

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf



**Faculté de Génie Mécanique
Département de Génie Maritime**



Structure du navire

Tome I, Introduction et Généralités

ELABORE PAR :

Dr. HADJAZI Khamis

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element with several flowers and leaves is positioned at the top left of the calligraphic text.

Sommaire

sommaire	i
Introduction générale	01
Chapitre I :	Généralités sur la résistance d'un navire
I-1) Introduction	04
I-2) Projection de la construction de la coque	04
I-3) Influence des décisions initiales sur la projection de la construction de la coque	05
I-4) Prescription des sociétés de classification	07
I-5) Calcul global de la résistance de la poutre-navire	08
I-6) Méthode de calcul	12
I-6-1) Calcul des efforts intérieurs	12
I-6-2) Calcul du moment d'inertie et du module de résistance	17
I-7) Exercice d'application	18
Chapitre II :	Efforts subis par le navire
II.1) Introduction	21
II.2) Catégories des charges appliquées sur la structure de la coque	21
II.2.1) Charge de résistance longitudinale	22
II.2.2) Charges de résistance transversale	22
II.2.3) Charges de résistance locales	25
II.3) Efforts extérieurs	26
II.3.1) Les forces superficielles	27
II.3.2) Les forces massiques (volumiques)	29
II.3.3) Les forces statiques	29
II.3.4) Les forces dynamiques	37
II.4) Effort intérieurs	42
II.5) Efforts et contraintes sur la structure du navire	45
II.5.1) Dans le cas statiques	45
II.5.2) Dans le cas dynamiques	46
II.6) Les lignes d'influences	47
II.7) Méthodes de détermination des lignes d'influence	47

II.7.1) Méthode directe	47
II.7.2) Méthode cinématique	48
II-8) Exercice d'application	48
Chapitre III :	Construction de la courbe des poids
III.1) Introduction	51
III.2) Construction de la courbe des poids (distribution des poids)	51
III.3) Courbe de poids de la coque métallique	52
III.3.1) Méthode exacte	52
III.3.2) Méthode approximative	53
III.4) Construction de la courbe des réactions hydrostatiques	59
III.5) Courbe (échelle) de Bonjeau	60
III.5.1) Navire en eau calme	61
III.5.2) Navire sur houle	62
III.6) Construction des courbes de charges résultantes	63
III.7) Répartition des poids concentrés ou réparties sur deux intervalles voisins	65
III.8) Exercice d'application	68
Chapitre IV :	Moment fléchissant maximum
IV.1) Introduction	72
IV.2) Moment fléchissant maximum en eau calme	72
IV.2.1) Méthode de calcul	73
IV.3) Moment fléchissant maximum complémentaire du au passage de la houle	76
IV.3.1) Formule de Murray	77
IV.3.2) Formule de Bureau Veritas	78
IV.3.3) Formule de Vedeler	79
IV.4) Méthode de Harry Cross de distribution des moments	
IV.5) Calcul des moments dus à l'action combinée des charges réelles et des couples de fixation des nœuds	83
Références bibliographique	84

INTRODUCTION

Le calcul de la structure du navire a pour but de vérifier que, d'une part, l'endommagement par fatigue, sans être nul, ne conduira pas à un volume de travaux d'entretien qui serait insupportable et que, d'autre part, la sécurité est assurée par mer forte.

Les efforts s'exerçant sur le navire à mer sont le poids des masses, compte tenu des efforts d'inertie dus aux mouvements d'ensembles (roulis, tangage, pilonnement) et la pression de l'eau sur la carène (pression statique et dynamique). Les toutes formes un système en équilibre.

Au mauvais temps sur une mer houleuse les navires sont soumis à des fatigues et des contraintes qui peuvent être élevée. La houle elle-même provoque la création des moments fléchissant important admet le cas critique lorsque le navire se trouve sur une houle de longueur égale environ la longueur du navire est spécialement lorsque le maitre couple se trouve sur la crête ou le creux de la vague.

On générale toute les forces intérieur d'une coupe navire peuvent être calculé après la détermination de ces mouvements. La résolution exacte des équations différentielles du mouvement du navire est pratiquement impossible donc il sera possible d'introduire des hypothèses simplificatrices.

A considérer le comportement d'un navire sur une mer démonté, on conçoit les difficultés de la description de ce système. La pratique distingue donc deux catégories de méthodes de calcul de la structure résistante ou charpente : les méthodes conventionnelles de mise sur houle standard et les méthodes probabilistes.

Les méthodes conventionnelles de mise sur houle standard tirent parti de l'existence des milliers de navires dont la qualité de la charpente a été démontrée par des années de service à la mer. Elles ont pour but d'évaluer dans quelle mesure un nouveau projet appartient à la population précédente ; cette évaluation s'exprime en termes de la structure du navire, soumis à des efforts conventionnels.

Les règles relatives à la solidité de la coque sont entièrement sous-traitées par les bureaux d'études des organismes de contrôle ou par les sociétés de classification. Le Bureau Veritas (BV) prescrits dans son Règlement « Construction des navires en acier », un certain nombre de règles qu'il convient de respecter pour que le navire/bateau soit coté

et que sa cote soit maintenue dont, notamment : les critères de résistance, l'examen des plans, la qualité des matériaux, l'échantillonnage, la protection contre la corrosion, les épreuves et les essais.

Cette structure (navire) est toujours représentée comme une poutre à section indéformable (poutre navire). Les seuls efforts à considérer sont donc les résultats des poids et poussées sur des tranches de longueur unité de cette poutre. Des raisons pratiques conduisent à séparer les efforts en eau calme, les efforts sur houle. En eau calme, les efforts considérés sont les poids et la poussée d'Archimède sur les tranches de la carène. Sur houle, le chargement considéré est la différence algébrique entre les poussées hydrostatiques créées par une houle standard et les poussées en eau calme. Très généralement, la houle standard retenue est une houle de l'avant de longueur égale à la longueur entre perpendiculaires.

Ce polycopié est adressé aux étudiantes Master I et troisièmes années LMD en Génie Maritime. Le polycopié est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre, constitue une introduction générale à la projection de la construction de la coque. Le contenu est consacré, en premier lieu, à la mise en place de l'influence des décisions initiales sur la projection de la construction de la coque ainsi qu'aux méthodes de calcul des efforts intérieurs, du moment d'inertie et du module de résistance de la poutre-navire. Le contenu du deuxième chapitre présente les différentes catégories des charges appliquées sur la structure de la coque. Il est structuré de manière à fournir à l'étudiant les bases afin que ce dernier puisse connaître les charges de résistance longitudinales, transversales et locales due aux efforts extérieurs et intérieurs dans les deux cas statiques et dynamiques. Ce chapitre est clôturé par l'analyse de l'effet des forces mobiles sur la structure du navire par la détermination des lignes d'influence. Ensuite le troisième chapitre, présente les différentes méthodes de la répartition des poids du navire en longueur; c'est-à-dire la construction de la courbe des poids la coque métallique (distribution des poids) par deux méthodes (exactes et approximatives), afin de construire la courbe de charge résultante. La construction de la courbe des réactions hydrostatiques, Courbe (échelle) de Bonjeau en eau calme et sur houle sont présentés aussi dans ce chapitre. Le dernier chapitre est consacré à la démonstration des différentes méthodes de calcul du moment fléchissant maximum en eau calme et du moment fléchissant maximum complémentaire du au passage de la houle et à la présentation du

principe de la méthode de Harry Cross de distribution des moments dans une structure dit portique, ce chapitre est clôturé par l'explication de la méthode de calcul des moments dû à l'action combinée des charges réelles et des couples de fixation des nœuds dans la structure du navire.

I-1) Introduction

La construction navale doit sans doute fournir un navire ayant une résistance suffisante pour supporter le poids propre du navire, la cargaison et les conditions climatiques, pour durée d'exploitation jugée acceptable en fonction du coût de réalisation. Cette construction doit être suffisamment rigide pour que la coque maintienne sa forme initiale pendant toute la période d'exploitation de ce fait la construction prend aussi en considération les nouvelles conditions technologiques (matériau, critère, fixation...) et aussi les normes imposées par les sociétés de classification (BV, ATMA...). La coque doit être légère ce qui veut dire le facteur poids est un critère de basse dans l'optimisation du poids total du navire (en fonction de la cargaison). Il ne faut pas oublier la simplicité de la construction pour faciliter le montage et le démontage, la réparation et la maintenance.

I-2) Projection de la construction de la coque

Les calculs généraux de la résistance doivent satisfaire trois conditions essentielles à savoir :

- Les conditions de résistance ;
- Les conditions de rigidité ;
- Les conditions de stabilité.

La première condition assure la construction contre l'apparition des contraintes destructives (fissures, rupture et endommagement).

La deuxième condition préserve la construction contre les déformations.

La troisième condition a pour but d'assurer à la construction son équilibre élastique initial.

Dans les règlements des sociétés de classification, on utilise ces conditions pour la détermination des caractéristiques géométriques en liaison avec d'autres données, telles que les propriétés mécaniques des matériaux de construction, les charges appliquées, le poids propre ainsi que d'autres données définissant l'emplacement des éléments calculés et les conditions aux limites existantes (échantillonnage), les grandeurs principales calculées sont : les épaisseurs, les sections, les modules de résistances et les moments d'inerties.

I-3) Influence des décisions initiales sur la projection de la construction de la coque

La coque est mesurée par différentes dimensions telles que la longueur hors-tout (L_{OA}), la longueur entre perpendiculaires (L_{pp}), le maître-bau (B), le creux (D), le tirant d'eau (T) et le franc-bord (F), (figure I.1).

