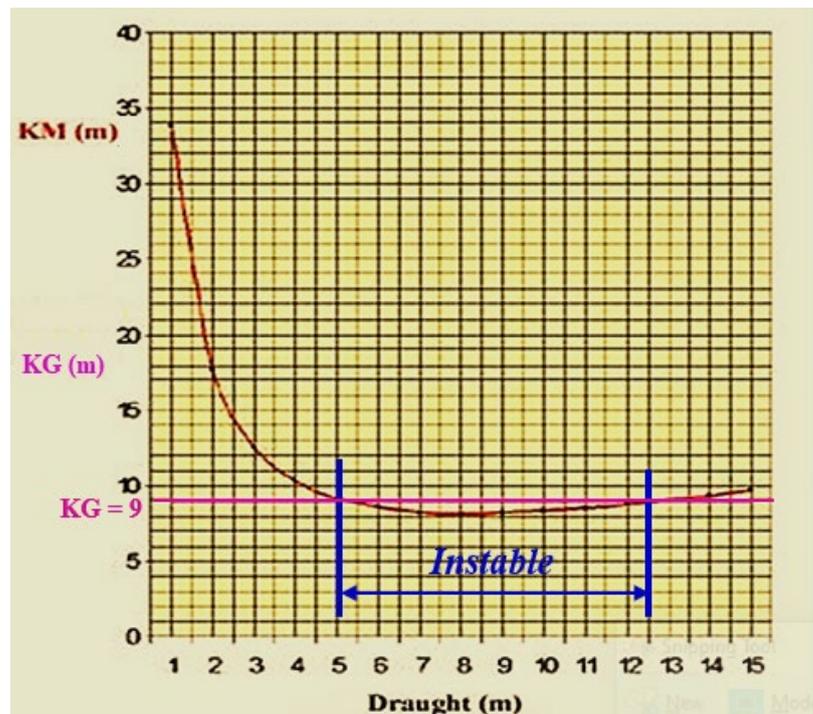


Figure 9.4. Diagramme de KM et KG fonction du tirant

dessus. Étant donné que le KG est un facteur déterminant qui influence la stabilité d'un navire, son incorporation dans le graphique permet une évaluation plus exhaustive des conditions de stabilité.

L'analyse conjointe des courbes de KM et de KG dans le diagramme présenté sur la figure 9.4 offre une compréhension plus profonde de la relation entre la hauteur métacentrique, le tirant d'eau et la hauteur du centre de gravité. Cette analyse favorise la prise de décisions éclairées en vue d'optimiser la stabilité et la sécurité du navire dans une gamme variée de conditions de tirant d'eau.

9.3 Utilisation du diagramme de métacentre

Le diagramme de métacentre sert à illustrer comment la valeur de KM varie en fonction du tirant d'eau, qui équivaut à la variation du déplacement. Il est indispensable qu'un navire maintienne une GM adéquate. Comme référence, le GM devrait se situer dans une plage allant de 4 à 8% de la largeur du navire. Par exemple, pour un navire de 16 mètres de large, une GM appropriée serait comprise entre 0.6 et 1.3 mètres.

L'usage du diagramme de métacentre permet d'identifier le KG final nécessaire pour atteindre la valeur requise de GM. En examinant la figure 9.4, on constate que pour n'importe quel tirant d'eau, le GM pour un KG de 9.00 mètres peut être déterminé par l'équation $GM = KM - KG$.

Il devient évident qu'avec un KG de 9.00 mètres, le navire peut devenir instable pour certains tirants d'eau. Plus précisément, pour des tirants d'eau allant de 5 à 12,5 mètres, le navire est susceptible de devenir instable. Cela est dû au fait que, dans ces conditions, G est situé en dessous de M, ce qui entraîne une valeur négative de GM, soit $KM - KG = GM$.

Rappelons que l'instabilité d'un navire survient lorsque G est placé sous M, résultant en une valeur négative pour GM.

9.4 Exemple de détermination de KG final avec un GM exigé

Prenons le même diagramme que précédemment avec $L = 100$ m, $B = 20$ m. Nous souhaitons charger le navire à un tirant d'eau maximum permis en eau salée de 4.5m.

1. *Quel est le déplacement maximum du navire ?*

Le déplacement maximum de la barge, $DISPL_{Barge} = (L \times B \times d) \times \rho = (100 \times 20 \times 4.5) \times 1.025 = 9225$ t.

2. *Le GM exigé à la fin de chargement est 1.2m. Quel est le KG maximum permis ?*

D'après le diagramme, le KM pour un tirant d'eau de 4.5m est d'environ 9.7m. Si le GM exigé est de 1.2m, alors le KG maximum permis est de 8.5m (9.7m - 1.2m).

3. *Le navire est maintenant chargé à un déplacement de 9000t, avec un KG de 8.60m. Quel est le Kg maximum pour compléter le chargement avec 225t de cargaison, en assurant le GM exigé à 1.20 m ?*

Dans la solution 2, nous avons déterminé que le KG max exigé était de 8.5m. En prenant les moments par rapport à la quille, l'inconnu Kg est remplacé par x (x est la hauteur Kg relatif au chargement final par 225t).

Le KG final est déjà connu et égale à 8.5m.

En considérant le tableau suivant :

Displacement (t)	KG(m)	Moments (t.m)
Initial	9000	8.6
Chargement	225	x
Total	9225	8.5

Pour résoudre x , nous utilisons l'équation :

$$8.5 \times 9225 = 77400 + 225x$$

$$78412.5 = 77400 + 225x$$

$$1012.5 = 225x,$$

$$x = 4.5\text{m}.$$

Donc, le Kg maximum pour compléter le chargement avec 225t de cargaison, tout en assurant le GM exigé à 1.20 m, est de 4.5m.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de plonger dans l'univers du métacentre transversal initial et de comprendre son rôle essentiel dans la stabilité des navires. Grâce à l'explication détaillée du concept et aux calculs spécifiques pour les navires de type "barge", nous avons acquis une connaissance précieuse pour garantir la stabilité et la sécurité lors du chargement et de la navigation. L'utilisation du diagramme de métacentre nous permet également d'identifier le KG final nécessaire pour atteindre la valeur requise de GM. En appliquant ces connaissances, les professionnels du maritime pourront prendre des décisions éclairées afin d'optimiser la stabilité des navires dans une variété de conditions de tirant d'eau. La prise en compte du métacentre transversal initial contribue ainsi à assurer des opérations maritimes plus sûres et plus efficaces.

Chapitre 10

Effet de la surface libre sur la stabilité d'un navire

Introduction

L'une des principales causes d'instabilité des navires est l'influence de la surface libre. Cela se produit lorsque les réservoirs/citernes à bord du navire ne sont pas complètement remplis ou partiellement vides. Quand un navire s'incline, le liquide dans un réservoir se déplace vers le côté le plus bas. Nous allons voir dans ce chapitre comment cela affecte négativement la stabilité statique transversale d'un navire. Il est essentiel que l'étudiant comprenne parfaitement l'influence des réservoirs partiellement vides sur la stabilité statique transversale et la nécessité de minimiser le nombre de citernes partiellement vides. L'influence de la surface libre n'est pas seulement causée par des réservoirs partiellement vides, mais peut aussi être provoquée par d'autres circonstances, comme par exemple l'accumulation d'eau sur le pont. Afin de permettre que l'eau embarquée soit évacuée rapidement, un navire devrait disposer de sabords de décharge adéquats.

10.1 Effet de la surface libre sur la stabilité transversale

La surface libre est le phénomène qui se produit lorsque le liquide dans un réservoir partiellement rempli se déplace librement sous l'effet de l'inclinaison du navire. Cela entraîne un déplacement du centre de gravité du liquide et du navire, et donc une réduction de la stabilité transversale.

Pour comprendre l'effet de la surface libre, il faut d'abord connaître quelques notions de base sur la stabilité transversale.

i. Notions de base sur la stabilité transversale :

La stabilité transversale est la capacité d'un navire à revenir à une position droite après avoir été incliné par une force externe, comme le vent ou la houle. Elle dépend principalement de la position relative du centre de gravité (G) et du centre de carène (B) du navire.

Le centre de gravité (G) est le point où s'applique le poids du navire. Il dépend de la répartition des masses à bord du navire. Le centre de carène (B) est le centre de gravité du volume immergé du navire. Il dépend de la forme de la coque et du tirant d'eau du navire.

Le métacentre transversal (M) est le point d'intersection de la verticale passant par le centre de carène dans la position droite et de la verticale passant par le nouveau centre de carène dans la position inclinée. Il dépend également de la forme de la coque et du tirant d'eau du navire. Le bras de levier métacentrique (GM) est la distance entre le centre de gravité et le métacentre transversal. Il est une mesure de la stabilité transversale initiale du navire. Plus il est grand, plus le navire est stable.

Le bras de levier de redressement (GZ) est la distance horizontale entre le centre de gravité et la ligne verticale passant par le centre de poussée latérale. Il est une mesure de la force qui tend à ramener le navire à sa position droite. Plus il est grand, plus le navire résiste à l'inclinaison.

La courbe des bras de levier (GZ) est une représentation graphique des valeurs de GZ en fonction des angles d'inclinaison. Elle permet d'évaluer la stabilité transversale à différents angles et de déterminer les angles limites au-delà desquels le navire n'est plus stable.

ii. Effet de la surface libre sur le bras de levier métacentrique :

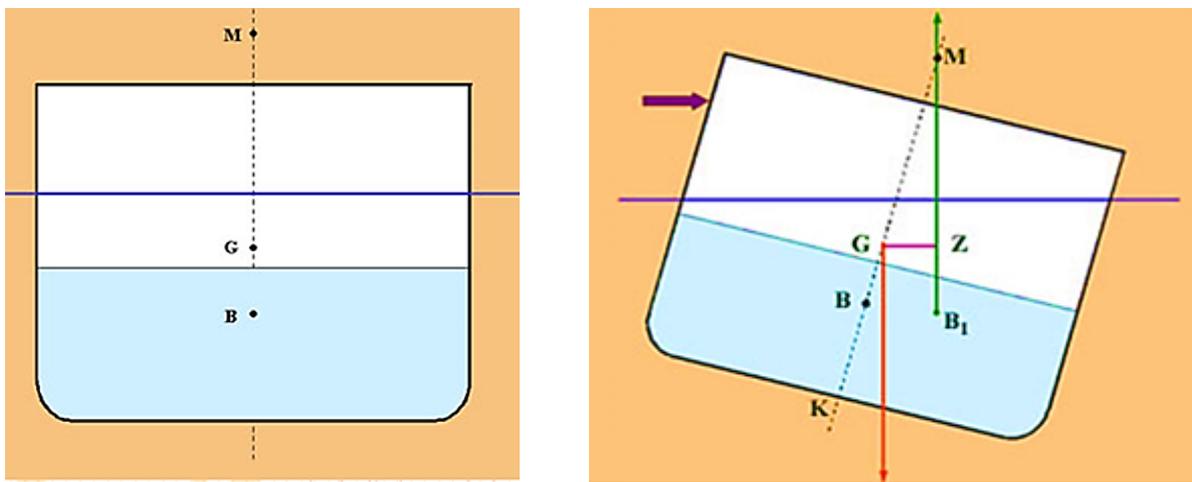
Lorsqu'un réservoir partiellement rempli se trouve à bord d'un navire, le liquide qu'il contient a également un centre de gravité (g) et un centre de carène (b). Si le liquide est gelé ou fixé par des cloisons étanches, il se comporte comme une masse solide et son centre de gravité ne bouge pas lorsque le navire s'incline. Par conséquent, il n'y a pas d'effet sur le bras de levier métacentrique (GM).

Par contre, si le liquide est libre de se déplacer, il suit l'inclinaison du navire et son centre de gravité se déplace vers le bas du côté immergé. Cela entraîne un déplacement du centre de gravité du navire (G) dans la même direction et parallèlement au déplacement du liquide (GG_1). Par conséquent, il y a une réduction du bras de levier métacentrique (GM).

La surface libre influence le bras de levier métacentrique d'un navire. Lorsqu'un navire comporte un réservoir partiellement rempli, le liquide contenu possède son propre centre de gravité (g) et centre de carène (b). Si ce liquide est fixé par des cloisons étanches ou est à l'état gelé, il se comportera comme une masse solide et son centre de gravité ne bougera pas lorsque le navire roulera. Dans ces conditions, il n'y aura pas d'effet sur le bras de levier métacentrique (GM). Par contre, si le liquide est libre de se déplacer, il suivra l'inclinaison du navire, entraînant un déplacement du centre de gravité du navire dans la même direction et de manière parallèle (GG_1), provoquant une réduction du bras de levier métacentrique (GM).

Les figures 10.1 et 10.2 illustrent respectivement l'impact de l'état du liquide (gelé vs libre) sur le centre de gravité du navire et sur les bras de levier métacentrique et de redressement dans les positions droite et inclinée du navire.

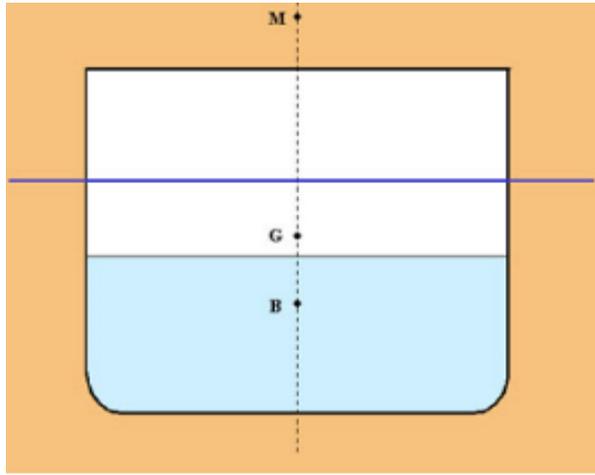
Figure 10.1 représente l'effet d'un liquide gelé sur le centre de gravité du navire en position droite et inclinée. Lorsque le liquide est gelé, le centre de gravité du navire (G) ne change pas de position.