Les différentes dimensions et proportions influencent plusieurs caractéristiques d'un bateau, comme la stabilité, la capacité, la résistance, l'énergie de propulsion, etc. La détermination de ces dimensions et proportions forme une phase importante sur la projection de la construction de la coque dans l'architecture navale.

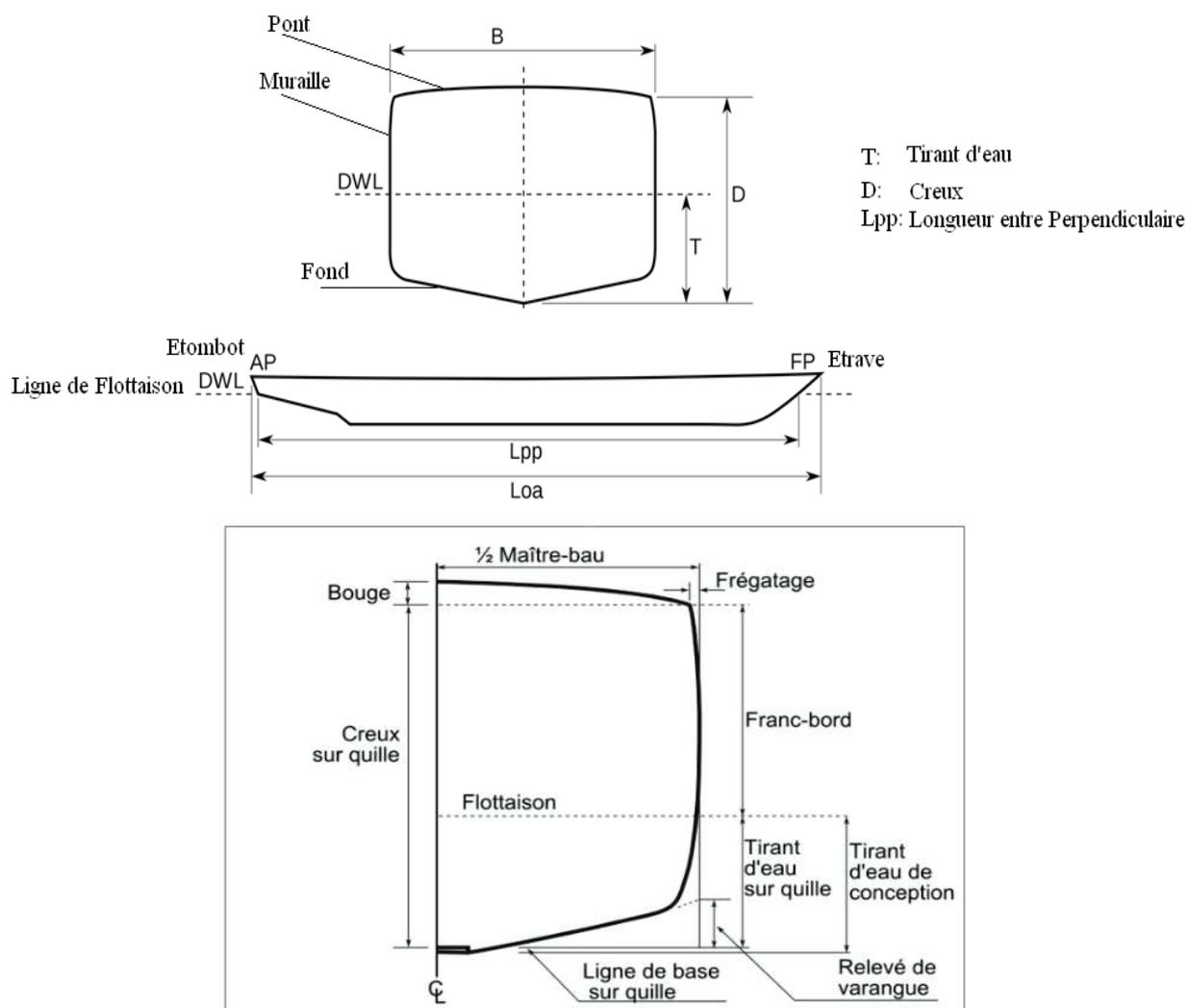


Figure I.1 : Mesures principales d'une coque.

La projection de la construction de la coque est la partie principale du processus général de la projection du navire elle dépend du type du navire à construire, notamment le dimensionnement des parties essentielles du navire à construire.

La résistance de la construction doit être en conformité avec le volume de la coque qui à son tour détermine les phases initiales du projet sur la base des considérations hydromécaniques. Dans la phase initiale on détermine aussi les rapports dimensionnels et le compartimentage du navire. A ce stade, il faut prendre en considération l'influence des rapports des dimensions sur le poids de la coque, ainsi que l'influence du compartimentage sur la grandeur du moment de flexion au niveau du maître couple en fonction du module de résistance de la coque il ne faut pas oublier le côté économique et la rentabilité pendant l'exploitation aussi les techniques d'endommagement pour garder le côté stabilité.

Le bloc coefficient C_b de la coque est un paramètre principal dans la projection de la construction de la coque, il représente le rapport entre le volume de la coque (déplacement) et le volume du parallélépipède contenant la section la plus large (section de maître couple), figure I.2.

$$C_b = \frac{V_{coque}}{LBT} = \frac{\nabla}{LBT} = \frac{\Delta}{\rho LBT} \quad (I.1)$$

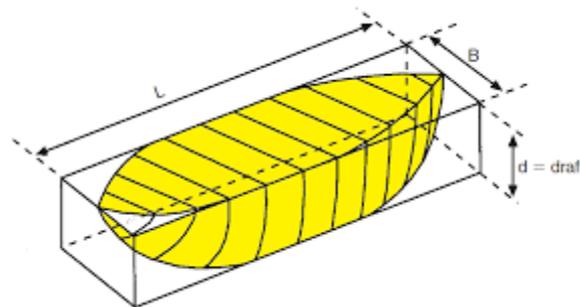


Figure I.2 : Coefficient de bloc.

Le déplacement Δ est une mesure du poids d'un navire dans différentes situations de chargement. C'est le poids de l'eau équivalent au volume immergé de la coque. Il est exprimé en tonnes, figure I.3.

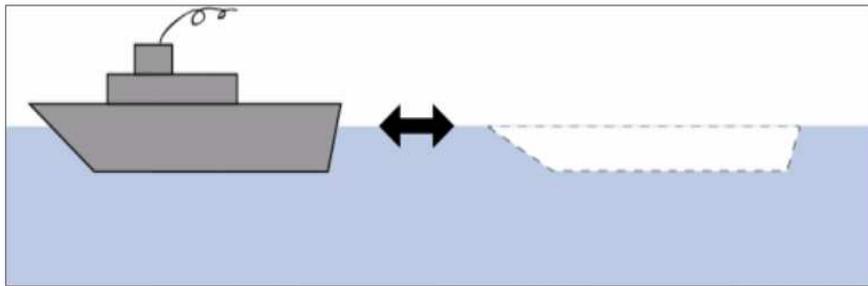


Figure I.3 : Déplacement d'un navire.

La valeur de C_b varie entre 0.4 et 0.85, ce coefficient donne une idée sur la forme « V » de la coque et il est principalement utilisé comme critère pour les grands navires.

I-4) Prescription des sociétés de classification

La méthode la plus simple dans la projection des navires depuis plusieurs années réside dans la détermination des dimensions de tous les éléments et les liaisons constructive selon les règlements des sociétés de classification. La disponibilité de ces règlements à permet de projeter entièrement n'importe quelle type de navire sans avoir retour au calcul traditionnel de la résistance.

Les dimensions des éléments constructifs sont choisies à partir des tables ou abaques existants dans les règlements, ou bien à partir de formules semi empirique simples en fonction des dimensions principales de la coque et d'autres caractéristiques géométriques.

Le premier critère exigé par les sociétés de classification dans la projection de la coque de tous navires est le module de résistance minimum (W_{min}) dans la section la plus dangereuse (maitre couple)

Par exemple le calcul de la résistance générale du navire à la flexion se réduit à la détermination du module de résistance du maitre couple. Conformément à la réglementation le module de résistance est donné par :

$$W \geq f.B.T \quad (I.2)$$

f : fonction de la longueur du navire uniquement.

Le module de résistance du maitre couple sont calculer au fond et au livet du pont supérieur sont donné par :

$$W = FL^2 B(C_b + 0.7)10^{-6} [m^3] \quad (I.3)$$

L : longueur du navire

B : largeur du navire

C_b : bloc coefficient

F : fonction de la longueur

$$\text{Si } L < 300m, \text{ on a : } F = F_0 - F_1 \left(\frac{300-L}{100} \right)^2 \quad (\text{I.4})$$

Pour pétrolier $F_0= 11.4$ et $F_1=1$

Pour vraquier $F_0= 11.4$ et $F_1=0.982$

Pour cargo, porte conteneur $F_0= 10.8$ et $F_1=0.947$

Si $L \geq 300m$ on a : $F = F_0$

Le module de résistance peut être aussi calculé avec des méthodes plus exactes. Il suffit de déterminer le moment dû à la houle pour le cas de chargement le plus défavorable et par la suite le divisé par la contrainte limite fixée selon les sociétés de classification :

$$\sigma = \frac{M_H}{\sigma_l} \quad (\text{I.5})$$

Ce qui nous permettra de dimensionner ou de vérifier la section du maitre couple. Par la suite il faut prendre en considération les nécessités de renforcement local de la construction dans les endroits les plus exposées aux charges transversales, ou bien les corrosions intérieures.