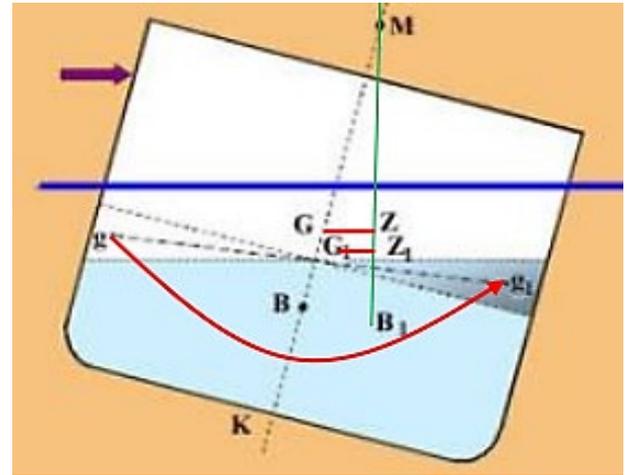
(1) Position droite du navire avec liquide gelé dans le réservoir (2) Position inclinée du navire avec liquide gelé dans le réservoir

Figure 10.1. Effet du liquide gelé sur le centre de gravité du navire dans la position droite et inclinée

Figure 10.2 montre l'impact du liquide libre sur les bras de levier métacentrique et de redressement en position droite et inclinée. On peut constater que le bras de levier métacentrique (GM) reste le même dans les deux positions lorsque le navire est à l'aplomb, mais diminue lorsque le navire est incliné avec le liquide libre. De même, le bras de levier de redressement (GZ) est plus faible avec le liquide libre qu'avec le liquide gelé. Cela implique que le navire est moins stable et a plus de difficulté à retrouver sa position verticale.



(1) Position droite du navire avec liquide libre dans le réservoir



(2) Position inclinée du navire avec liquide libre dans le réservoir

Figure 10.2. Effet du liquide libre sur le bras de levier métacentrique et de redressement dans la position droite et inclinée

La figure 10.3 présente une représentation schématique de la réduction du bras de levier de redressement causée par l'effet de la surface libre. En particulier, elle illustre la transition de GZ à G_1Z_1 , symbolisant une diminution du bras de levier de redressement. Ce phénomène peut être envisagé comme le contraste entre deux états distincts : le bras de levier métacentrique à l'état solide (GM_{solide}) et le bras de levier métacentrique à l'état fluide (GM_{fluide}).

Donc :

GM est appelé le GM_{solide} .

G_vM est appelé le GM_{fluide} ou $GM_{effectif}$.

Il est crucial de toujours déterminer le GM_{fluide} pour prendre en compte la réduction des valeurs GZ résultant du déplacement du liquide à l'intérieur du navire lorsqu'il est incliné (quand il prend du gîte).

L'effet de la surface libre est essentiellement associé au déplacement du liquide dans un réservoir. Ce mouvement induit une modification apparente du centre de gravité de G à G_v , que nous pourrions interpréter comme une "élévation virtuelle". Il est important de souligner que cette "élévation" est virtuelle, ce qui signifie que bien que G ne se déplace pas physiquement, le mouvement du liquide crée une dynamique similaire à ce qui se serait produit si G s'était déplacé.

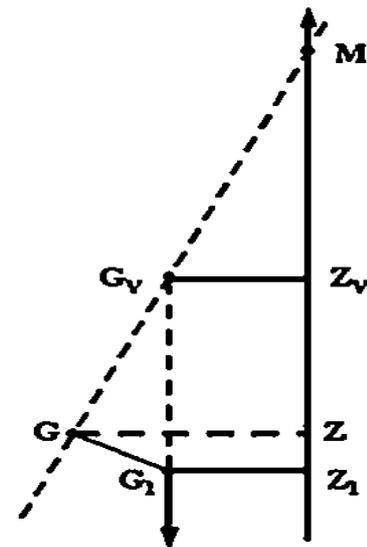


Figure 10.3. Réduction du bras de levier de redressement à cause de l'effet de la surface libre

Lors de l'évaluation de la stabilité d'un navire, ces effets de surface libre sont à ne pas négliger. En effet, lorsque le navire est en mouvement, le liquide à l'intérieur des réservoirs se déplace également, influençant les valeurs de GZ . Pour prendre en compte cette influence, c'est le bras de levier métacentrique à l'état fluide (GM_{fluide}) qui doit être considéré dans le calcul de la stabilité.

Lorsque le navire revient à sa position verticale, le centre de gravité (G_1) revient à sa position d'origine en G , en même temps que le liquide retrouve son niveau initial dans le réservoir. Il est essentiel de rappeler que malgré ces dynamiques, G ne se déplace pas physiquement vers G_V . La compréhension de ces phénomènes et de l'influence de la surface libre sur la stabilité transversale d'un navire est donc primordiale pour une gestion efficace des risques liés à la stabilité du navire.

A noter que G ne se déplace pas physiquement vers G_V , mais l'effet de la surface libre crée une dynamique similaire à un tel déplacement.

10.2. Effet de surface libre dans un réservoir rectangulaire

Le mouvement du liquide dans un réservoir ou un compartiment à bord d'un navire peut influencer la stabilité du navire lorsqu'il roule ou tangue. Ce phénomène est appelé effet de surface libre.

Pour un réservoir rectangulaire, on peut calculer l'effet de surface libre avec la formule suivante :

$$GG_V = \frac{LB^3}{12V} \frac{d_t}{d_s} \quad (10.1)$$

Où :

- GG_V est l'augmentation virtuelle du centre de gravité du navire (G) due au volume (V) du réservoir.
- L et B sont la longueur et la largeur du réservoir.
- V est le volume de déplacement du navire.
- d_t est la densité du liquide dans le réservoir.
- d_s est la densité de l'eau de mer (environ 1.025 t/m^3).

Si nous voulons exprimer la formule en termes du poids du navire (W), plutôt que de son volume de déplacement, nous pouvons utiliser la formule suivante :

$$GG_V = \frac{LB^3}{12W} \times d_t \quad (10.2)$$

Où :

- W est le poids du navire, qui est égal au volume de déplacement du navire multiplié par la densité de l'eau de mer ($W = V \times d_s$).

Exemple : Un réservoir rectangulaire a les dimensions suivantes : $L=10 \text{ m}$, $B=5 \text{ m}$. Le réservoir contient un liquide de densité 0.9 t/m^3 , et le navire a un volume de déplacement de 20000 m^3 .

En utilisant l'équation (10.1), nous avons :

$$GG_V = \frac{10 \text{ m} \times (5 \text{ m})^3}{12 \times 20000 \text{ t}} \times \frac{0.9 \text{ t/m}^3}{1.025 \text{ t/m}^3}$$

$$GG_V = 0.0046 \text{ m}$$

Ainsi, dans cet exemple, l'effet de surface libre fait monter virtuellement le centre de gravité G de 0.0046 m .

10.3. Moments de surface libre

Définition : Le moment de la surface libre est une mesure qui caractérise la géométrie d'une section, et est défini par rapport à un axe ou un point. Il est exprimé dans le système international en m^4 . Le moment de la surface libre est défini par rapport à son axe d'inclinaison.

Le moment d'inertie (I), aussi appelé le second moment de la surface libre du liquide dans un réservoir rectangulaire, peut être calculé avec l'équation suivante :

$$I = \frac{LB^3}{12} \quad (m^4) \quad (10.3)$$

Si la valeur de I est multipliée par la densité du liquide, donc la valeur du moment de surface libre (*Free surface moments, FSM*) en (t.m) est obtenue :

$$FMS = \frac{LB^3 dt}{12} \quad (t.m) \quad (10.4)$$

Où :

FSM est le moment de surface libre du liquide dans le réservoir.

I est le moment d'inertie du liquide dans le réservoir.

dt est la densité du liquide dans le réservoir.

Exemple : En utilisant les mêmes valeurs que dans l'exemple précédent :

Nous avons les valeurs suivantes :

Longueur (L) = 10 m,

Largeur (B) = 5 m,

Densité du liquide (dt) = 0.9 t/m³.

En utilisant l'équation (10.3), nous calculons le moment d'inertie :

$$I = 10 \text{ m} \times (5 \text{ m})^3 / 12 = 520.83333 \text{ m}^4$$

Ensuite, en utilisant l'équation (10.4), nous calculons le moment de surface libre :

$$FSM = 10 \text{ m} \times (5 \text{ m})^3 \times 0.9 \text{ t/m}^3 / 12 = 937.5 \text{ t.m}$$

Cela signifie que le moment de surface libre du liquide dans le réservoir est de 937.5 t.m.

En utilisant l'équation (10.1) de l'effet de la surface libre, nous avons :

$$GG_V = \frac{FMS}{W} \quad (10.5)$$

Où :

- W est le poids du navire.

Supposons que W = 20,000 t.

Pour estimer l'impact sur le centre de gravité du navire, nous utilisons l'équation de l'effet de surface libre pour calculer GG_V :

$$GG_V = 937.5 \text{ t.m} / 20,000 \text{ t} = 0.046875 \text{ m.}$$

$$GG_V = 0.04687 \text{ m}$$

Cela signifie que l'effet de surface libre fait monter virtuellement le centre de gravité G de 0.04687 m. Et enfin, on obtient le nouveau centre de gravité en tenant compte des moments de surface libre :

$$KG_{\text{final}} = KG_{\text{initial}} + GG_V = KG_{\text{initial}} + \frac{FMS}{W} \quad (10.6)$$

Où :

- KG_{final} est le nouveau centre de gravité du navire.
- KG_{initial} est le centre de gravité initial du navire.

Avec les mêmes valeurs que l'exemple précédent si on suppose que KG_{initial} est égal à 5 m, on a :

$$KG_{\text{final}} = 5.046875 \text{ m}$$

Cela signifie que le nouveau centre de gravité du navire est plus élevé que le centre de gravité initial, ce qui réduit la stabilité du navire.

On peut conclure que plus les moments de surface libre sont élevés, plus le KG effectif augmente et plus le GM diminue (GG_V).

Pour calculer le GM effectif, on doit prendre en compte les surfaces libres en ajoutant les FSMs à la table KG.

Exemple illustratif : Évaluation de la stabilité d'un navire

Considérons un scénario pratique pour comprendre de manière approfondie ces concepts. Imaginons un navire dont le déplacement initial est de 10500 tonnes et le KG (Centre de Gravité par rapport à la Quille) est de 7,60 mètres.

Ce navire possède un réservoir de cargaison d'huile de forme rectangulaire, avec une longueur (L) de 30 mètres et une largeur (B) de 20 mètres. Le réservoir est partiellement rempli avec 9600 tonnes d'huile ayant une densité relative (RD) de 0,86. Le KG de l'huile est donné comme 8,00 mètres. Notre objectif est de calculer le GM effectif (Métacentre par rapport au Centre de Gravité) en supposant que le KM (Métacentre par rapport à la Quille) pour le déplacement final est de 8,80 mètres.

Étapes de résolution :

1. Détermination du KG final sans considérer l'effet de la surface libre :

Pour ce faire, nous multiplions le poids de chaque composant (navire et cargaison d'huile) par son KG respectif pour obtenir les moments par rapport à la quille. Le tableau ci-dessous présente ces calculs :

Composant	Poids (t)	KG (m)	Moments (t.m)
Navire (initial)	10500	7.60	79800
Huile de cargaison	9600	8.00	76800
Total	20100	KGf = 7.791	156600

Le KG final est ensuite obtenu en divisant la somme des moments par le poids total :

$$KG_f = \text{Somme des moments} / \text{Poids total}$$

$$KG_f = 156600 \text{ t.m} / 20100 \text{ t} \\ = \mathbf{7.791 \text{ m}}$$

2. Calcul de l'effet de la surface libre (GG_V) :

Utilisons la formule (10.2) de l'effet de la surface libre pour obtenir GG_V :

$$GG_V = \frac{L \times B^3}{12 \times \text{déplacement final}} d_t$$

$$GG_V = 0.856 \text{ m}$$

3. Détermination du GM solide et du GM fluide :

Rappel : La hauteur métacentrique (GM) peut être déterminée par $GM = KM - KG$, où KM est la hauteur du métacentre au-dessus de la quille et KG est la hauteur du centre de gravité au-dessus de la quille. Cette formule est la base du calcul de GM.

L'Effet de Surface Libre (ESL, ou en anglais, Free Surface Effect) se produit lorsqu'un liquide est autorisé à se déplacer librement dans un réservoir à l'intérieur d'un navire. Cela peut déplacer le centre de gravité du navire et réduire sa stabilité. Pour prendre en compte cet effet, on soustrait l'ESL du GM solide (GM_S) pour obtenir le GM fluide (GM_f). C'est la base de la formule $GM_f = GM_S - GG_V$.

Commencez par calculer le GM solide (GM_S) en soustrayant le KG solide du KM :

$$GM_S = KM - KG_f$$

$$GM_S = 8.800 \text{ m} - 7.791 \text{ m} = 1.009 \text{ m}$$

Pour obtenir le GM fluide (GM_f), soustrayons l'effet de la surface libre (GG_V) du GM solide (GM_S) :

$$GM_f = GM_S - GG_V$$

En insérant les valeurs dans la formule :

Description	Notation	Valeur (m)
GM solide (avant ESL)	GM_S	1.009
Effet de Surface Libre	GG_V	0.856
GM fluide (après ESL)	$GM_f = GM_S - GG_V$	0.153

Le GM fluide est donc de 0.153 m. C'est une mesure ajustée de la stabilité du navire, qui prend en compte le mouvement du liquide dans le réservoir. Un GM_f relativement petit pourrait indiquer un problème de stabilité qui nécessite une gestion adéquate.

Interprétation des résultats :

La valeur de GM indique le degré de stabilité du navire. Plus cette valeur est grande, plus le navire est stable. Dans notre cas, nous avons calculé une valeur de GM fluide de 0.153 mètres. Cela peut sembler assez petit, et dans la pratique, il est probable que des mesures soient nécessaires pour augmenter cette valeur et améliorer la stabilité du navire.

Il est crucial de noter que l'effet de surface libre réduit toujours la stabilité du navire. C'est pourquoi les réservoirs doivent généralement être pleins ou vides pour minimiser cet effet. Si un réservoir doit être partiellement rempli, le volume du réservoir, et donc l'effet de surface libre, devrait être aussi petit que possible.

10.4. Représentation des données de surface libre dans les tables de jaugeage

Dans les tables de jauge (sounding) ou d'ullage (creux)¹ des réservoirs du navire, les données relatives à l'effet de surface libre, nécessaires pour calculer les valeurs effectives de KG et GM du navire, peuvent être intégrées de la manière suivante :

Pour illustrer cela, considérons un extrait hypothétique d'une table suivante de jauge de réservoir, avec les en-têtes de colonne suivants :

Supposons un navire de 5400t avec un KG de 7.860m. Le réservoir d'huile de cargaison N°2 à tribord est rempli à 150 cm avec de l'huile de cargaison ayant une densité relative (RD) de 0,740. Nous sommes chargés de calculer le KG effectif et le GM final si le KM pour la condition finale est 8.000m, en utilisant les données de la table de jauge.

N.B : Les moments de surface libre (FSMs) en t.m sont tabulés pour une densité de liquide présumée de 0,740 t/m3.

Tank:	2CO.Stbd	Cargo Oil Density:	0.740		
Sounding (cms)	Weight (tonnes)	LCG (m foap)	TCG (m)	VCG (m)	FSM's (t-m)
0	0.00	78.145	0.063s	1.503	0.0
25	13.00	78.29	2.963s	1.656	269.6
50	30.83	78.345	3.242s	1.785	300.3
75	49.31	78.366	3.365s	1.914	333.3
100	68.44	78.379	3.457s	2.044	368.2
125	87.92	78.389	3.525s	2.174	370.9
150	107.46	78.398	3.569s	2.302	373.7
175	127.05	78.406	3.602s	2.430	376.5
200	146.70	78.414	3.628s	2.557	379.3
225	166.41	78.421	3.648s	2.684	382.1

Solution :

Calculer le KG effectif final et ensuite le GM effectif final

	Poids (t)	KG(m)	Moments (t-m)
Navire (+)	5400.00	7.860	42444.00
Huile de cargaison	107.46	2.302	247.40
FSM			373.7
Final	5507.46	7.819	43065.1

KM	8.000
KG Fluide	7.819
GM Fluide	0.181

¹ Jauge (sounding en anglais) : Mesure de la hauteur du liquide dans un réservoir.

Creux (ullage en anglais) : L'espace non occupé dans un réservoir au-dessus du liquide, ou la distance entre la surface du liquide et le sommet du réservoir.

Les moments de surface libre (FSMs) in t-m sont tabulés pour une densité de liquide supposée de 0,740 t/m³.

Les tables de jauge et de creux sont utilisées pour mesurer la quantité de liquide dans un réservoir et la position verticale de ce liquide dans le navire. Le poids du liquide dans le réservoir est tabulé en relation avec la jauge pour une densité de liquide présumée de 0,740 t/m³. Cependant, si le liquide avait une densité différente de celle présumée et avait été coulé dans le réservoir, les valeurs tabulées des poids et des FSMs seraient erronées. Les valeurs tabulées doivent être corrigées pour la densité appropriée. Les deux masses (poids) et la valeur de la FSM sont directement proportionnelles à la densité. En conclusion, il est crucial de comprendre l'importance de la densité du liquide lors de l'utilisation des tables de jauge et de creux.

10.5. Facteurs influençant l'effet de la surface libre

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'effet de la surface libre sur la stabilité transversale d'un navire. Ces facteurs sont importants à comprendre pour gérer efficacement les risques associés à la surface libre et pour optimiser la stabilité du navire.

1. Volume du réservoir : Un réservoir de plus grand volume aura un effet de surface libre plus important car une plus grande quantité de liquide peut se déplacer librement lors de l'inclinaison du navire.
2. Profondeur du réservoir : Un réservoir plus profond accentuera l'effet de la surface libre. En effet, un réservoir plus profond permet un déplacement plus grand du liquide lors de l'inclinaison du navire, ce qui entraîne un déplacement plus important du centre de gravité.
3. Longueur du réservoir : La longueur du réservoir influence également l'effet de la surface libre. Un réservoir plus long permet un déplacement plus grand du liquide, ce qui accentue le déplacement du centre de gravité.
4. Forme du réservoir : La forme du réservoir peut également avoir un impact. Par exemple, un réservoir de forme irrégulière peut entraîner des mouvements de liquide plus complexes lors de l'inclinaison du navire.
5. Position du réservoir dans le navire : La position du réservoir à bord du navire a également un impact sur l'effet de la surface libre. Un réservoir situé plus haut dans la structure du navire peut provoquer un déplacement plus important du centre de gravité lors de l'inclinaison du navire.
6. Type de liquide : Le type de liquide contenu dans le réservoir peut également influencer l'effet de la surface libre. Par exemple, un liquide plus visqueux peut se déplacer plus lentement et ainsi atténuer l'effet de la surface libre.

Il est crucial de prendre en compte ces facteurs lors de la gestion des réservoirs à bord d'un navire afin de minimiser l'effet de la surface libre et d'optimiser la stabilité du navire.

La Formule 10.2 considère l'effet de la surface libre (FSM) sur la perte de GM (GG_V) :

$$GG_V = \frac{LB^3}{12W} \times d_t$$

La largeur (B) du réservoir est le facteur le plus important dans cette formule. Lorsqu'un réservoir est subdivisé, la perte de GM peut être significativement réduite. Nous allons démontrer cette assertion au travers de trois exemples (a, b, c).

Exemple (a) :

Un navire avec un déplacement de 12 000 tonnes et un KG initial de 7,84m possède un double fond rectangulaire avec les dimensions suivantes : Longueur L: 20m, Largeur B: 15m. Ce double fond est rempli d'eau salée (RD = 1,025) jusqu'à une jauge de 2,00m. Si le KM pour la condition finale est de 8,00m, nous allons calculer le GM effectif final.

Étape 1. Calcul de la masse et du KG de l'eau de ballast :

Masse = Volume x Densité

Masse = (L x B x jauge) x densité Masse = (20 x 15 x 2) x 1.025 = 615.0 t.

Le KG de l'eau de ballast, puisqu'il s'agit d'un double fond, sera la moitié de la jauge :

Kg = 0.5 x 2.0 = 1.00 m.

Étape 2. Calcul du FSM pour la surface libre rectangulaire du liquide :

FSM (t.m) = (LB³ / 12) x dt

FSM (t.m) = ((20 x 15³) / 12) x 1.025 = 5765.6 t.m

Étape 3. En prenant les moments par rapport à la quille, nous calculons le KG final et donc le KM final.

	Poids (t)	KG (m)	Moments (t-m)
Navire	12000.00	7.800	94080.0
Eau salée de ballast	615.00	1.000	615.0
FSMs (+)			5765.6
Final	12615.00	7.964	100460.0

Étape 4 . Calcul du KM et du GM final

KM = 8.000 m

KG du fluide = 7.964 m

GM du fluide = 0.036 m

Il est clair que ce navire ne répond pas au critère réglementaire stipulant que GM ne devrait pas être inférieur à 0.15m (GM > 0.15m).

Exemple (b) :

Nous considérons maintenant le même exemple, mais dans ce cas le réservoir est subdivisé équitablement en deux réservoirs.

La Figure 10.4 illustre cette subdivision : chaque réservoir a une largeur de 7,5 m.

Étape 1. Calcul de la masse et du KG de l'eau de ballast :

Masse = volume x densité

Masse = (L x B x jauge) x densité

Masse = (20 x 15 x 2) x 1.025 = 615.0 t

Ou bien, nous pouvons calculer la masse pour chaque réservoir séparément et ensuite les sommer :

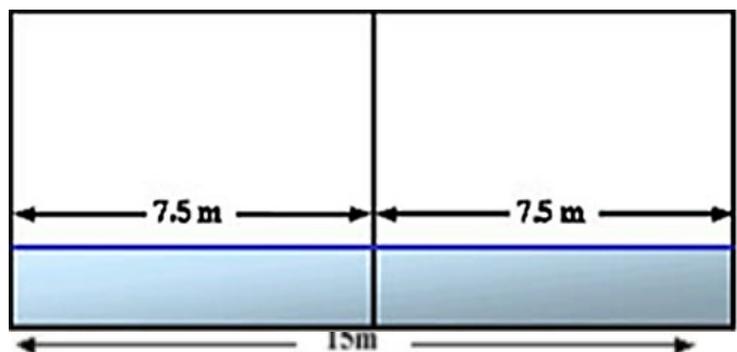


Figure 10.4. Réservoir subdivisé en deux compartiments équitables

- Masse par réservoir = Volume x Densité

$$= (L \times B \times \text{jauge}) \times \text{Densité}$$

$$= (20 \times 5 \times 2) \times 1.025 = 205.0\text{t}$$
- Masse totale = Masse par réservoir x 3 réservoirs

$$= 205.0 \times 3 = 615.0 \text{ t}$$

Comme précédemment, puisqu'il s'agit d'un réservoir à double fond, le Kg de l'eau de ballast sera la moitié de la jauge : $Kg = 0.5 \times 2.0 = 1.00 \text{ m}$

Étape 2 . Calcul des FSM pour chaque réservoir :

$$\text{FSM (t.m)} = ((L \times b^3)/12) \times dt$$

$$\text{FSM (t.m)} = ((20 \times 7.5^3)/12) \times 1.025$$

$$= 720.70 \text{ t.m}$$

$$\text{FSM total} = \text{FSM par réservoir} \times 2 \text{ réservoirs} = 720.70 \times 2 = 1441.40 \text{ t.m}$$

Étape 3. Calcul du KG final et du KM final :

Pour obtenir le KG et le KM final, nous devons d'abord calculer le KG final. Cela se fait en prenant les moments par rapport à la quille pour chaque élément (le navire et l'eau de ballast), et en ajoutant les moments dus aux FSMs (Forces de déplacement libre).

Voici le tableau des moments calculés pour chaque élément :

Élément	Poids (t)	KG (m)	Moments (t-m)
Navire	12000.00	7.800	93600.0
Eau salée de ballast	615.00	1.000	615.0
FSMs (+)			1441.4
Final	12615.00	7.621	96656.4

Après avoir ajouté l'eau de ballast et calculé le nouvel équilibre du navire, nous obtenons les valeurs finales suivantes :

Étape 4. Calcul du KM et du GM final

$$\text{KM} = 8.000 \text{ m}$$

$$\text{KG Fluide} = \mathbf{7.621} \text{ m}$$

$$\text{GM Fluide} = 0.379 \text{ m}$$

En subdivisant le réservoir en deux, on observe une amélioration significative du GM final. Ceci est directement lié à la réduction des moments des surfaces libres :

- Pour le réservoir indivisible, le FSM total était de **5765.6** t-m
- Pour le réservoir subdivisé, le total des FSMs était de 1441.4 t-m

Ainsi, les moments de surface libre ont été réduits à un quart de leur valeur d'origine, ce qui démontre clairement l'efficacité de la subdivision du réservoir pour améliorer la stabilité du navire.

Pour résumer, en subdivisant le réservoir, nous avons réduit les FSM à $5765.6/4 = 1441.4 \text{ t-m}$. Cette amélioration a permis d'accroître la stabilité du navire, rendant ainsi la navigation plus sûre."

Exemple (c)

Reprenons le même exemple, mais cette fois le réservoir est divisé en trois compartiments égaux. La figure 10.5 illustre trois réservoirs de 5 mètres de large chacun.

Le navire a un déplacement de 12 000 tonnes et un KG initial de 7,84 m. Le double fond de forme rectangulaire, subdivisé équitablement en trois compartiments, a les dimensions suivantes :

- Longueur (L) : 20 m,
- Largeur (B) : 15 m,

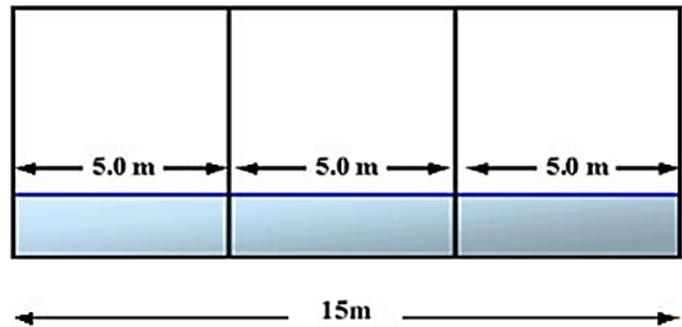


Figure 10.5. Réservoir subdivisé en trois compartiments équitables

Il est rempli d'eau de ballast salée (RD = 1,025), avec une jauge de 2,00 m. Si le KM pour la condition finale est de 8,00 m, nous calculons le GM effectif final.

Étape 1. Calcul de la masse et du Kg de l'eau de ballast:

Masse = Volume x Densité Masse = (L x B x jauge) x densité Masse = (20 x 15 x 2) x 1.025 = 615,0 t

Alternativement, nous pouvons calculer la masse par réservoir:

Masse par réservoir = (L x B x jauge) x densité Masse par réservoir = (20 x 5 x 2) x 1.025 = 205,0 t

Masse totale = 205,0 x 3 réservoirs = 615,0 t

Le Kg de l'eau de ballast sera la moitié de la jauge, soit Kg = 0.5 x 2.0 = 1.00 m.