Avec l'application de nouveau type de navire pour différent applications (transport hydrocarbures, pêche...) avec des dimensions considérable, il est devenue nécessaire d'adopter de nouvelle méthodes de calculs. Ainsi les formules du règlement sont devenues similaire à celle utilisées au calcul de résistance.

Elles sont en réalité formulés sur la base de calcule analytique et d'essais sur des bassins de carène.

I-5) Calcul global de la résistance de la poutre-navire

Le calcul des tensions (contraintes) et des déformations de la coque d'un navire est beaucoup plus complexe que dans les constructions fixes au sol, les réactions de l'eau sont plus complexes que les réactions d'appui car elles sont variables et violentes sur une mer

agitée. De plus, la coque d'un navire présente une hyperstaticité interne élevée et s'écarte d'ailleurs des hypothèses de la résistance des matériaux. On doit également tenir compte d'efforts d'inertie considérables sur le navire en marche. Enfin les tensions thermiques élevées peuvent résulter de l'exposition de partie des œuvres mortes au soleil, d'autres parties étant dans l'ombre ou dans l'eau.

Sous ces diverses sollicitations, le navire subit des déformations d'ensemble que l'on calcule comme si tous les efforts étaient appliqués sur l'axe de la poutre-navire.

La poutre-navire en I est la mieux adaptée à ce cas de chargement : moment d'inertie élevé par rapport à la fibre neutre et maximum de poids travaillant dans les régions éloignées de cette fibre. La figure (I.4) a fait apparaître l'analogie entre le navire et ce type de poutre.

Les semelles et l'âme sont constituées :

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

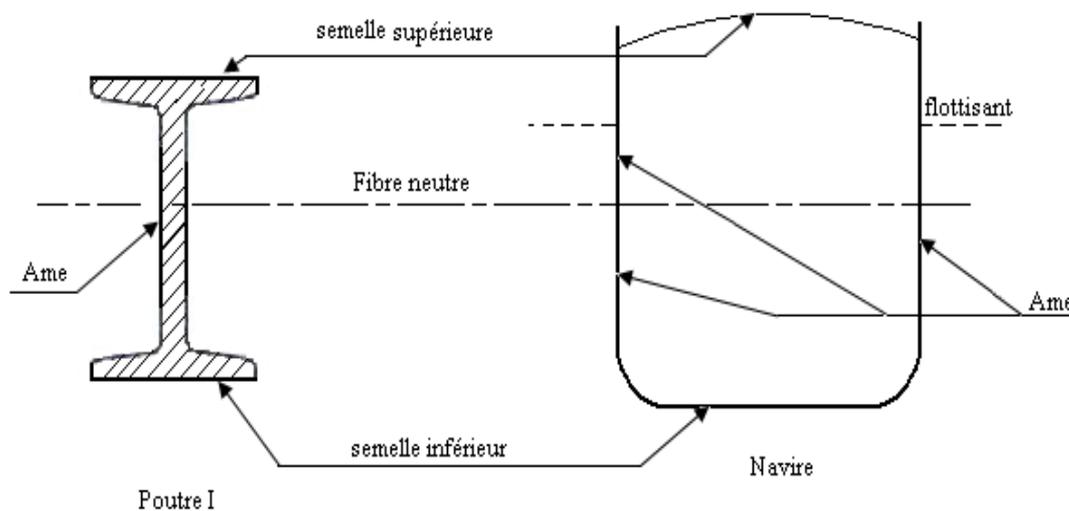


Figure I.4 : La similitude entre le navire et une Poutre-navire en I .

Dans l'analyse de la résistance de la coque du navire on distingue :

a- Résistance générale (déformation générale)

La résistance générale de la coque navire c'est l'analyse des contraintes dans la construction de la coque considéré comme :

- ✓ Une poutre dans l'analyse de flexion.
- ✓ Une barre dans l'analyse de la torsion.

b- Résistance locale (déformation locale)

La résistance locale c'est l'analyse des contraintes dans les éléments de la structure de la coque ou bien dans certain ensemble des ces éléments.

La contrainte totale représente la somme des contraintes partielles, (principe de superposition des contraintes). Par exemple le calcul de la contrainte normale dans la structure du double fond du navire, figure I.5, se résume dans le calcul de la :

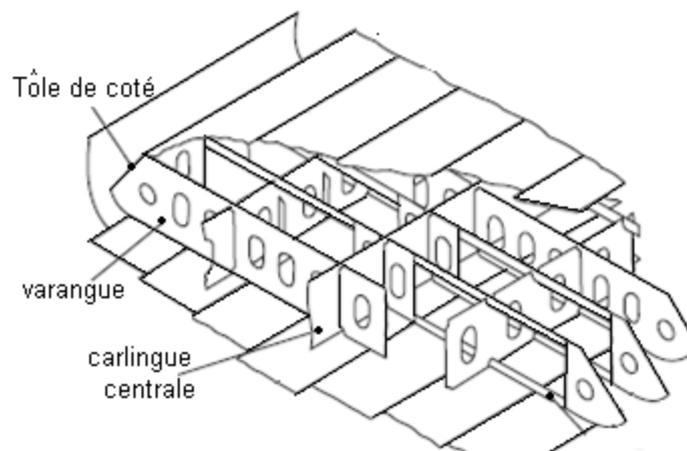


Figure I.5 : Structure du double fond.

- 1) Contrainte due au fléchissement global (σ_1)
- 2) Contrainte due au fléchissement local des carlingues (σ_2)
- 3) Contrainte due au fléchissement local des lisses (σ_3)
- 4) Contrainte due au fléchissement propre local des tôles (σ_4)

On utilisant le principe de superposition des contraintes on obtient :

$$\sigma_{total} = \pm \sigma_1 \pm \sigma_2 \pm \sigma_3 \pm \sigma_4 \quad (I.6)$$

Les déformations locales sont dues à l'application des pressions de l'eau sur le bordé, à l'application des charges sur les ponts et dans les cales, à la poussée de la ou des hélices, aux efforts exercés par les machines sur leurs fondations....

En marche sur mer agitée, interviennent en plus les chocs et forces de slamming sur la proue, les forces et couples d'inerties correspondants aux sollicitations de translation et de rotation (le tangage, le pilonnement et le roulis), figure I.6.

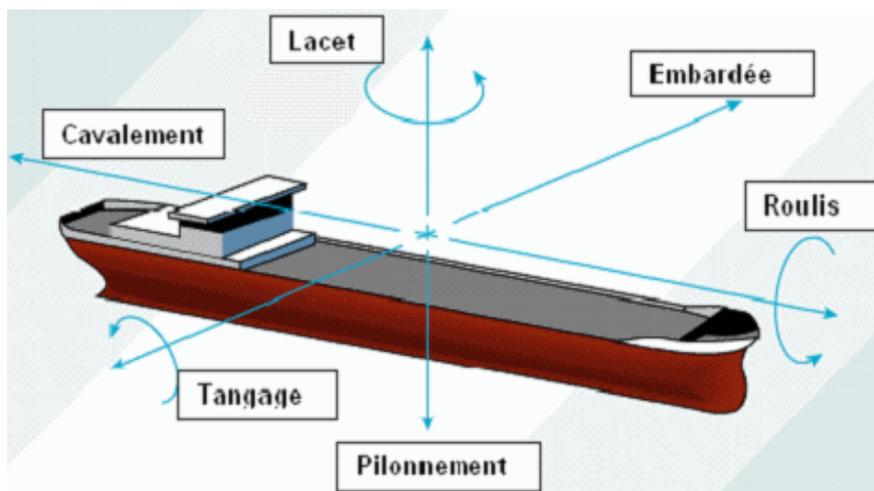


Figure I.6 : Les degrés de liberté d'un navire

Il faut prendre garde aux différences états de chargement et à l'impotence d'un arrimage des cargaisons abord afin d'éviter les contraintes excessive par un chargement judicieux.

Si on pose :

Cavalement	Embarquée	Pilonnement	Roulis	Tengage	Lacet
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6

Le vecteur de vitesse \dot{X} et d'accélération \ddot{X} sont donné par :

$$\dot{X} = \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \vdots \\ \dot{X}_6 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \ddot{X} = \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \vdots \\ \ddot{X}_6 \end{Bmatrix}$$

On peut écrire l'équation fondamentale de la dynamique pour un navire à toutes instant t sous la forme matricielle suivante :

$$[[M]+[A]]\ddot{X}+[B]\dot{X}+[C]X=[F] \quad (I.7)$$

Avec :

[M] : Matrice des masses généralisées (masses et moment des masses) dont les termes ne dépendent de la répartition des masses dans le navire.

[A] : La matrice des masse d'eau entraînée (masse ajouté)

[B] : Matrice des coefficients d'amortissement

[C] : Matrice des coefficients des rappelles hydrostatiques

[F] : Vecteur des forces généralisées

On constate que cette équation est non linéaire, l'hypothèse fondamentale qui permet de linéariser cette formule est celle des petites mouvements qui permettent de considérer les mouvements du navire comme des oscillations forcées autour d'une position qui est celle du navire en eau calme.

On sait que les forces extérieures provoquent des déformations de la coque et en même temps des efforts intérieurs.

On envisage la décomposition suivant de la déformation du navire :

- ✓ La déformation d'ensemble dans le plan longitudinal : flexion longitudinale verticale à laquelle peut être ajoutée la flexion horizontale se produit par mer oblique ;
- ✓ Les déformations dans les plans transversaux ;
- ✓ La torsion ;
- ✓ La compression longitudinale ;
- ✓ Les déformations locales.