Étape 2. Calcul des FSMs pour chaque réservoir :

FSM (t.m) = ((L x B³)/12) x dt

FSM (t.m) = ((20 x 5³)/12) x 1.025

FSM (t.m) = 213.542 t.m

Le FSM total sera donc le FSM par réservoir multiplié par le nombre de réservoirs, soit 213.542 x 3 = 640.625 t.m.

Étape 3. Calcul du KG final et du KM final

En prenant les moments par rapport à la quille, nous calculons le KG final et donc le KM final.

Description	Poids (t)	KG (m)	Moments (t-m)
Navire	12000.00	7.800	94080.0
Eau salée de ballast	615.00	1.000	615.0
FSMs (+)	-	-	640.6
Final	12615.00	7.557	95335.6

Étape 4 - Calcul du KM et du GM final

Description	Mesure (m)
KM	8.000
KG Fluide	7.557
GM Fluide	0.443

Après la subdivision du réservoir en trois compartiments, il est évident que le GM final est encore amélioré. C'est le résultat direct de la réduction des moments des surfaces libres :

- Pour le réservoir indivisible, le FSM total était de 5765.6 t.m,
- Pour le réservoir subdivisé, le total des FSMs était de 640.6 t.m.

Les moments de surface libre ont donc été réduits à un neuvième (1/9) de leur valeur d'origine, soit $5765.6/9 = 640.6$ t.m.

Ce processus de subdivision du réservoir améliore considérablement la stabilité du navire en réduisant le moment de la surface libre. Cela démontre l'importance de la conception adéquate des réservoirs et compartiments à bord des navires pour garantir leur stabilité en toutes circonstances.

Conclusion

La subdivision équitable d'un réservoir a un impact significatif sur la gestion de la surface libre, ce qui se répercute directement sur la stabilité du navire. En fonction du nombre de subdivisions dans le réservoir, les effets varient comme suit :

a) Absence de subdivision

Dans le cas où le réservoir n'est pas subdivisé, comme le montre la Figure 10.6, le mouvement de la surface libre en réponse à l'inclinaison du navire n'est pas restreint. Cette liberté de mouvement provoque un moment de surface libre (FSM) important, conduisant à une diminution de la hauteur métacentrique (GM) et, par conséquent, à une baisse de la stabilité du navire. Les conceptions de navires évitent typiquement de telles configurations pour minimiser l'effet de la surface libre.

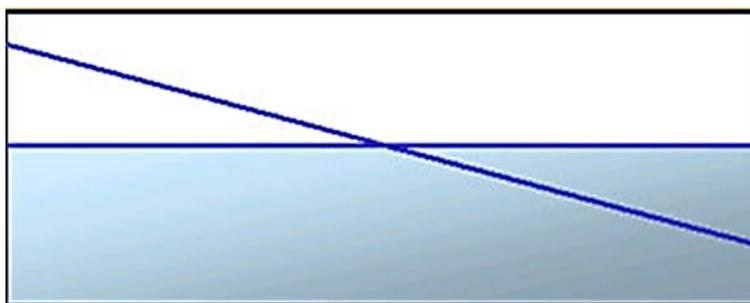


Figure 10.6. Absence de subdivision dans un réservoir

Les conceptions de navires évitent typiquement de telles configurations pour minimiser l'effet de la surface libre.

b) Subdivision unique

Lorsque le réservoir est subdivisé en deux compartiments identiques, comme le montre la Figure 10.7, le mouvement de la surface libre est limité en cas d'inclinaison du navire. En conséquence, le moment de surface libre est réduit, entraînant une perte moindre de GM et une augmentation de la hauteur GM.

Cette subdivision entraîne une réduction de la perte de GM de 1/4 de la valeur initiale du moment de la surface libre. Les constructeurs de navires utilisent souvent cette approche de subdivision pour améliorer la stabilité du navire.

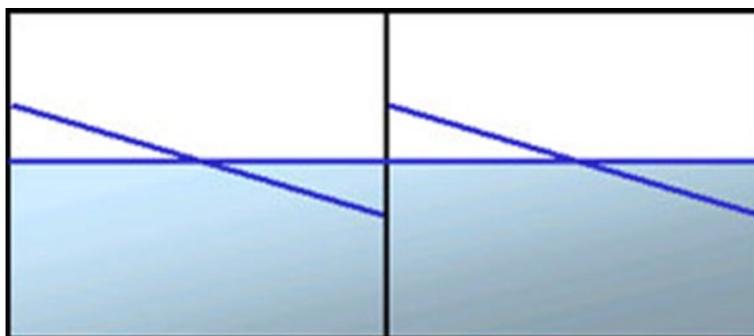


Figure 10.7. Subdivision en Deux Compartiments dans un Réservoir

c) Subdivision du double fond

La subdivision du réservoir en trois compartiments identiques, illustrée par la Figure 10.8, restreint encore davantage le mouvement de la surface libre lors de l'inclinaison du navire. Cela se traduit par une diminution supplémentaire de la perte de GM et une augmentation de la hauteur GM. Cette diminution équivaut à $1/9$ de la valeur initiale du moment de la surface libre. Il est clair que plus le nombre de subdivisions dans un réservoir est élevé, plus la stabilité du navire est améliorée. C'est un concept clé dans la conception des navires pour maximiser la stabilité.

En somme, le moment de surface libre initial et la perte de GM sont réduits par le facteur $1/(n^2)$, où n représente le nombre de compartiments de volumes identiques dans lesquels le réservoir est subdivisé.

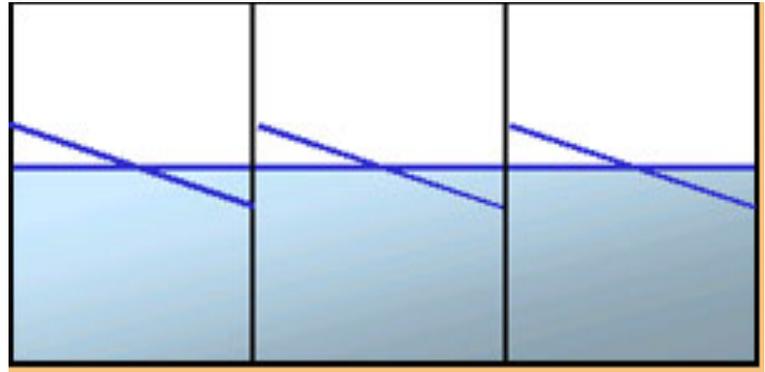


Figure 10.8. Subdivision en trois compartiments dans un réservoir

La Figure 10.9 illustre le plan type d'un réservoir de pétrolier. Dans ce cas, la subdivision est utilisée pour minimiser les effets de la surface libre. C'est une pratique courante dans la conception des navires pour gérer efficacement les effets de la surface libre.

Il est à noter que la densité du liquide dans le réservoir joue un rôle crucial. Plus cette densité est élevée, plus les effets des surfaces libres (FSM) sont prononcés, ce qui entraîne une perte plus importante de GM.

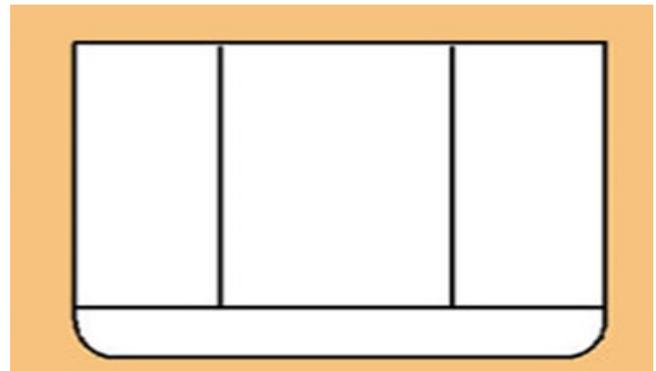


Figure 10.9. Plan d'un réservoir de pétrolier subdivisé minimisant l'effet de surface libre.

Enfin, un aspect essentiel de la conception est qu'un réservoir est considéré comme subdivisé seulement s'il est muni d'une cloison longitudinale étanche à l'huile ou à l'eau, empêchant tout transfert de liquide. Cela implique que toute vanne reliant les réservoirs subdivisés doit pouvoir être fermée complètement. Cette exigence assure que l'effet de la surface libre reste limité à chaque compartiment individuel en cas d'inclinaison du navire. Cette précaution de conception est cruciale pour maintenir la stabilité du navire.

En conclusion, la gestion des surfaces libres grâce à la subdivision des réservoirs est une composante essentielle de la conception des navires pour garantir leur stabilité. En outre, la densité du liquide stocké et la conception des cloisons sont d'autres facteurs clés à prendre en compte pour minimiser l'effet de la surface libre. Cela souligne l'importance de l'ingénierie détaillée et réfléchie dans la construction de navires sûrs et efficaces.

Conclusion

En conclusion, le chapitre 10 a apporté une analyse approfondie de l'effet de la surface libre sur la stabilité des navires, mettant en évidence l'importance cruciale de ce phénomène dans la conception et la gestion des réservoirs. Les informations présentées ont permis de comprendre les calculs et les formules utilisés pour évaluer l'effet de la surface libre, ainsi que les différentes mesures qui peuvent

être prises pour minimiser son impact négatif sur la stabilité du navire.

Les exemples pratiques présentés ont clairement démontré l'effet significatif de la subdivision des réservoirs sur la réduction des moments des surfaces libres et l'amélioration de la stabilité. En subdivisant les réservoirs en compartiments équitables, les navires ont montré une réduction substantielle de la perte de hauteur métacentrique (GM), ce qui a contribué à renforcer leur stabilité globale.

Il convient de souligner que la densité du liquide contenu dans les réservoirs joue un rôle crucial dans l'ampleur de l'effet de la surface libre. Une densité plus élevée accentue cet effet et nécessite une gestion plus attentive pour maintenir la stabilité du navire. De plus, des facteurs tels que la forme du réservoir, sa profondeur, sa longueur et sa position à bord du navire ont également été identifiés comme des éléments qui influencent l'ampleur de l'effet de la surface libre.

Les connaissances acquises dans ce chapitre sont d'une importance capitale pour les concepteurs, les ingénieurs et les professionnels de l'industrie maritime. Une compréhension approfondie de l'effet de la surface libre et des mesures visant à minimiser son impact permet de garantir la stabilité et la sécurité des navires dans des conditions variées. Cela implique la mise en place de conceptions appropriées des réservoirs, incluant la subdivision des compartiments lorsque cela est nécessaire, ainsi que la prise en compte précise de la densité du liquide contenu.

Enfin, ce chapitre a souligné l'importance cruciale de la gestion de l'effet de la surface libre pour assurer la stabilité des navires. Les principes théoriques, les calculs précis et les exemples pratiques ont fourni une base solide pour aborder ce sujet complexe. Grâce à ces connaissances, il est possible de prendre des décisions éclairées lors de la conception, de l'exploitation et de la maintenance des navires, garantissant ainsi leur stabilité optimale et leur sécurité dans toutes les situations.

Chapitre 11

Critères réglementaires sur la stabilité transversale

Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les normes essentielles que tous les navires doivent respecter pour garantir leur stabilité en conformité avec le Code de stabilité intacte (IS Code) de l'Organisation maritime internationale (OMI). Ces normes comprennent des mesures telles que la hauteur métacentrique initiale (GM), la courbe du levier de redressement (GZ), et des critères spécifiques en termes d'énergie.

Le chapitre explore également des critères supplémentaires pour des types spécifiques de navires, tels que les navires transportant des passagers, les navires RO-RO et ceux transportant du bois, chacun présentant ses propres défis uniques en matière de stabilité. Nous aborderons les critères spécifiques à chaque type, y compris le mouvement des foules pour les navires transportant des passagers, le chargement asymétrique et le déplacement des cargaisons pour les navires RO-RO, et le déplacement du bois ainsi que l'effet de surface libre pour les navires transportant du bois.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie de ces critères, en soulignant l'importance cruciale de maintenir la stabilité transversale à l'état intact pour la sécurité globale des opérations maritimes.

11.1. Rappels sur la stabilité des navires

L'étude de la stabilité d'un navire, que ce soit en phase initiale ou lors de grandes inclinaisons, repose sur l'analyse de sa courbe de stabilité. Chaque courbe est spécifique à une condition de chargement donnée, identifiée par un déplacement ainsi qu'un GM ou KG correspondant.

Stabilité initiale : La stabilité initiale d'un navire est signifiée par le GM, avec la condition essentielle pour la stabilité : $GM > 0$. En traçant le centre de carène B (qui varie en fonction de l'inclinaison) pour plusieurs petits angles d'inclinaison, nous obtenons un arc de cercle centré sur le point M : le rayon de ce cercle, BM, est nommé rayon métacentrique.

Le métacentre transversal M se définit comme le point d'intersection des lignes d'action de la poussée d'Archimède lors de petites inclinaisons. La stabilité est dite "initiale" pour ces petits angles d'inclinaison.

Lorsque θ est très petit (jusqu'à $\pm 7^\circ$), nous avons $\sin(\theta) \sim \theta$.

De ce fait, $GM = GZ \cdot \theta$ (également connu sous le nom de module de stabilité initiale = G_0M).

GM est un critère de stabilité du navire, mais seulement pour un angle d'inclinaison θ inférieur à $\pm 7^\circ$.

Stabilité aux Grandes Inclinaisons : La compréhension de la stabilité du navire lors de grandes inclinaisons est fondamentale. Un navire ayant un GM initial satisfaisant ($GM > 0,15$) n'est pas nécessairement "sûr" lors de grandes inclinaisons.

Dans ce cas, la ligne d'action de la poussée d'Archimède ne passe plus par le métacentre M. On utilise les courbes pantocarènes (cross curves), qui indiquent la distance KN entre la ligne d'action de la poussée d'Archimède et la quille, en fonction de l'inclinaison et du déplacement du navire, comme le montre la figure 11.1. Ainsi, nous avons :

$GZ =$ bras de levier du couple de stabilité à un angle θ

$$GZ = KN - KX$$

Dans le triangle rectangle GKX : $KX = KG \sin \theta$ et $GZ = KN - KG \sin \theta$

Les manuels de stabilité des navires modernes présentent désormais des "tables KN" plutôt que les courbes pantocarènes.

Une autre donnée importante est l'aire sous la courbe de stabilité (GZ), qui fournit également des informations sur la stabilité des navires.

La figure 11.1 illustre KN lors de grandes inclinaisons. Le bras de levier du couple de stabilité à un angle

θ est donné par $GZ = KN - KX$, où $KX = KG \sin \theta$.

Les tables KN, fournies par le fabricant du navire, permettent de déterminer aisément KN.

Enfin, la courbe est tracée pour contrôler la conformité aux critères de stabilité, en utilisant la formule de Simpson. L'aire sous la courbe GZ est calculée comme suit :

$$\text{Aire } ((\theta_0 - \theta_2) = h [f(\theta_0) + 4 f(\theta_1) + f(\theta_2)] / 3$$

Cela implique que l'aire sous la courbe GZ entre deux angles θ_0 et θ_2 est égale à un tiers de la hauteur multipliée par la somme de la fonction de stabilité en θ_0 , quatre fois la fonction de stabilité en θ_1 (l'angle médian), et la fonction de stabilité en θ_2 . Cette formule nous donne une estimation de l'aire sous la courbe GZ , qui est un indicateur clé de la stabilité du navire lors de grandes inclinaisons.

Le tableau suivant donne un exemple de la façon dont ces valeurs peuvent être calculées pour différents angles :

Angle (θ)	0	10	20	30	45	60	75
Sin θ	0						
KG.Sin(θ)	0						
KN	0						
GZ	0						

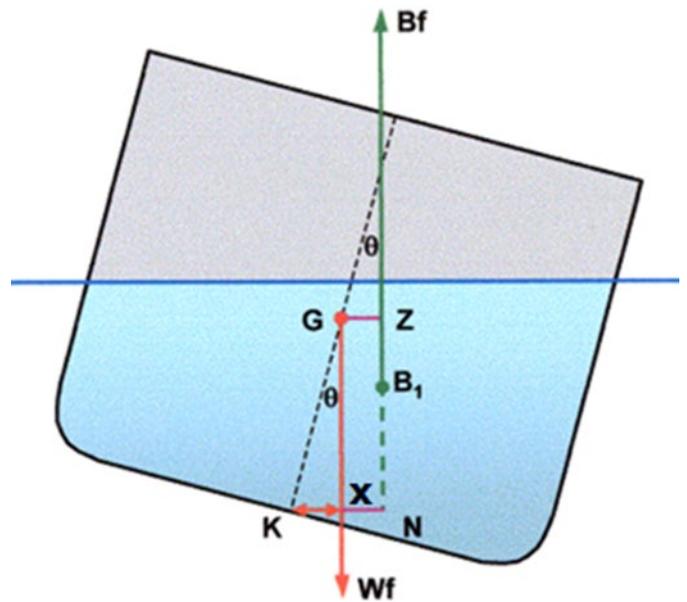


Figure 11.1. Visualisation de KN Dans le cas des grandes inclinaisons

Pour chaque angle, nous calculons Sin θ , $KG \cdot \sin(\theta)$;

KN (à partir des tables KN fournies par le constructeur), et enfin GZ en utilisant la formule

$$GZ = KN - KG \sin \theta.$$

La formule de Simpson est utilisée pour estimer l'aire sous la courbe de stabilité du navire comme illustré par la figure 11.2.

Elle est très utile pour vérifier si le navire répond aux critères de stabilité, en particulier lors de grandes inclinaisons. Voici la formule de Simpson:

$$\text{Aire } (\theta_2 - \theta_0) = h [f(\theta_0) + 4 f(\theta_1) + f(\theta_2)] / 3$$

Cette formule s'applique lorsque la différence entre chaque paire d'angles successifs est constante et égale à h, c'est-à-dire lorsque :

$$(\theta_2 - \theta_1) = (\theta_1 - \theta_0) = h.$$

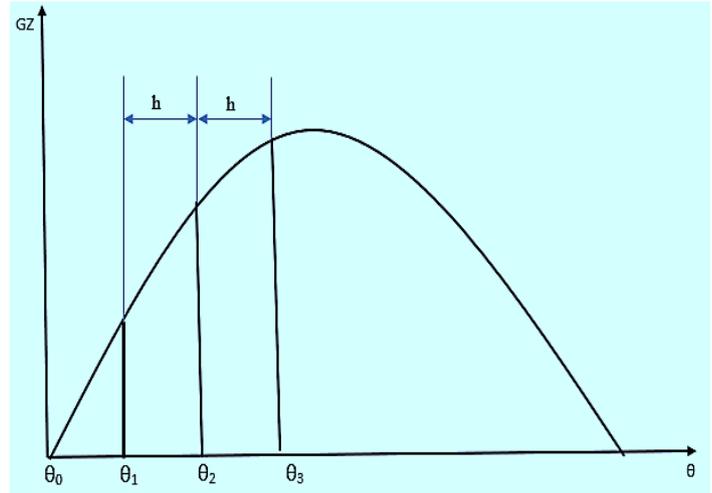


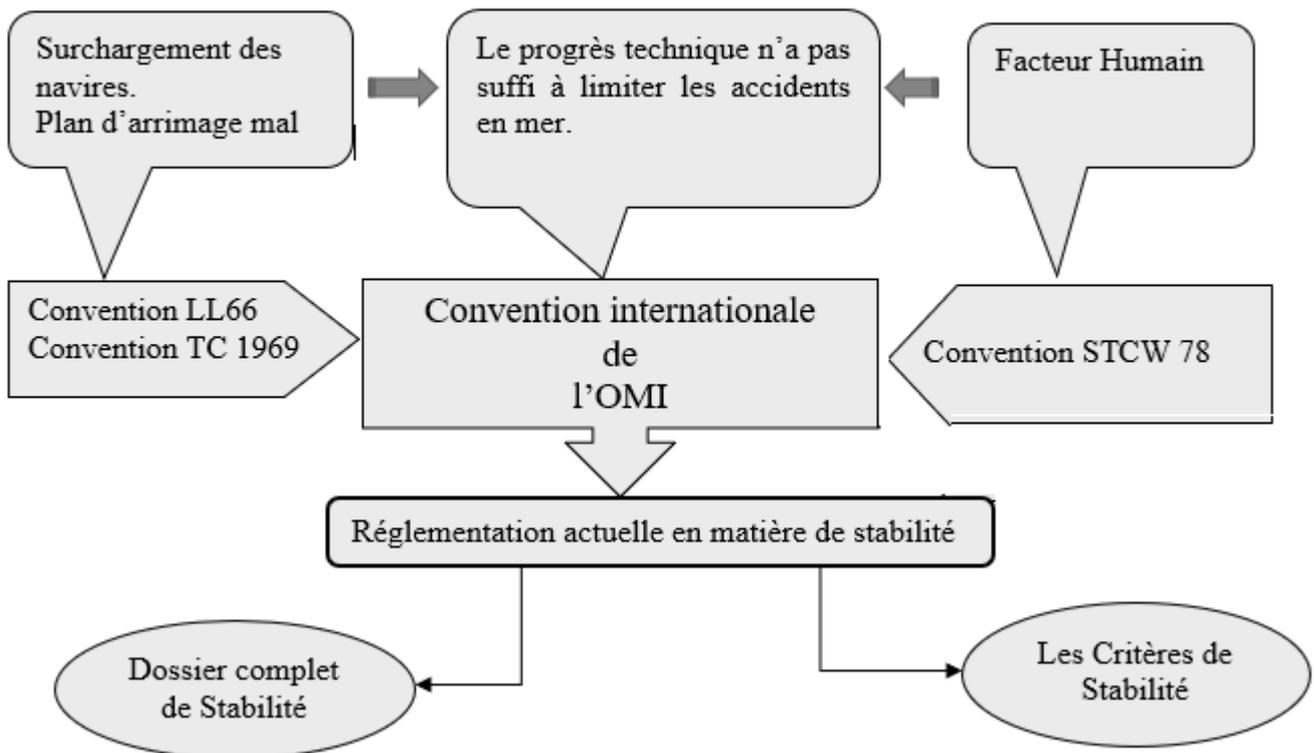
Figure 11.2. Courbe de stabilité (bras de levier GZ)

Ces valeurs nous permettent de dessiner la courbe de stabilité et de vérifier si le navire respecte les critères de stabilité.

Rappels

- ☞ L'analyse de la courbe de stabilité (initiale ou grandes inclinaisons) détermine la stabilité du navire.
- ☞ Chaque courbe correspond à une seule condition de chargement (déplacement et GM ou KG correspondant)

? Que prévoit la réglementation pour assurer la stabilité des navires ?



11.2. Critères de Stabilité selon le Code de stabilité intacte (IS Code), 2008

L'analyse de la stabilité des navires est un processus complexe qui implique un mélange de mesures empiriques, de tests physiques et d'études théoriques. Les ingénieurs navals développent des modèles de stabilité détaillés pour chaque navire, qui sont ensuite soumis à une série de tests rigoureux pour vérifier leur conformité aux normes de sécurité maritime.

Au fil des ans, diverses résolutions de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) ont été promulguées pour réglementer et standardiser les critères de stabilité. La première résolution significative dans ce domaine a été la résolution A.167, qui a été ensuite modifiée par la résolution A.206(IV). Plus tard, la résolution A.562(14) a apporté d'autres améliorations à ces critères.

Finalement, en réponse à l'évolution de la technologie navale et à l'accumulation de données empiriques, l'OMI a adopté le Code de stabilité intacte, 2008 (IS Code), intégré dans la résolution A.749(18). Ce Code représente est le fruit de décennies de recherche et d'innovation dans le domaine de la stabilité des navires. Il définit les critères actuels de stabilité transversale à l'état intact, offrant un cadre réglementaire robuste pour évaluer la stabilité des navires.

La section suivante se penchera sur les détails de ces critères, en expliquant comment ils sont appliqués et comment ils contribuent à la sécurité générale en mer.

11.2.1. Critères généraux de stabilité pour tous types de navires

Le Code international sur la stabilité intacte (IS Code) de 2008, développé par l'Organisation maritime internationale (OMI), établit une série de critères de stabilité pour garantir la sûreté des navires en mer. Ces critères, adaptés à différents types de navires, permettent de vérifier la stabilité transversale à l'état intact des navires.

1. Aire (0 – 30°) : L'aire sous la courbe des bras de levier de redressement GZ doit être égale ou supérieure à 0.055 m.rad = 3.151 m.deg.

Ce critère est une mesure essentielle de la stabilité de tous les navires, en se basant sur l'aire sous la courbe de bras de levier de redressement (GZ) entre 0 et 30 degrés d'inclinaison.

Dans cette évaluation, l'aire (représentée en rouge sur la Figure 11.3.) doit être au moins de 0,055 m.rad. Cette aire témoigne de l'énergie de redressement du navire disponible pour contrer les forces de chavirement dans cet intervalle d'inclinaison.

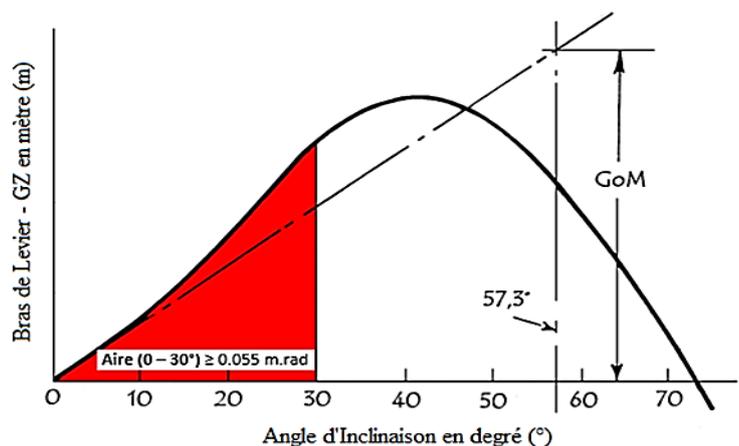


Figure 11.3. Énergie de Redressement entre 0 et 30°

Si cette valeur minimale n'est pas atteinte, cela indique un risque potentiel pour la stabilité du navire. En effet, sa capacité à se redresser rapidement et efficacement face aux forces de chavirement peut être insuffisante. Cette mesure est donc cruciale pour garantir la sécurité en mer.

- 2. Aire (0 – 40°) ou (0 – Θ_f) :** L'aire sous la courbe GZ doit être égale ou supérieure à 0.09 m.rad. Θ_f fait référence à l'angle d'envahissement, qui est l'angle d'inclinaison à partir duquel l'eau peut pénétrer à l'intérieur du navire à travers certaines ouvertures.

Ce critère analyse l'énergie de redressement du navire, visualisée par l'aire colorée en rouge sous la courbe du bras de levier de redressement (GZ) entre 0 et 40 degrés sur la Figure 11.4. Cette aire doit être au moins de 0,09 m.rad, signifiant que le navire doit posséder une capacité de redressement suffisante jusqu'à un angle d'inclinaison de 40 degrés.

Cependant, pour certains navires, où les ouvertures (comme les écoutilles, les ventilations, etc.) sont positionnées assez bas sur le côté du navire, l'angle d'envahissement peut être inférieur à 40 degrés. Dans cette situation, l'eau pourrait commencer à pénétrer à l'intérieur du navire à un angle d'inclinaison moindre, exacerbant potentiellement la situation d'inclinaison en ajoutant le poids de l'eau de mer entrante.