Pour calculer la déformation et l'effort intérieur dans la construction de la coque du navire il faut connaître :

- ✓ La ou les fonctions décrivant la géométrie de la coque en particulier la répartition des matériaux et l'échantillonnage des éléments.
- ✓ La ou les fonctions décrivant les charges agissant sur la structure.

Dans l'analyse pratique de la résistance générale de la coque on considère pour les calculs des contraintes et des déformations, une poutre équivalente appelée « poutre navire » comme modèle simplifié de la coque.

Les efforts intérieurs calculés pour cette poutre peuvent être considérés avec certaines approximations comme étant les efforts intérieurs dans la coque.

I-6) Méthode de calcul

I-6-1) Calcul des efforts intérieurs

Dans l'eau immobile, dans le cas où la longueur du vague est petite ($\lambda \ll L_{pp}$) ou très grande soit ($\lambda \gg L_{pp}$) ou les actions des liquides sur un bateau sont simplement celles de l'hydrostatique, donc la théorie se prête aisément à l'analyse statique des déformations.

Dans cette condition la différence des deux forces (poids et les forces hydrostatiques) donne une charge résultante $\bar{Z}(x)$, La force résultante par unité de longueur appliqué sur la coque du navire est donnée par, figure I.7 :

$$\bar{Z}(x) = Z_0(x) - m(x).g \quad (I.8)$$

Avec $m(x)$ est la masse de la structure flottante, et $m.g$ ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) est la force du poussé hydrostatique par unité de longueur, $Z_0(x)$ représente la distribution du poids le long du navire sur 20 tranches théoriquement égaux.

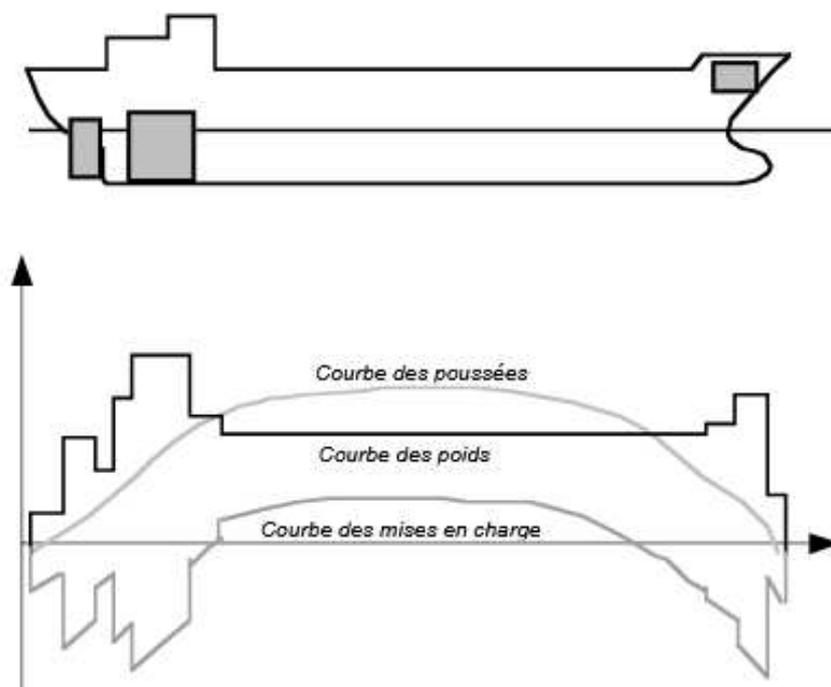


Figure I.7 : Variation de la force de poussé, du poids, La force résultante le long du navire.

L'effort tranchant au niveau d'une section donnée d'un navire est égale à la somme des mises en charge ; elle est dirigée vers le bas quand poids est supérieur à la poussée.

L'effort tranchant varie en chaque point de la longueur du navire, figure I.8. La distribution de l'effort tranchant $V(x)$ est donné par :

$$V(x) = \int_0^x \bar{Z}(0) dx \quad (I.9)$$

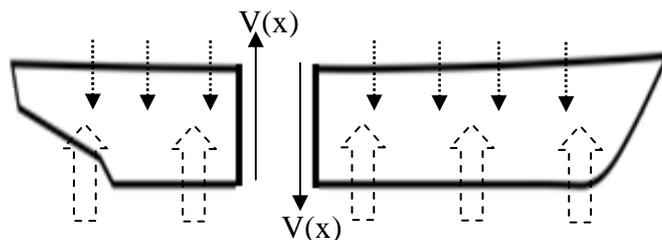


Figure I.8 : Effort tranchant $V(x)$ dans une section.

Pour les navires, les moments peuvent changer plusieurs fois de signe, ce qui se traduit par des efforts importants au niveau des éléments longitudinaux de la structure du navire (quille, carlingue, hiloires, lisses).

La variation du moment de flexion statique dans les différentes sections du navire est obtenue par l'intégration des efforts tranchants $V(x)$:

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (\text{I.10})$$

La déformée du navire au niveau des différentes sections peut être obtenue par la double intégration de l'équation différentielle de la fibre moyenne te que :

$$Y = -\frac{1}{E} \iint \frac{M(x)}{I} dx dy \quad (\text{I.11})$$

Pour estimé la variation de la contrainte de flexion σ dans n'importe quelle section transversale du navire on utilise l'expression familière suivante:

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (\text{I.12})$$

Ou y est la distance entre l'axe neutre et la fibre tendue ou comprimé, I est le moment d'inertie.

L'étude des contraintes dans la section droite d'un navire se limiterait jusqu'à ces derniers années, à celle des contraintes de flexions due au moment de flexion d'ensemble. Mais l'accroissement de la taille de certains navires (telle que : minéralier, pétrolier, métallier ...) à nécessité l'étude des contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant.

Par exemple, les efforts tranchants, qui impliquent une contrainte de cisaillement, sont subis par les cloisons situées entre un ballast d'eau de mer et une citerne de pétrole, ou bien entre un ballast et la mer. Ces efforts sont dus à la différence de poids entre les deux compartiments, figure I.9.

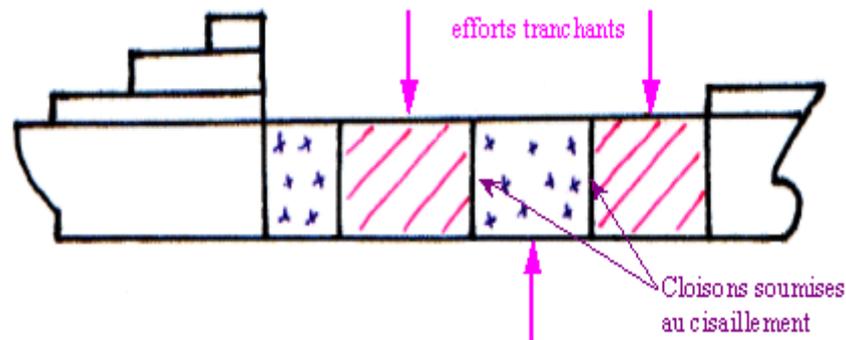


Figure I.9 : Contrainte de cisaillement au niveau des cloisons.

La pression hydrostatique s'exerce sur les cloisons, dans les mêmes cas que l'effort tranchant, en raison des différences de pression. La contrainte ainsi créée peut être amplifiée en cas de mauvaise mer par le mouvement du pétrole dans les cuves qui vient « taper » sur les cloisons.

Remarque :

- Le moment fléchissant maximale se trouve en générale en maitre couple est quand le navire se trouve au creux ou sur crête de la houle.
- L'effort tranchant maximal se trouve en générale à $\frac{1}{4}$ de la longueur L_{pp} à partir des extrémités.

Pour simplifier les calculs et pour avoir une idée concrète sur l'évolution des moments fléchissant et des efforts tranchants en eau calme et sur houle qui agissant sur la coque, on suivra les étapes suivantes :

- ❖ Construction de la courbe des poids ;
- ❖ Choix des cas de chargement ;
- ❖ Construction de la courbe de poussée ;
- ❖ Construction de la courbe des charges résultant ;
- ❖ Calcul des efforts intérieurs (effort tranchant et moment fléchissant) en eau calme ;
- ❖ Calcul des efforts intérieurs (effort tranchant et moment fléchissant complémentaire) dus aux passages de la houle.

Pour des états de chargement différent en eau calme les répartitions des efforts de poids et de poussé seront différents et par la suite les efforts intérieure le seront aussi.

Les efforts tranchants et les moments fléchissant maximaux en eau calme varient en fonction de type architectural du navire c'est-à-dire, l'emplacement de la salle des machines, de la super structure et de la forme de la carène, etc....

On peut utiliser des formules approximatives pour déterminer les valeurs maximales des moments fléchissant en maitre couple seulement par le calcul des différents composantes du moment fléchissant c'est-à-dire :

$$M_{fT} = M_{coque} + M_{machine} + M_{équipement} + M_{cargaison} + M_{réserve} + M_H + M_{réaction\ hydrostatique} \quad (I.13)$$

Les efforts tranchants maximum peuvent être aussi déterminés approximativement.