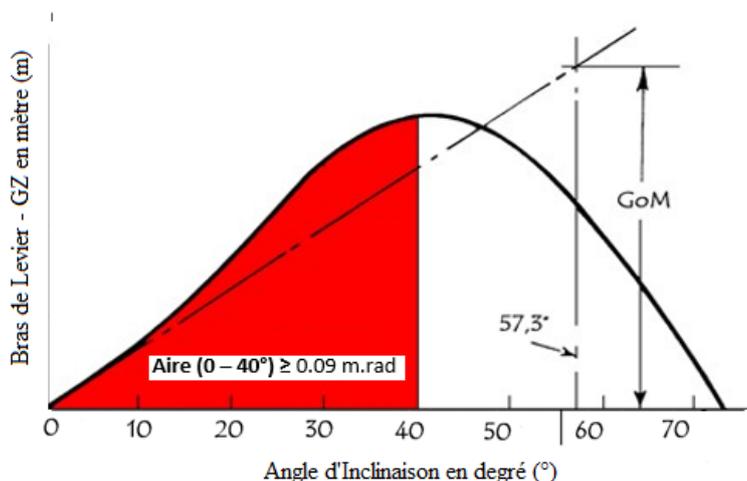


Figure 11.4. Énergie de Redressement (0 - 40°)

Dans ce cas, c'est l'aire sous la courbe GZ entre 0 et cet angle d'envahissement inférieur qui est analysée, et non celle entre 0 et 40 degrés. Cette aire devrait toujours être au moins de 0,09 m.rad pour que le navire réponde au critère de stabilité.

- 3. Aire (30° – 40°) :** L'aire sous la courbe GZ entre 30 et 40 degrés d'inclinaison doit être égale ou supérieure à 0.03 m.rad.

Ce critère, contrairement aux deux premiers critères, cible une plage d'inclinaison particulière : 30 à 40 degrés. C'est un intervalle où le navire peut être soumis à des forces de renversement considérables en raison d'une mer agitée, d'une charge mal répartie ou de mouvements de roulis prononcés.

La différence majeure avec les deux premiers critères réside dans la zone d'intérêt spécifique. Les critères 1 et 2 se concentrent sur des plages d'angles plus larges, qui couvrent des conditions de navigation plus générales. Le critère 1 assure que le navire dispose d'une énergie de redressement adéquate pour des inclinaisons allant jusqu'à 30 degrés. Le critère 2 étend cette vérification à 40 degrés ou jusqu'à l'angle d'envahissement.

Cependant, le critère 3 est conçu pour évaluer la stabilité du navire dans des situations plus extrêmes. Lorsque le navire atteint des inclinaisons de 30 à 40 degrés, la stabilité devient plus critique. Dans cette plage d'inclinaison, les forces de redressement du navire sont testées de manière plus intensive. Si l'aire sous la courbe de bras de levier de redressement (GZ) entre 30 et 40 degrés est supérieure ou égale à 0,03 m.rad, cela indique que le navire dispose de suffisamment d'énergie de redressement pour contrer les forces de renversement et revenir à une position plus stable.

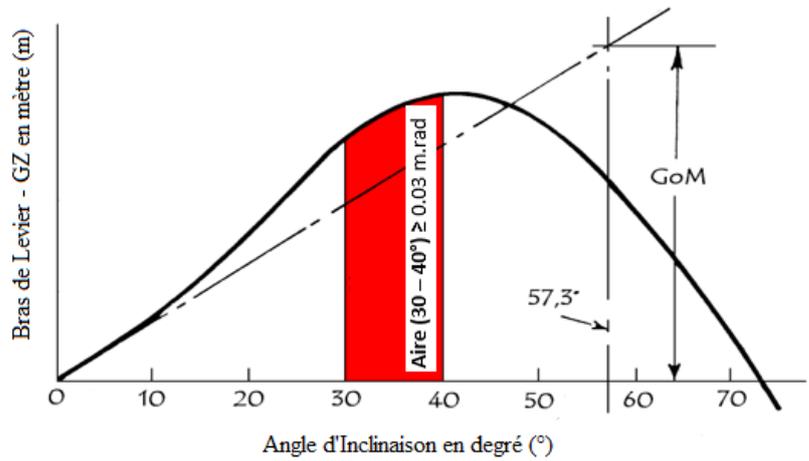


Figure 11.5. Énergie de Redressement (30 - 40°)

Ainsi, le critère 3 est spécifiquement conçu pour évaluer la robustesse de la stabilité du navire dans des conditions potentiellement plus difficiles et plus dangereuses que celles envisagées par les critères 1 et 2. Cela permet de garantir la sécurité du navire et de l'équipage dans une gamme plus large de conditions opérationnelles.



Note importante : L'évaluation précise de l'aire sous la courbe GZ, nécessaire pour le respect des critères de stabilité, repose sur des données spécifiques concernant la forme et les caractéristiques du navire. Ces informations essentielles sont généralement fournies par le constructeur du navire ou obtenues à travers des tests de stabilité dédiés. Elles sont fondamentales pour une estimation correcte de la stabilité du navire, conformément au Code IS de l'OMI."

4. Valeur de GZ à 30° : Le bras de levier du couple de redressement GZ doit être égal ou supérieur à 0.20 m pour un angle d'inclinaison de 30°.

Ce critère, qui est illustré par la Figure 11.6, est centré spécifiquement sur la valeur du bras de levier du couple de redressement (GZ) à un angle d'inclinaison spécifique de 30°. Selon les normes établies par le Code IS, cette valeur de GZ doit être au moins équivalente à 0,20 m à cet angle d'inclinaison spécifique.

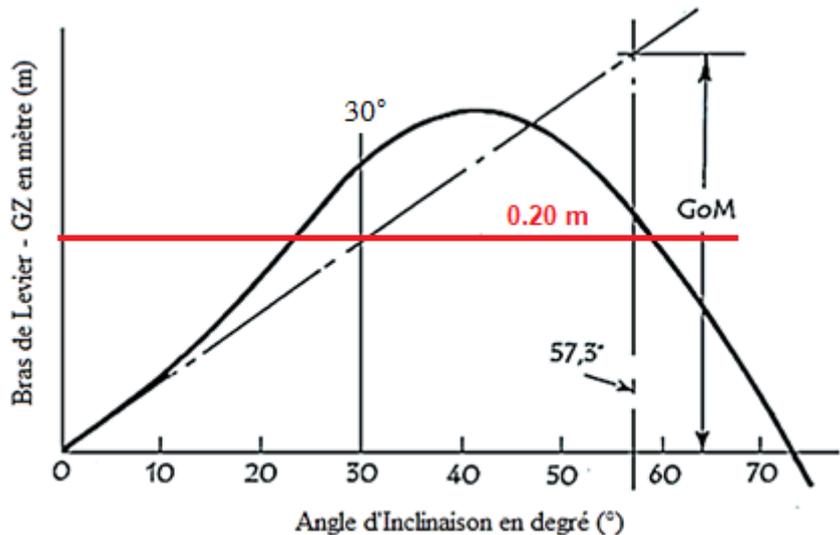


Figure 11.6. Valeur de GZ à 30° ≥ 0.20 m

Le bras de levier GZ est une mesure de la capacité d'un navire à se redresser :

une valeur de GZ plus grande indique que le navire a une plus grande capacité à résister aux forces qui pourraient le renverser. Donc, une valeur élevée de GZ à un angle d'inclinaison de 30° indique une bonne

stabilité du navire dans des conditions modérées de la mer.

Par exemple, si nous prenons en compte un navire qui traverse une zone de mer avec des vagues de taille importante, ces vagues peuvent provoquer une inclinaison significative du navire. Si l'inclinaison atteint 30° , le navire aurait besoin d'un bras de levier de redressement d'au moins 0,20 m pour pouvoir résister efficacement à cette force de renversement et revenir à une position stable. Si la valeur de GZ à cet angle est inférieure à 0,20 m, le navire pourrait avoir des difficultés à se redresser, compromettant ainsi sa sécurité.

En résumé, ce critère garantit que le navire possède une capacité de redressement suffisante lorsqu'il est incliné jusqu'à 30° , ce qui peut arriver dans des conditions de mer plus difficiles. Un navire qui ne satisfait pas à ce critère peut manquer de capacité de redressement suffisante pour résister à des forces de renversement plus élevées, ce qui pourrait mettre en danger sa sécurité en mer

5. Angle d'inclinaison de GZ max : L'angle d'inclinaison auquel GZ atteint son maximum doit être supérieur à 30° pour les navires autres que les navires à passagers, et supérieur à 25° pour les navires à passagers.

Ce critère, qui est illustré par la Figure 11.7, concerne l'angle d'inclinaison auquel le bras de levier du couple de redressement (GZ) atteint sa valeur maximale. Cet angle d'inclinaison doit être supérieur à 30° pour les navires autres que les navires à passagers, et supérieur à 25° pour les navires à passagers.

L'angle d'inclinaison auquel GZ atteint son maximum est un indicateur important de la stabilité du navire. Plus cet angle est grand, plus le navire est stable. Un navire stable atteint sa plus grande capacité de redressement à un angle d'inclinaison plus élevé, ce qui signifie qu'il peut résister à des forces de renversement plus importantes.

Par exemple, prenons un cargo qui doit naviguer dans des eaux agitées. Si cet angle d'inclinaison auquel le GZ atteint sa valeur maximale est de 35° , cela signifie que le cargo a sa plus grande capacité de redressement à cet angle. Si une vague importante fait pencher le navire à 35° , le navire a alors sa plus grande capacité à résister à cette force de renversement et à se redresser. Si l'angle d'inclinaison auquel le GZ est maximisé était inférieur à 30° , le navire pourrait avoir plus de difficulté à se redresser après avoir été incliné par une telle vague.

Pour les navires à passagers, cet angle doit être supérieur à 25° . Cette exigence plus stricte s'explique par le fait que la sécurité des passagers est d'une importance primordiale et que les navires à passagers sont souvent plus sensibles aux conditions de mer agitée en raison de leur conception et de leur structure.

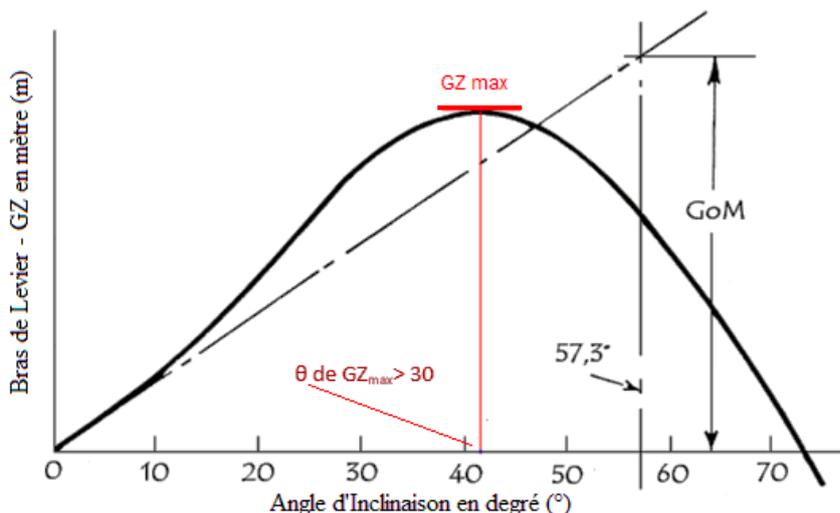


Figure 11.7. Angle d'inclinaison de GZ max

En résumé, ce critère est essentiel pour assurer que le navire a sa plus grande capacité de redressement à un angle d'inclinaison suffisamment élevé pour résister efficacement aux forces de renversement dans des conditions de mer agitées. Un navire qui ne répond pas à ce critère peut être insuffisamment stable, ce qui peut compromettre sa sécurité en mer

6. Valeur de G_0M : La hauteur métacentrique initiale GM à l'état intact doit être égale ou supérieure à 0,15 m.

Selon le Code international de stabilité intacte (IS Code) de 2008, la hauteur métacentrique, désignée par G_0M , doit être égale ou supérieure à 0,15 m dans l'état intact du navire, comme indiqué à la Figure 11.8.

Cette mesure, souvent notée G_0M , est un indicateur clé de la stabilité initiale d'un navire. Elle représente la distance verticale entre le centre de gravité (G) et le métacentre (M) du navire. Un G_0M élevé indique une forte résistance initiale du navire à l'inclinaison, avant qu'il ne soit soumis à des forces extérieures.

Le G_0M peut varier en fonction de l'inclinaison du navire ou des changements de charge à bord, tels que la consommation de carburant ou le chargement et le déchargement des marchandises. Par conséquent, la valeur G_0M représente la stabilité de base du navire, qui est une référence essentielle pour comprendre comment la stabilité peut évoluer en mer.

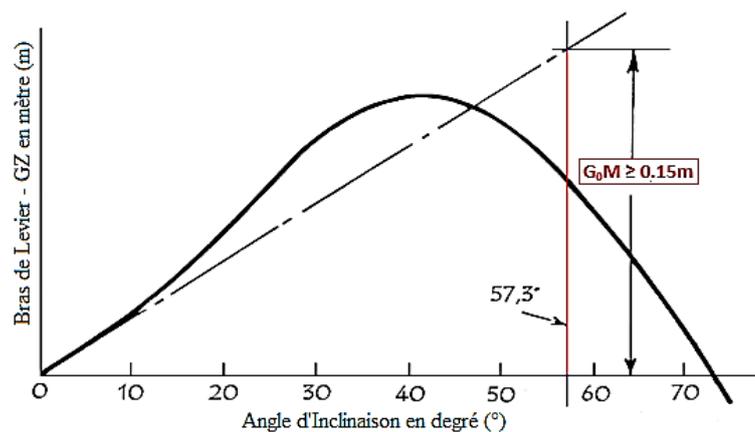


Figure 11.8. Valeur de $G_0M \geq 0,15m$

Le critère $G_0M \geq 0,15$ m est crucial, car il assure que le navire dispose d'une stabilité suffisante avant de quitter le port et avant que des modifications de la charge ou d'autres facteurs n'affectent sa stabilité.