Le moment fléchissant en eau calme peut être calculé par les formules suivantes pour des longueurs L_{PP} compris entre 140 à 180 m :

❖ *Pour un Cargo*

- ✓ Si le navire est chargé à 100% de réserve avec le rapport $T/C \approx 0.7$

$$M_0(\text{ou } M_{réserve}) \approx \frac{\Delta.L}{100} \quad \text{et} \quad T_{\max} \approx \frac{4.9M_0}{L} \quad (I.14)$$

- ✓ Un navire en charge avec 10% de réserve

$$M_0(\text{ou } M_{réserve}) \approx \frac{\Delta.L}{70} \quad (I.15)$$

❖ *Pour un pétrolier*

- ✓ Avec 100% de réserve

$$M_0(\text{ou } M_{réserve}) \approx \frac{\Delta.L}{385} \quad (I.16)$$

- ✓ Avec 20% de réserve

$$M_0(\text{ou } M_{réserve}) \approx \frac{\Delta.L}{130} \quad (I.17)$$

Une fois le navire est construit, il faut communiquer aux exploitants les informations qui leur permettront de s'assurer que les contraintes admissibles ne sont pas dépassées en navigation, ces informations contiennent :

1. Les résultats des calculs des efforts tranchants, $V(x)$ et des moments fléchissant $M(x)$.
2. Les valeurs maximum admissibles des $V(x)$ et $M(x)$.

3. Les charges maximales admissibles pour lesquelles les échantillonnages des différents ponts ont été calculés.
4. Les conditions et le mode de répartition de chargement.

I-6-2) Calcul du moment d'inertie et du module de résistance

Le moment d'inertie (I) d'une surface est la capacité de résistance à une giration par rapport à un axe. Dans le cas d'un navire, c'est la capacité de résistance de la surface de la flottaison par rapport à son axe longitudinal. Cette inertie se mesure en prenant la valeur moyenne au cube, des demi-largeurs du plan de la flottaison. Les éléments étant pris au cube, on voit l'importance que peut revêtir le bau de la coque: une petite augmentation de largeur peut conduire à une importante augmentation de l'inertie, donc de la stabilité du navire concerné. Plus le moment d'inertie «I» de la surface de flottaison est grand, plus il peut «emmagasiner» d'énergie.

Pour calculer le moment d'inertie de la section de la poutre navire. On choisit tout d'abord un axe de référence pour calculer le moment d'inertie par rapport à cet axe.

Les positions et les dimensions de chaque élément sont définies et introduites dans un tableau de la forme suivante :

Nbrs des éléments	Désignation des éléments	Dimensions [cm]	Section de l'élément S_i [cm ²]	Distance à l'axe de référence Y_i [cm]	Moment statique $Y_i * S_i$ [cm ³]	Moment d'inertie/axe référence $Y_i^2 * S_i$ [cm ⁴]	Moment d'inertie propre I_{p_i} [cm ⁴]
01	Hiloire	.....	.....	.....	.....	.....	.....
02	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
03							

Donc, la distance de l'axe réel (par rapport au centre de gravité) et l'axe de référence est donné par la formule :

$$y_G = \frac{\sum S_i Y_i}{\sum S_i} \quad (I.18)$$

Et le moment d'inertie I_G de la surface maître-bau par rapport au centre de gravité est exprimé par :

$$\begin{aligned}
 I_{Axe Ré} &= \sum I p_i + \sum S_i Y_i^2 \\
 I_{Axe Ré} &= I_G + S Y_G^2 \\
 I_G &= I_{Axe Ré} - S Y_G^2
 \end{aligned}
 \tag{I.19}$$

Finalement, le moment de résistance d'une section droite est le rapport entre le moment d'inertie axial par rapport au centre de gravité et la distance la plus éloignée de cet axe.

Donc, le module de résistance maximal et minimal de la section transversale est :

$$W_i = \frac{I_G}{Y_i} \tag{I.20}$$

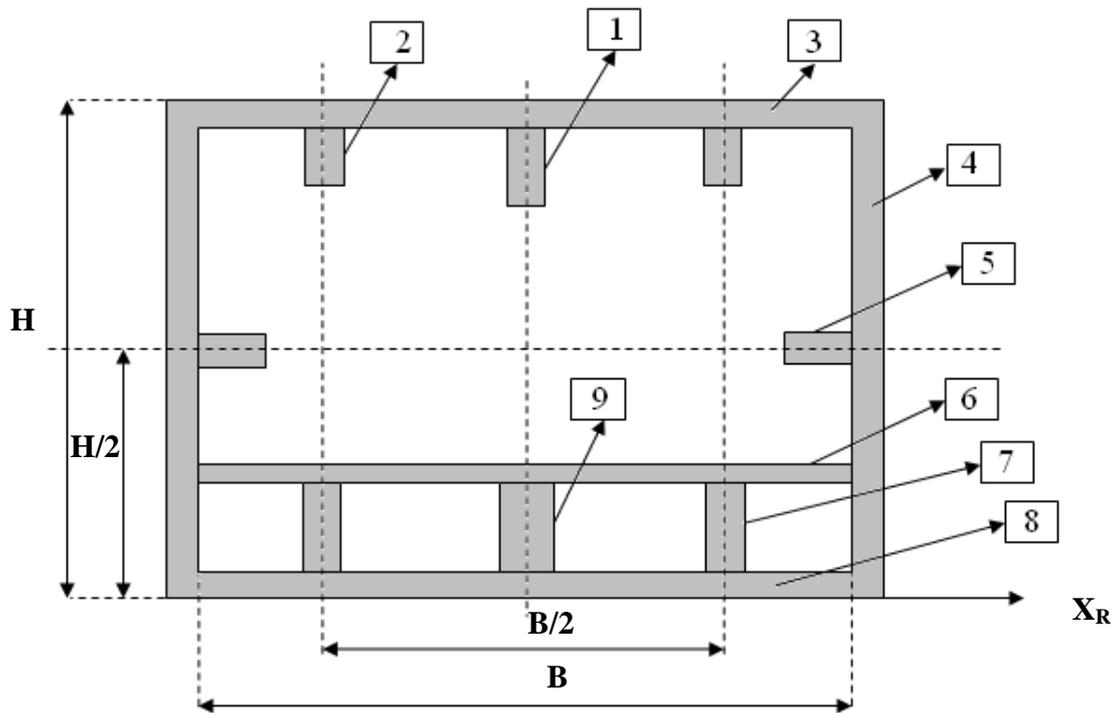
Remarque :

- Tous les éléments longitudinaux continus situés sous le pont de résistance doivent être inclus dans le calcul du moment d'inertie.
- Les trunks et surbaux longitudinaux continus doivent être inclus dans le calcul du moment d'inertie à condition qu'ils soient supportés par des cloisons longitudinales ou des hiloires de grande hauteur d'âme.
- Lorsque des hiloires longitudinales sont prévues entre plusieurs écoutilles, un facteur de réduction doit être appliqué à la section de ces éléments considérée dans le calcul du moment d'inertie. Ce facteur de réduction peut être estimé par des calculs directs qui doivent être soumis à la Société. Si aucun calcul n'est soumis, le facteur de réduction peut, en principe, être pris égal à 0,85.

I-7) Exercice d'application

Étant donné la section droite simplifiée d'un navire (ponton). Déterminer le module de résistance minimale et maximale de cette section sachant que :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	H	B
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[m]	[m]
(2,80)	(2,50)	(2, B)	(3, H)	(2,20)	(2, B)	(2, H/10)	(3, B)	(3, H/10)	10	20



Solution

	<i>Dimension (cm)</i>	<i>Aire Ai (cm²)</i>	<i>Yi (cm)</i>	<i>Ai*Yi (cm³)</i>	<i>Ai*Yi*Yi (cm⁴)</i>	<i>Ipi (cm⁴)</i>
1	2*80	160	958	153280	146842240	85333,333
2	(2*50)*2	200	973	194600	189345800	41666,667
3	2*B	4000	999	3996000	3992004000	1333,3333
4	3*H*2	6000	500	3000000	1500000000	500000000
5	2*20*2	80	500	40000	20000000	26,666667
6	2*B	4000	104	416000	43264000	1333,3333
7	2*H/10*2	400	53	21200	1123600	333333,33
8	3*B	6000	1,5	9000	13500	4500
9	3*H/10	300	53	15900	842700	250000
Σ	-	21140	-	7845980	5893435840	500717527

➤ **Position du centre de gravité**

$$Y_G = Y_1 = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = 371,14 \text{ cm}$$

et

$$Y_2 = h - Y_1 = 628,85 \text{ cm}$$

➤ **Moment d'inertie par rapport au centre de gravité**

$$I_{x1} = \sum I_{xp} + \sum A_i y_i^2 = 6394153367 \text{ cm}^4$$

$$I_{x1} = I_x + A_i y_G^2$$

$$I_x = I_{x1} - A_i y_G^2 = 3482166510 \text{ cm}^4$$

➤ **Module de résistance max et min**

$$W_{\max} = \frac{I_x}{Y_1} = \frac{3482166510}{371,14} = 9382256,902 \text{ cm}^3$$

$$W_{\min} = \frac{I_x}{Y_2} = \frac{3482166510}{628,85} = 5537301,735 \text{ cm}^3$$

II.1) Introduction

Le navire est destiné à transporter des marchandises (liquide, solides et en vrac) sur un élément liquide: l'eau. Lorsqu'un navire navigue en mer, il est soumis à divers modèles de charges de plusieurs grandeurs qui provoquent des déformations de sa structure, ainsi que des contraintes. Le concepteur structurel doit connaître aussi précisément que possible les caractéristiques de la charge appliquée sur la structure de la coque, schéma de répartition de ces efforts et le comportement de la coque dans le domaine temporel, etc. Puisque le navire flotte signifie que nous sommes en présence d'un équilibre statique entre les forces appliquées sur la coque qui s'annulent (le poids de la coque et la poussée de l'eau). Si l'on considère que le navire est en eau calme, la somme des poids est équilibrée par la poussée. Mais si l'on divise la coque en tranches, et que pour chacune de ces tranches on fasse le bilan des forces, (poids et poussée), l'égalité de départ n'est plus vérifiée. Cela est dû à la forme de la carène et à une répartition inégale des poids dans la direction longitudinale.