Pour illustrer, imaginons un navire de croisière. Avant son départ, tous les passagers, bagages, provisions et carburant sont embarqués, puis le GM initial (G_0M) est calculé. Si cette valeur est inférieure à 0,15 m, des actions doivent être entreprises pour augmenter la stabilité, comme réajuster la répartition du poids à bord.

En ce qui concerne la valeur de 57,3 degrés, elle est utilisée pour convertir les radians en degrés lors du calcul du G_0M . La formule est : $G_0M = GZ/\text{angle d'inclinaison}$, où l'angle d'inclinaison est généralement exprimé en radians. Pour convertir cet angle en degrés, nous utilisons le facteur de conversion de 57,3, car 1 radian est égal à 57,3 degrés. Cette conversion est essentielle pour garantir une interprétation correcte des données de stabilité du navire.

11.2.2. Critères spécifiques pour les navires à passagers

1. **Aire sous la courbe GZ entre 30° et l'angle d'envahissement ou 40°** : Ce critère se concentre sur la région de la courbe GZ entre 30 degrés et l'angle d'envahissement ou 40 degrés, selon lequel est le plus petit. L'aire sous la courbe dans cette plage d'angles doit être au moins de 0.02 m.rad. Cela signifie que le navire doit avoir une résistance au chavirement suffisante lorsqu'il est incliné entre ces angles. L'angle d'envahissement est l'angle d'inclinaison à partir duquel l'eau peut pénétrer à l'intérieur du navire à travers certaines ouvertures.

Si cet angle est inférieur à 40 degrés, alors c'est cet angle qui est utilisé pour ce critère. Si un navire ne répond pas à ce critère, cela signifie qu'il pourrait ne pas être en mesure de se redresser efficacement lorsqu'il est soumis à des forces de renversement plus importantes dans cette plage d'angles, ce qui peut compromettre sa sécurité.

2. **Aire sous la courbe GZ entre 30° et 60° ou 40°** : Ce critère est similaire au précédent, mais il se concentre sur la région de la courbe GZ entre 30 degrés et 60 degrés, ou jusqu'à 40 degrés si l'angle d'envahissement est inférieur à 60 degrés. L'aire sous la courbe dans cette plage d'angles doit être au moins de 0.03 m.rad.

Encore une fois, cela signifie que le navire doit avoir une résistance au chavirement suffisante lorsqu'il est incliné entre ces angles. Si le navire ne répond pas à ce critère, cela pourrait signifier qu'il ne serait pas en mesure de se redresser efficacement si le navire était incliné à des angles plus élevés, ce qui pourrait potentiellement compromettre la sécurité des passagers et de l'équipage.

Ces deux critères visent à s'assurer que les navires à passagers ont une stabilité suffisante pour résister au chavirement à divers degrés d'inclinaison, compte tenu de l'angle d'envahissement spécifique du navire. Les valeurs spécifiques de l'aire sous la courbe GZ ont été déterminées par des recherches et des tests pour offrir un niveau de sécurité approprié pour les navires à passagers.

11.2.3. Critères spécifiques pour les navires transportant de bois sur le pont

Pour les navires transportant des cargaisons de bois sur le pont, des critères de stabilité spécifiques et détaillés sont préconisés. Ces critères se substituent à certains critères de stabilité généraux et sont conçus pour tenir compte des particularités associées au transport de bois. Les critères sont les suivants :

- **Aire sous la courbe GZ** : L'aire sous la courbe du levier de redressement (courbe GZ) doit être maintenue à un minimum de 0,08 mètre-radians jusqu'à un angle de roulis (θ) de 40°, ou jusqu'à l'angle d'envahissement si cet angle est inférieur à 40° ($\text{Aire } (0 - 40 \text{ où } \theta_f) \geq 0,080 \text{ m.rad} = 4,584 \text{ m. deg}$). Cela assure que le navire possède une stabilité adéquate pour résister aux effets de roulis et d'envahissement.
- **Valeur maximale du levier de redressement (GZ_{\max})** : Le levier de redressement, qui représente la capacité du navire à se redresser après une inclinaison, doit atteindre une valeur maximale d'au moins 0,25 mètre ($GZ_{\max} \geq 0,25\text{m}$). Ceci garantit que le navire a la capacité nécessaire pour se redresser après une inclinaison excessive.
- **Hauteur métacentrique (G_0M)** : La hauteur métacentrique, qui est une mesure de la stabilité initiale du navire, ne doit pas être inférieure à 0,10 mètre ($G_0M \geq 0,10\text{m.}$) à tout moment pendant un voyage.

Cette mesure doit tenir compte des effets de la surface libre des liquides dans les réservoirs et, le

cas échéant, de l'absorption d'eau par la cargaison de bois sur le pont et/ou de l'accumulation de glace sur les surfaces exposées. Cette précaution assure que le navire maintient une stabilité adéquate même en présence de facteurs déstabilisants potentiels.

11.2.3. Critères supplémentaires

Tous les navires doivent également respecter des critères supplémentaires liés à la stabilité en cas de vent et dans des conditions de glace, et comme spécifié dans le Code IS 2008.

1. Vent : Le navire doit pouvoir résister aux effets combinés du vent de travers et du roulis. Un angle de gîte de 16° sous l'action d'un vent constant doit être respecté.
2. Glace : L'accumulation de glace peut affecter la stabilité du navire. Les effets potentiels de l'accumulation de glace doivent être pris en compte dans les calculs de stabilité, notamment en ce qui concerne le poids supplémentaire dû à l'accumulation de glace.

Il est important de noter que ces critères sont des indicateurs de la stabilité d'un navire, mais ne garantissent pas la sécurité du navire dans toutes les conditions. D'autres facteurs tels que la conception du navire, son exploitation, la formation de l'équipage et les conditions météorologiques sont également à prendre en compte pour assurer la sécurité d'un navire.

Conclusion

Le présent chapitre a déployé une analyse minutieuse des normes de stabilité prescrites par le Code de stabilité intacte (IS Code) de l'Organisation maritime internationale (OMI). Ces réglementations de stabilité sont indubitablement cruciales pour assurer la sécurité des navires naviguant les océans.

Le Code IS de 2008, adopté par l'OMI, est l'aboutissement de décennies de recherches, d'innovations et de l'élaboration de modèles de stabilité sophistiqués par des ingénieurs navals. Ce code incarne un cadre réglementaire robuste pour jauger la stabilité transversale des navires en état intact, visant à garantir leur sûreté.

Les normes générales de stabilité présentées dans le Code IS englobent divers paramètres clés. Ces normes examinent l'énergie de redressement du navire, symbolisée par l'aire sous la courbe des bras de levier de redressement (GZ), ainsi que d'autres mesures comme la valeur du GZ à 30 degrés et l'angle d'inclinaison auquel GZ atteint son maximum.

Par ailleurs, des normes spécifiques ont été instaurées pour certains types de navires. Pour les navires à passagers, des normes supplémentaires ont été formulées pour assurer une stabilité convenable sur des plages d'angles spécifiques. De même, les navires transportant du bois sur le pont sont assujettis à des normes de stabilité distinctes, prenant en compte les effets du roulis et de l'envahissement.

Il convient de souligner que les normes de stabilité définies dans le Code IS ne constituent que des indicateurs de la stabilité d'un navire et ne garantissent pas une sécurité sans faille en toutes circonstances. D'autres éléments tels que la conception du navire, son exploitation, la formation de l'équipage et les conditions météorologiques doivent également être pris en considération.

Pour conclure, les normes de stabilité prescrites par le Code de stabilité intacte proposent un cadre réglementaire rigoureux et détaillé pour l'évaluation et la garantie de la stabilité des navires. Elles sont le fruit de nombreuses résolutions de l'OMI visant à réguler et normaliser les normes de stabilité au fil des ans. Cependant, il est primordial de tenir compte de tous les aspects liés à la sécurité des navires pour garantir leur protection intégrale en mer.

Chapitre 12

Effet du vent sur la stabilité des navires

Introduction

L'interaction entre le vent et un navire est un facteur clé dans la stabilité transversale des navires à l'état intact, un sujet directement abordé par le Code de stabilité à l'état intact de 2008 établi par l'Organisation maritime internationale. Le vent exerce une pression sur la superstructure d'un navire, affectant sa direction et sa vitesse, et peut également augmenter le mouvement de roulis. Ce mouvement de basculement latéral peut devenir dangereux sous l'effet de vents forts, en particulier lorsqu'il est combiné à des vagues importantes. Le Code fournit des directives pour calculer et évaluer la stabilité transversale des navires, y compris l'impact du vent, afin d'assurer une navigation sûre et conforme aux normes réglementaires internationales.

12.1. L'impact du vent sur la stabilité des navires

Pour évaluer correctement la stabilité transversale d'un navire à l'état intact, il est crucial de considérer l'effet combiné du vent de travers et du roulis, notamment dans le cas de chargement le plus défavorable. La Figure 12.1 illustre l'interaction entre la force du vent et un navire à passagers.

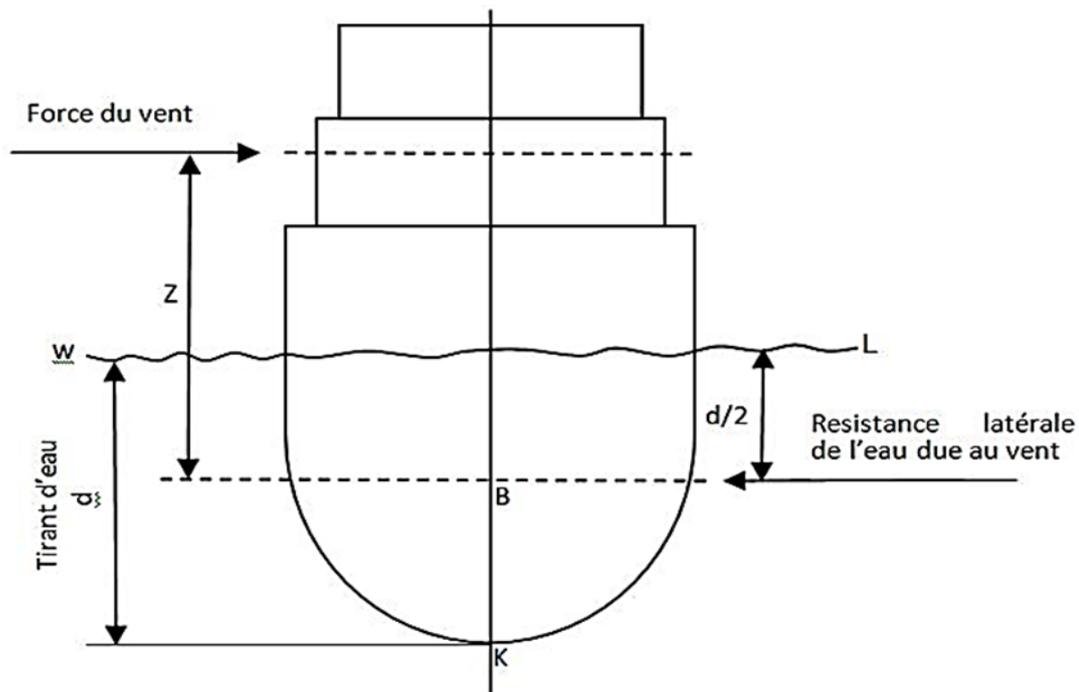


Figure 12.1. Illustration de l'interaction entre la force du vent et un navire à passagers

12.2. Critère vent violent et roulis (critère météorologique)

Pour chaque condition standard de chargement, la capacité d'un navire à résister aux effets combinés du vent de travers et du roulis doit être démontrée en se référant à la figure 12.2 suivante. L'aptitude du navire à résister aux effets combinés du vent de travers et du roulis est démontrée comme suit :

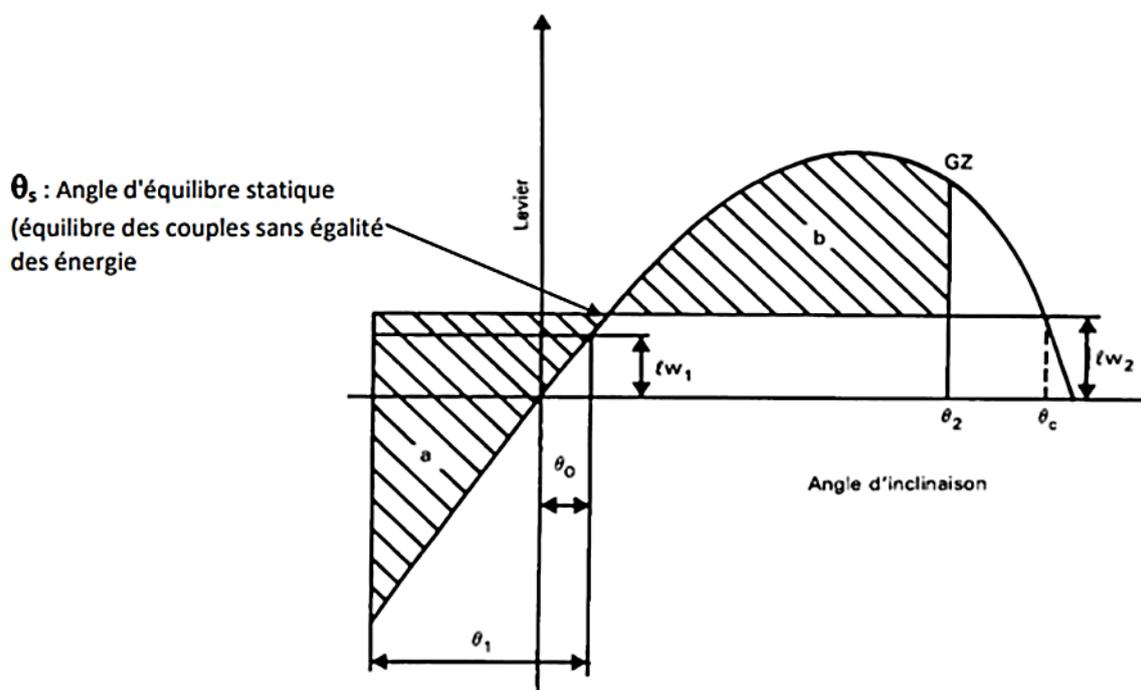


Figure.12.2. Vent violent et roulis¹

Le critère de vent violent et de roulis, défini par le Code IS 2008, a été initialement conçu pour garantir la sécurité des navires contre le risque de chavirement en cas de perte totale de puissance propulsive et de direction dans des conditions de vent et de vagues violentes. Le processus d'évaluation de la stabilité d'un navire dans ces conditions est détaillé comme suit dans la Figure 2.3.1 du Code IS 2008 :

1. Le navire est initialement soumis à une pression constante d'un vent agissant perpendiculairement à l'axe central du navire. Cette pression induit un bras de levier d'inclinaison dû au vent constant, noté (lw_1).
2. À partir de l'angle d'équilibre initial résultant de cette pression du vent, noté (θ_0), le navire est supposé commencer à rouler sous l'effet des vagues, formant un nouvel angle d'inclinaison, noté (θ_1), vers le vent. Il est important de noter que cet angle d'inclinaison (θ_0) ne doit pas dépasser 16° ou 80% de l'angle d'immersion du bordé, selon la valeur la plus faible.
3. Le navire est ensuite exposé à des rafales de vent, générant un bras de levier d'inclinaison supplémentaire, noté (lw_2).
4. Dans ces circonstances, la zone b doit être égale ou supérieure à la zone a

Dans ce cadre, il est nécessaire de comprendre les termes "aire sous la courbe représentant les forces résultantes de l'inclinaison (b)" et "aire sous la courbe représentant la résistance au vent (a)".