La première étape de conception consiste à supposer des charges exactes agissant sur la structure concernée, afin d'estimer la résistance structurelle de manière raisonnable et par conséquent de développer la conception.

Dans ce chapitre, la classification des charges appliquées à une structure de coque sera expliquée.

II.2) Catégories des charges appliquées sur la structure de la coque

Les différentes forces s'exercent tout d'abord sur les tôles des bordés, qui forment les ponts et la coque du navire que l'on peut assimiler à une « peau ». La structure intérieure du navire, que l'on peut assimiler à un « squelette », sert de charpente pour répartir et transmettre les efforts entre les bordés de pont, de muraille et de fond. La qualité de l'acier, l'échantillonnage, la forme et la répartition des différents éléments de structure donnent à la structure flottante la solidité nécessaire afin que, dans des conditions normales d'exploitation, la poutre navire reste en deçà de ses limites de déformation élastique (les déformations inévitables sous les efforts qui le chargent en service doivent rester à l'intérieur de limites non dangereuses).

Lorsqu'on veut étudier les caractéristiques de charge transmise progressivement et en continu d'un élément structurel local à un élément de support plus grand adjacent, la meilleure façon de catégoriser les charges sur la structure de la coque est la suivante :

- ✓ Charges de résistance longitudinale
- ✓ Charges de résistance transversale
- ✓ Charges de résistance locales

II.2.1) Charge de résistance longitudinale

La charge de résistance longitudinale désigne la charge concernant la résistance globale de la coque du navire, telle que le moment de flexion, l'effort tranchant et le moment de torsion agissant sur une poutre de coque. Puisqu'un navire a une forme élancée, il se comportera comme une poutre du point de vue de la déformation globale.

Les charges de résistance longitudinale peuvent être divisées en deux catégories : les charges longitudinales statiques et les charges longitudinales dynamiques.

Les charges longitudinales statiques sont induites par les inégalités locales de poids et de flottabilité dans les conditions d'eau calme. Par exemple, les différences entre le poids et la flottabilité dans la direction longitudinale provoquent un moment de flexion statique et une force de cisaillement statique, et le chargement asymétrique de la cargaison provoque un moment de torsion statique.

Les charges longitudinales dynamiques sont induites par les vagues. Lorsque le navire se trouve au sommet d'une crête de vague dans des conditions de mer de face, cela provoque un moment de flexion « accaparant » et une force de cisaillement. Dans un creux de vague, un moment de flexion et un effort tranchant « affaissés » sont ressentis, comme indiqué à la Fig. II.7. Ces charges agissent alternativement sur la poutre de coque au fur et à mesure que la vague progresse le long du navire. Dans les cas où le navire rencontre des mers obliques, un moment de torsion dynamique est produit.

II.2.2) Charges de résistance transversale

Les charges de résistance transversale représentent les charges qui agissent sur les éléments transversaux et provoquent une distorsion structurelle d'une section transversale en raison du déséquilibre des charges externes et internes, y compris les poids structurels et de chargement.

Les charges de résistance transversale incluent la pression hydrostatique sur la coque extérieure, le poids de la charge de chargement travaillant sur la structure inférieure, la pression de l'eau de ballast induisant la déformation du réservoir de ballast, etc. Par exemple, imaginons une section transversale d'un navire flottant en eau calme comme illustré à la Fig. II.1. Cette section est soumise à une pression hydrostatique due à l'eau environnante, une charge interne due au poids propre et au poids de la cargaison. Ces charges ne sont pas toujours égales les unes aux autres en tout point, par conséquent, les charges agissant sur les éléments transversaux produiront une distorsion transversale, comme indiqué par la ligne brisée de la Fig. II.1.

Lorsque l'on considère les charges transversales et les charges longitudinales, la caractéristique suivante est significative du point de vue de l'analyse de résistance : La déformation due aux charges longitudinales n'affecte pas la déformation de la section transversale. Par exemple, le moment de flexion longitudinal ou l'effort tranchant ne peuvent jamais avoir d'influence sur la déformation de la section transversale. Il est donc nécessaire de reconnaître la déformation transversale de la structure du navire due à la charge transversale, indépendamment de la déformation induite par une charge longitudinale. Les charges de résistance transversale sont couramment utilisées dans les cas où nous étudions la résistance des éléments primaires, tels que les anneaux transversaux, les cadres transversaux, etc.

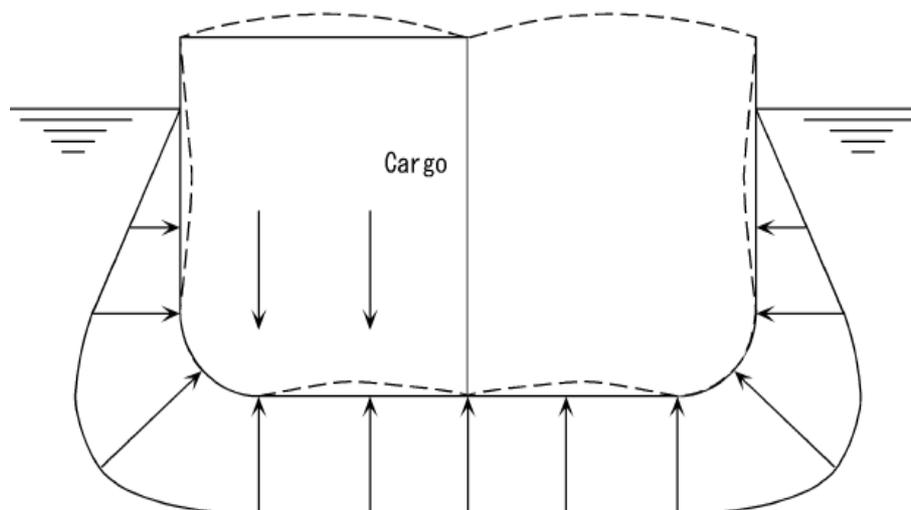


Figure II.1 : Déformation due aux charges transversale (pression hydrostatique)

Ces charges (transversales) sont classées comme suit :

➤ **Poids structurel, poids de l'eau de ballast et poids de la cargaison**

Ces charges sont des charges permanentes, c'est-à-dire des charges constantes indépendantes du temps, induites par la gravité aux centres de gravité des éléments.

➤ **Charges hydrostatiques et hydrodynamiques**

La charge hydrostatique est la pression statique de l'eau entourant une section transversale, qui agit sur la structure de la coque comme une charge externe. Une autre charge externe est la charge hydrodynamique induite par l'interaction entre les vagues et le mouvement du navire et soumet l'enveloppe extérieure du navire à une pression d'eau fluctuante. Elle se superpose à la charge hydrostatique et crée la pression totale de l'eau. Chaque société de classification donne la formule empirique pour calculer la pression extérieure fluctuante par les vagues d'une manière différente.

➤ **Force d'inertie de la cargaison ou du lest due au mouvement du navire**

La force d'inertie est induite par la force de réaction du poids propre, du poids de la cargaison ou du poids du ballast due à l'accélération du mouvement du navire. Supposons qu'un pétrolier roule parmi les vagues à pleine charge, alors la cargaison d'hydrocarbures dans la cale a un mouvement cyclique dans le sens transversal. Cela doit entraîner une pression fluctuante de la structure de la coque du réservoir en raison de la force d'inertie du mouvement de l'huile de cargaison. De plus, la pression interne est introduite non seulement par le roulis mais également par les autres mouvements du navire, tels que le pilonnement, le tangage, etc. Un phénomène similaire peut être observé lorsqu'une citerne d'huile de cargaison est partiellement remplie.

➤ **Charges d'impact**

Il existe deux charges d'impact classées comme charges de résistance transversale : le claquement et le ballotement.

Le claquement peut être classé comme une charge de résistance transversale, ainsi que comme une charge de résistance longitudinale. Cela signifie la force d'impact lorsque le bordé de coque frappe sévèrement la surface de l'eau. Par conséquent, il génère non seulement une charge longitudinale mais également une charge affectant simultanément la résistance transversale. De nombreux navires sont endommagés par des claquements,

entraînant des bosselures sur le bordé extérieur, en particulier sur le bordé arrière inférieur avant. La pression d'impact des vagues est un élément pour lequel l'approche théorique pure est très difficile, des expériences sont donc nécessaires pour estimer la pression d'impact avec une précision fiable.

Le ballotement est un phénomène où le mouvement du fluide dans le réservoir entre en résonance avec le mouvement du navire et crée une force d'impact entre la surface libre en mouvement du fluide et la structure du réservoir. Le ballotement est causé par le mouvement de la surface libre du liquide. Par conséquent, si le réservoir est entièrement rempli de liquide, le ballotement ne se produira jamais puisque la libre circulation de la surface du liquide est restreinte. Lorsque le niveau du liquide atteint une certaine partie du réservoir, le liquide entre en résonance avec le mouvement du réservoir, puis un ballotement se produit.

II.2.3) Charges de résistance locales

Les charges de résistance locales incluent les charges qui affectent les éléments de résistance locaux tels que les panneaux de coque, les raidisseurs et les constructions de connexion entre les raidisseurs. Les catégories de charge ci-dessus sont si pratiques qu'elles sont largement utilisées à des fins de conception pratique. Une charge agissant sur la structure peut être traitée indépendamment en considérant la charge transférée d'une structure locale à une structure plus grande. Par exemple, considérons le cas où le concepteur commence la conception d'une structure de fond comme illustré à la Fig. II. 2. Premièrement, la résistance des panneaux de la coque inférieure doit être déterminée en fonction de la pression d'eau latérale, deuxièmement, la résistance des raidisseurs longitudinaux, qui supportent les panneaux en question, doit être évaluée, troisièmement, la résistance des âmes transversales tenant les raidisseurs à leurs extrémités doit être estimée et enfin, la résistance globale de la structure du fond doit être discutée. Les investigations peuvent être effectuées séparément pour chaque membre en ne considérant que les amplitudes des charges qui sont transmises par chaque membre. Il s'agit d'un concept pratique, cependant, les relations dépendant du temps entre ces charges simplifiées ont été intentionnellement omises. Par conséquent, une attention particulière doit être portée, en particulier lors de l'analyse de la réponse simultanée de l'ensemble de

la structure aux charges combinées, car la phase des charges joue un rôle important dans le calcul de la réponse globale.

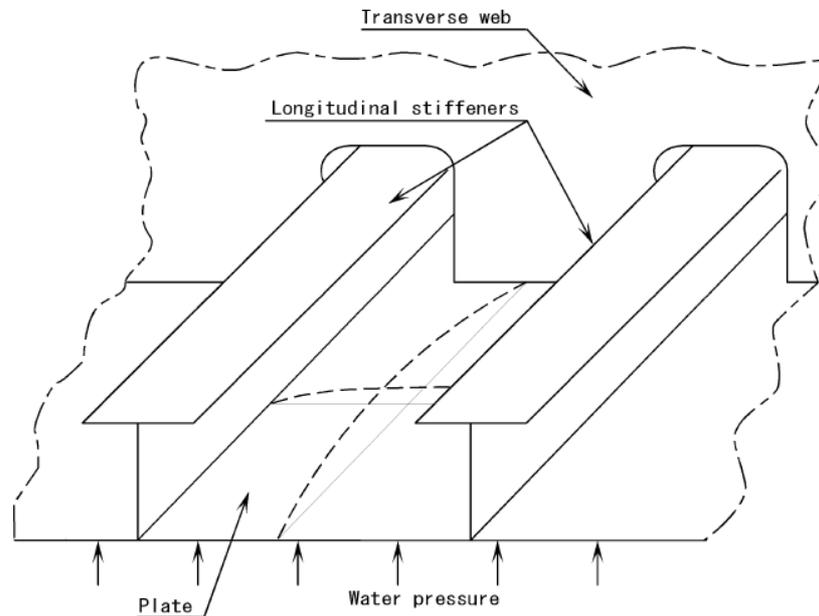


Figure II.2 : Structure de fond sous une pression de l'eau

II.3) Efforts extérieurs

La coque du navire est soumise à différentes charge pendant sa construction et son exploitation si les charges qui agissent sur la coque pendant sa construction, sa réparation son lancement sont facilement déterminées, celles qui agissent pendant son exploitation ont un caractère probabiliste qui dépend de l'état de la mer il est donc très difficile de connaître exactement le moment ou elles agissent ainsi que leurs intensité.

Pour effectuer les calculs rapide (approximatif) on prend des modèle supplémentaire par exemple on calcule la flexion quasi-statique de la coque sur la houle avec les paramètres de la houle qui donne les plus grandes sollicitations le l'ensemble des charges.

La structure du navire est formée de tout les éléments qui assure une résistance suffisante pour supporter les charge qui doit rencontrer au cour de ça vie.

Les charges agissent sur la structure du navire sont simplifier mes en réalité la coque est soumise à plusieurs charges supplémentaire de grandeur impossible a déterminé exactement.

Les efforts extérieurs qui agissent sur la coque peuvent être classés du point de vue caractère de leurs actions en efforts surfaciques ou volumiques et du point de vue action dans le temps en efforts statiques et dynamiques.

Les charges agissant sur un système structural sont généralement classées en concordance avec leurs causes. Celles produites par des contacts de surfaces sont appelées « charges surfaciques ». Les pressions (statiques et dynamiques) sont des exemples types de charges surfaciques. Si la surface de contact est très petite alors la charge est dite « concentrée », sinon c'est une charge « distribuée » ou « répartie », fig. II.3.

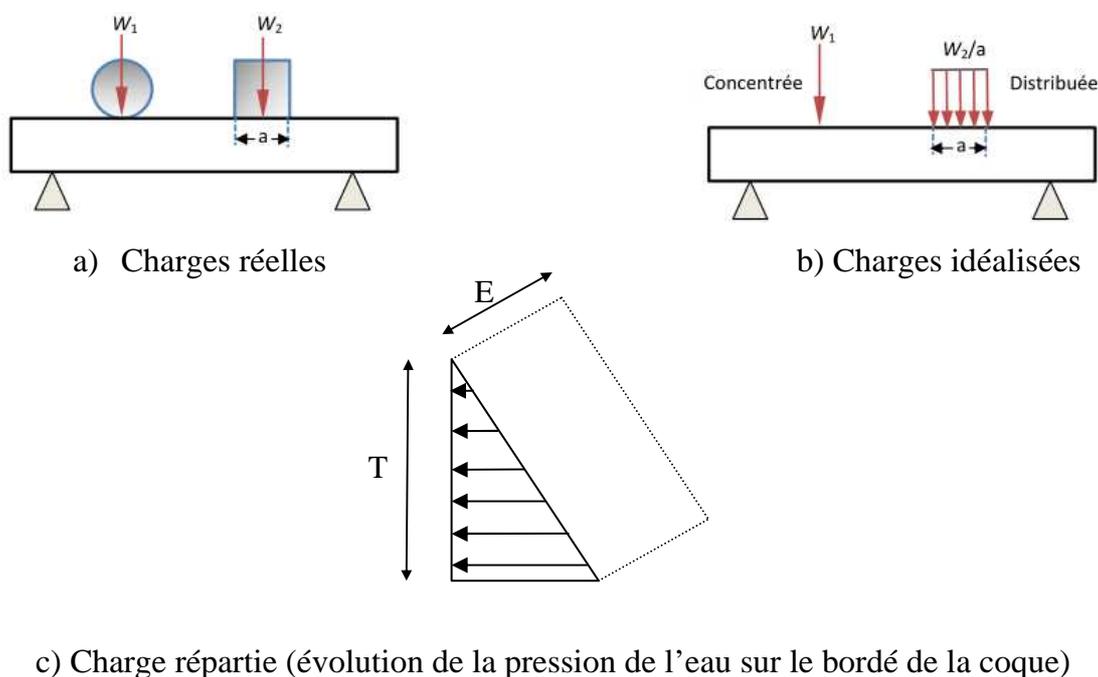


Figure II.3 : Charge agissant sur un système structural.

De ce fait, les forces extérieurs agissent sur la coque du navire sont divisés comme suit :

- ✓ Les forces superficielles ;
- ✓ Les forces massiques (volumiques) ;
- ✓ Les forces statiques ;
- ✓ Les forces dynamiques.

II.3.1) Les forces superficielles

Sont des forces agissent sur la surface de la coque du navire comme des forces normale et tangentiels, Fig. II.4.

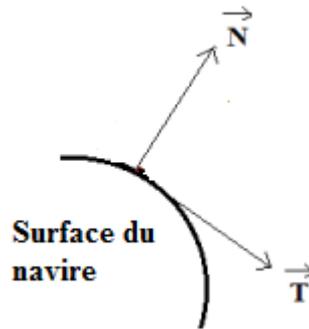


Figure II.4 : force superficielle.

Sur un élément de surface agir la pression et la contrainte tangentielle, pour la structure navale on trouve :

- la pression hydrostatique (pression de l'eau en calme) et hydrodynamique (pression de l'eau en houle) sur la partie immergée de la coque, ainsi que les charges de liquides intérieur (ex. pétrolier) on note ainsi les cargaisons constante (sacs, conteneurs...), ou en vrac (blé...).



Figure II.5 : Charge de pression du à la cargaison.

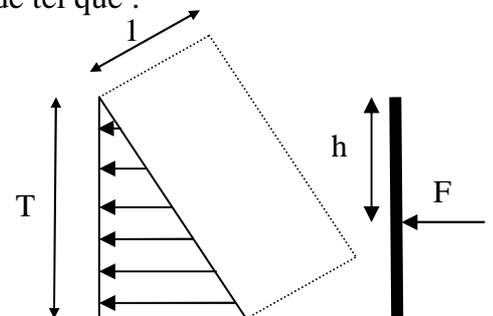
Application : Calculer la force résultante appliquée sur le bordé tel que :

$$P = \frac{F}{S} \Rightarrow F = PS$$

$$\Rightarrow F_{\text{equi surface}} = \frac{\rho}{2} gT^2 \quad (\rho = 1025 \text{kg} / \text{m}^3)$$

$$\Rightarrow F_{\text{equi volume}} = \frac{\rho}{2} gT^2 * 1$$

Cette force est appliquée au centre de gravité $1/3 T$ et $1/2$



II.3.2) Les forces massiques (volumiques)

Les charges qui dépendent du volume du corps sont appelées «charges volumiques» (exemples : les charges d'inertie, de gravitation, magnétiques etc...). Les charges volumiques sont généralement supposées distribuées sur le volume entier du corps.