¹ La figure insérée correspond à la Figure 2.3.1 telle que présentée dans le Code IS 2008

L'aire (b) correspond à la capacité totale d'un navire à résister à l'inclinaison, ou au roulis, sous l'effet du vent et des vagues. Elle est déterminée par l'intégration de la courbe qui décrit la variation des forces de restauration en fonction de l'angle d'inclinaison du navire. Ces forces sont directement liées aux caractéristiques structurelles et de conception du navire et visent à ramener le navire à une position stable après une perturbation, comme une rafale de vent ou une vague.

De l'autre côté, l'aire (a) décrit la somme cumulative de toutes les forces de vent appliquées au navire en fonction de l'angle d'inclinaison. Elle est calculée en intégrant la courbe qui décrit l'effet du vent sur le navire à différents angles d'inclinaison.

Pour garantir une stabilité adéquate, ces deux aires sont comparées. Le navire est considéré comme ayant une stabilité suffisante pour résister aux vents violents et aux roulis importants si l'aire (b) est égale ou supérieure à l'aire (a). Autrement dit, le navire doit être capable de résister à une inclinaison égale ou supérieure à l'effet du vent latéral pour maintenir sa stabilité. Cette exigence garantit que le navire peut maintenir sa stabilité même sous l'effet de forts vents latéraux et de mouvements de roulis.

L'aptitude du navire à résister aux effets combinés du vent de travers et du roulis est démontrée comme suit :

$$lw_2 = 1,5 lw_1 \quad (12.1)$$

Les angles de la figure ci-dessus sont définis comme suit :

- θ_0 : angle de gîte dû au vent constant et continu.
- θ_1 : amplitude de roulis au vent dû à l'action de la houle.
- θ_2 : valeur la plus petite entre (θ_f , θ_c ou 50°), où :
- θ_f : angle de début d'envahissement
- θ_c : angle de la deuxième intersection entre les courbes du bras de levier d'inclinaison dû au vent lw_2 et de la courbe des GZ.

Les bras de levier d'inclinaison dus au vent lw_1 et lw_2 sont des constantes à tous les angles d'inclinaison et sont calculés au moyen des formules suivantes :

$$lw_1 = P.A.Z / (1000.g.\Delta) \text{ (m)} \quad (12.2)$$

$$lw_2 = 1,5 lw_1 \text{ (m)} \quad (12.3)$$

Dans lesquelles :

- P : pression due au vent déterminé par interpolation linéaire entre les valeurs données dans le tableau 12.1 ci-dessous (Pa)
- A : aire latérale projetée de la cargaison en pontée et de la partie du navire située au-dessus de la ligne de flottaison (m^2)
- Z : distance verticale depuis le centre de A jusqu'au centre de l'aire latérale du navire située sous l'eau ou approximativement jusqu'à un point situé à la moitié du tirant d'eau (m).
- Δ ou W : déplacement du navire (t)
- g : accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Tableau 1

h (m)	1	2	3	4	5	6 et +
P (Pa)	316	386	429	460	485	504

Où

h : distance verticale depuis le centre de l'aire latérale projetée du navire située au-dessus de la flottaison jusqu'à la flottaison (m).

L'angle de roulis θ_1 doit être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\theta_1 = 109 k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r s} \quad (\text{degrés}) \quad (12.4)$$

Dans laquelle, k = coefficient déterminé comme suit :

k = 1,0 pour un navire à bouchains arrondis qui n'a pas de quille de roulis ni de quille massive

k = 0,7 pour un navire à bouchains vifs

k = comme indiqué dans le tableau 4 pour un navire ayant des quilles de roulis, une quille massive ou les deux.

X_1 = coefficient tiré du tableau 2

X_2 = coefficient tiré du tableau 3

$$r = 0,73 \pm (0,6 \text{ OG} / d) \quad (12.5)$$

Dans cette formule (12.5) :

OG = distance entre le centre de gravité et la flottaison (m)

(+) si le centre de gravité est au-dessus de la flottaison

(-) s'il est en dessous.

d = tirant d'eau moyen sur quille (m)

s = coefficient tiré du tableau 5

L'angle de roulis des navires pourvus de dispositifs antiroulis autres que les quilles de roulis doit être calculé sans tenir compte du fonctionnement de ces dispositifs.

Tableau 2		Tableau 3		Tableau 4		Tableau 5	
B / d	X ₁	C _b	X ₂	$\frac{100 \cdot A_k}{L \cdot B}$	k	T	s
≤ 2,4	1,0	≤ 0,45	0,75	0	1,00	≤ 6	0,100
2,5	0,98	0,50	0,82	1,0	0,98	7	0,098
2,6	0,96	0,55	0,89	1,5	0,95	8	0,093
2,7	0,95	0,60	0,95	2,0	0,88	12	0,065
2,8	0,93	0,65	0,97	2,5	0,79	14	0,053
2,9	0,91	≥ 0,70	1,0	3,0	0,74	16	0,044
3,0	0,90			3,5	0,72	18	0,038
3,1	0,88			≥ 4,0	0,70	≥ 20	0,035
3,2	0,86						
3,3	0,84						
3,4	0,82						
≥ 3,5	0,80						

Les valeurs intermédiaires des tableaux 2 à 5 doivent être obtenues par interpolation linéaire.

Les symboles utilisés dans les tableaux ci-dessus sont définis comme suit :

- L = longueur du navire (m)
- B = largeur du navire hors membres (m)
- d = tirant d'eau moyen sur quille du navire (m)
- C_b = coefficient de remplissage
- A_k = surface totale des quilles de roulis ou surface de la projection latérale de la quille massive, ou somme de ces surfaces (m²)
- T = période du roulis (s), calculée au moyen de la formule suivante :

$$T = \frac{2(C \cdot B)}{\sqrt{GM}} \quad (12.6)$$

dans laquelle :

- C = coefficient de roulis = $0,373 + 0,023 (B / d) - 0,043 (L / 100)$
- GM = distance métacentrique corrigée pour tenir compte de l'effet des carènes liquides (m)

Conclusion

Ce chapitre a détaillé l'effet complexe du vent sur la stabilité des navires, un sujet d'importance critique pour assurer la sécurité en mer. L'interaction entre le vent et un navire peut influencer significativement sa direction, sa vitesse et son mouvement de roulis. Nous avons exploré comment l'Organisation maritime internationale traite cette question, à travers le Code de stabilité à l'état intact de 2008, qui offre des directives précises pour évaluer la stabilité transversale des navires, y compris l'impact du vent.

Le rôle des critères de vent violent et de roulis a été analysé, fournissant un aperçu de la façon dont la résilience d'un navire aux effets du vent latéral et du roulis est évaluée. À travers l'application de

formules spécifiques, nous avons appris comment déterminer les bras de levier d'inclinaison causés par le vent et comment calculer l'angle de roulis d'un navire.

En somme, la stabilité d'un navire face aux forces du vent n'est pas une considération accessoire, mais un aspect primordial de la conception et de l'exploitation navales. Les réglementations internationales, les principes d'ingénierie et les formules mathématiques complexes qui interviennent dans l'évaluation de cette stabilité attestent de son importance. Ainsi, l'effort constant pour comprendre et atténuer les effets du vent sur la stabilité des navires contribue à rendre la navigation plus sûre et plus efficace.

Conclusion

La stabilité transversale des navires à l'état intact constitue l'élément clé de la sécurité maritime, le pilier central de la durabilité des navires et le moteur d'une navigation optimisée. Elle reflète l'importance vitale de la conception, de la construction et de l'hydrodynamique des navires. Le défi est de cultiver une expertise en ingénierie navale qui engendre non seulement des navires conformes à un ensemble complexe de réglementations, mais qui se distinguent également par leur performance, leur sécurité et leur efficacité.

L'importance primordiale de comprendre la stabilité statique transversale, les conditions d'équilibre et le métacentre transversal initial est mise en exergue. Ce sont ces facteurs qui déterminent la capacité d'un navire à résister aux forces extérieures et à retrouver sa position initiale. Les acteurs de l'industrie maritime se doivent d'être compétents dans l'appréhension des effets du vent sur la stabilité des navires et d'être au fait des exigences réglementaires pour minimiser les risques d'accidents et d'incidents de stabilité.

La conception d'un navire ne peut se faire sans une considération préalable et approfondie de ces critères de stabilité. Les concepteurs ont la responsabilité de cibler les zones critiques pour prévenir les retards lors des phases de dessin, d'approbation et de construction. Ils sont également tenus de se tenir à jour face à l'évolution constante des réglementations maritimes et de satisfaire à des normes de sécurité et de performance opérationnelle de plus en plus rigoureuses.

Dans cette perspective, une communication efficace et une coopération étroite entre tous les acteurs de l'industrie, y compris les architectes navals, les constructeurs, les opérateurs, les membres d'équipage et les organismes de réglementation, sont indispensables pour optimiser la stabilité des navires et assurer une navigation sécuritaire. Les progrès technologiques et les innovations en matière de stabilité des navires offrent des opportunités inédites d'améliorer la sécurité et la performance des navires et de relever les défis futurs d'un secteur maritime en perpétuelle évolution.

L'importance de former les futurs professionnels de l'industrie maritime n'est pas à négliger, car leur préparation aux problèmes de stabilité des navires est cruciale pour améliorer la sécurité maritime et préserver l'environnement. Les institutions d'enseignement et les programmes de formation doivent sans cesse réinventer leurs programmes et méthodes pédagogiques pour refléter les dernières avancées et tendances en matière de stabilité des navires, garantissant ainsi que les nouvelles générations de professionnels de l'industrie maritime sont prêtes à relever les défis.

En conclusion, le polycopié de cours offre une base solide et actualisée pour former les futurs ingénieurs en génie maritime, en couvrant de manière exhaustive les principes fondamentaux de la stabilité transversale des navires. Il prépare les étudiants à relever les défis complexes du génie maritime et à contribuer à une navigation sûre, efficace et respectueuse de l'environnement.

Bibliographie

1. Fossen, T.I. (2021). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley.
2. IMO (2020). International Maritime Organization: Stability of Ships - Intact Stability.
3. Lamb, T. (2018). Ship Design and Construction. SNAME.
4. Yakimchuk, Y. N. (2015). Numerical Modeling of Ship Motions and Stability. Russian Engineering Research, 35(12), 974-978.
5. Belenky, V. (2013). Contemporary Ideas on Ship Stability. Springer Science & Business Media.
6. Ship Stability for Masters and Mates by Bryan Barrass and Capt D R Derrett (2012).
7. Papanikolaou, A. (2011). Ship Design: Methodologies of Preliminary Design. Springer Science & Business Media.
8. Mansell, J. G. (2011). Ship Construction. Elsevier.
9. Fossen, T.I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons.
10. Bliault, A. (2010). Ship Stability for Masters and Mates. Elsevier.
11. Molland, A. F. (2008). The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation. Butterworth-Heinemann.
12. International Maritime Organization (IMO). (2008). International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code). London: International Maritime Organization.
13. Paik, J. K., & Thayamballi, A. K. (2007). Ship-shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation. Cambridge University Press.
14. The Repair and Maintenance of Ships: The Surveyor's Perspective by D. Knott (2004).
15. Barrass, B. (2004). Ship Design and Performance for Masters and Mates. Elsevier.
16. Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). Basic Ship Theory. Butterworth-Heinemann.
17. Bertram, V. (2000). Practical Ship Hydrodynamics. Elsevier.
18. Lewis, E.V. (Ed.). (1989). Principles of Naval Architecture: Stability and Strength. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
19. Harvald, S.A. (1989). Resistance and Propulsion of Ships. Wiley-Interscience.
20. Lewis, E. V. (1988). Principles of Naval Architecture. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
21. Ship Stability for Masters and Mates by D.R. Derrett (1983).
22. Oosterveld, M. W. C., & van Oossanen, P. (1975). Propeller-induced Ship Vibrations and Noise. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 117, 221-235.
23. Schneekluth, H., & Bertram, V. (1998). Ship Design for Efficiency and Economy. Butterworth-Heinemann.