Les forces volumiques sont des efforts du poids de la coque, des cargaisons et les efforts d'inerties (apparaissent pendant le mouvement du navire). Les charges surfaciques et volumiques peuvent être statistiques ou dynamiques.

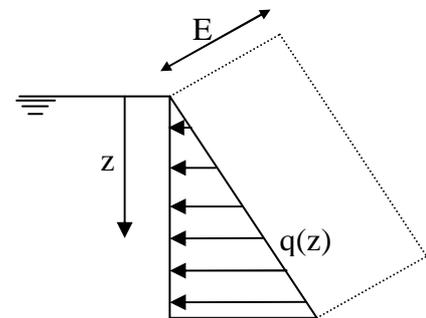
Les deux forces surfaciques et volumiques sont des forces réparties où la résultante des forces réparties c'est une force concentrée.

Les charges peuvent aussi être classées selon qu'elles soient dynamiques, statiques ou thermiques. Les charges dynamiques dépendent du temps alors que les charges statiques en sont indépendantes. Les charges thermiques sont créées par une variation uniforme ou non uniforme de la température.

Application :

Calculer la valeur de la charge linéaire q en fonction de la hauteur z (immersion) sur une poutre immergée verticalement dans un système de construction transversal.

$$\Rightarrow q_{\text{equi surface}} = \rho g z E \quad (\rho = 1025 \text{ kg/m}^3)$$



II.3.3) Les forces statiques

La charge statique peut être calculé pour le navire en eau calme est sur houle (mer agité). Les charges statiques en eau calme sont :

- Les poids ;
- La pression hydrostatique extérieure et intérieure (figure II.6),

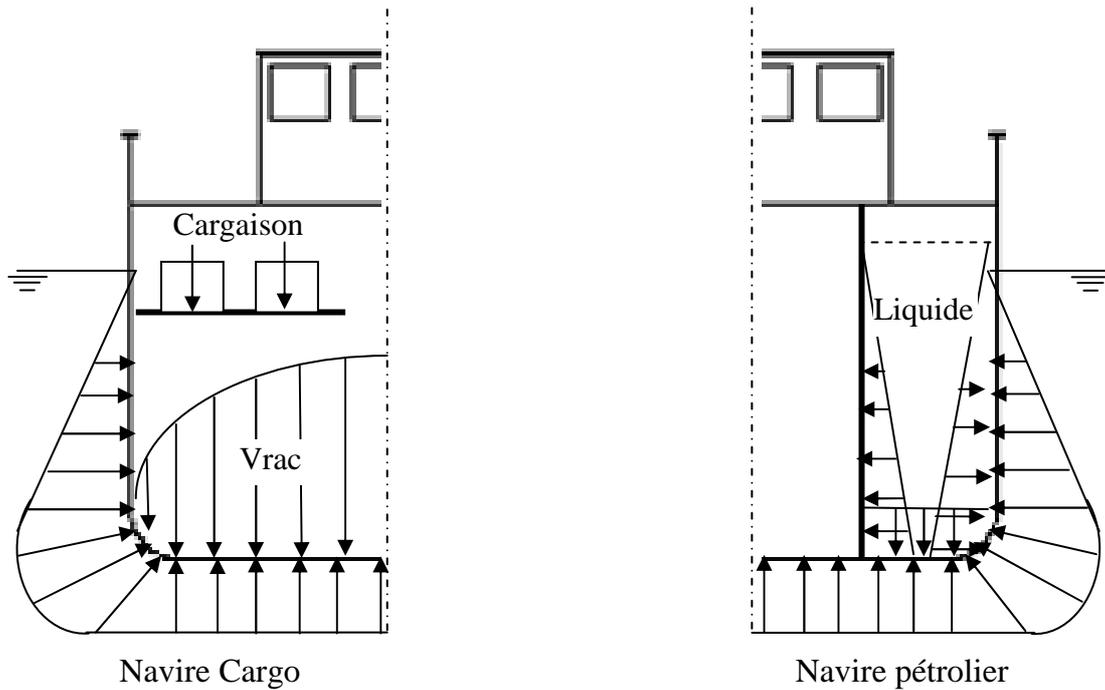


Figure II.6 : Les charges statiques appliquées sur la coque navire.

Pendant le déplacement du navire en mer il apparait deux composantes de la charge complémentaire à la charge statique qui agit en eau calme. La première concerne la répartition de la pression due à la vague. Cette charge qui est considérée comme instantanément statique, admet le cas critique lorsque le navire se trouve sur une houle de longueur λ égale environ la longueur du navire L_{PP} et spécialement lorsque le maître couple se trouve sur la crête ou le creux de la vague.

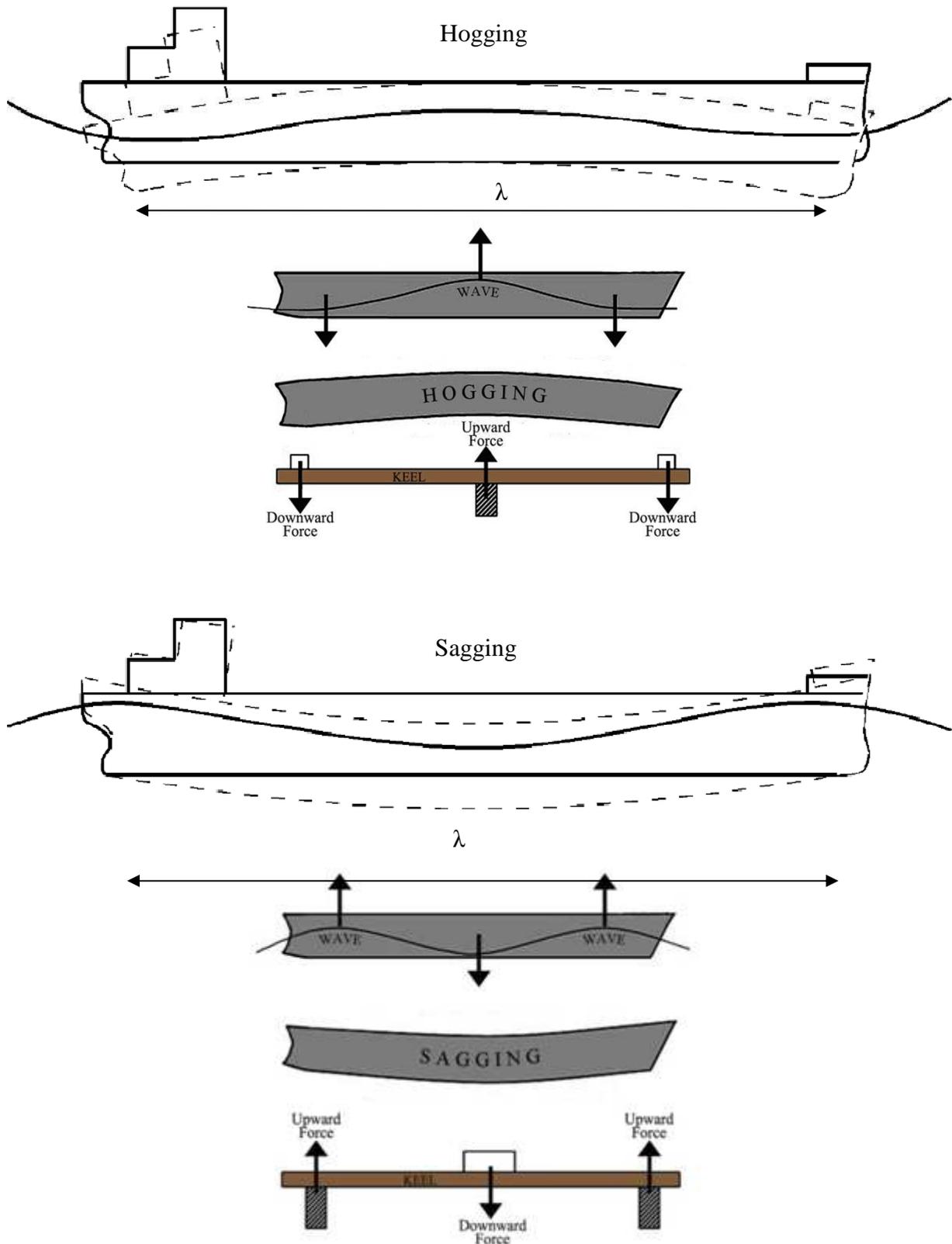


Figure II.7 : Navire sur une mer agitée.

La deuxième composante est dynamique. Elle est liée au mouvement du navire. Un navire en mouvement à six degrés de liberté, à savoir **3** translations et **3** rotations.

La coque du navire est soumise à des efforts considérables même en eau calme, ces efforts peuvent augmenter considérablement pendant la navigation sur une mer agitée ou dans les glaces. On résume sur la coque du navire agisse 3 sortes d'efforts appeler « efforts d'ensemble » qui sont crée par les poids, les réactions de l'eau et les forces d'inerties qui s'équilibre à chaque instant.

- ***Les poids***

Les sont ceux de la coque, des machines, des installations, et de la cargaison...

- ***Les réactions de l'eau***

Ce trouve au tour d'un navire immobile en eau calme, des pressions hydrostatique de grandeur et position constante pour un état de chargement donnés, connue en fonction des formes de la carène.

Pour un navire en mouvement sur mer agité (houleuse) elle dépend à chaque instant de la forme de la surface de la mer, de la position du navire par rapport à cette surface. Elle varie en grandeur et en position avec le temps.

Dans le cas général les courbes de la poussée typique peuvent prendre les cas suivant, (figure II.8) :

- 1- navire en eau calme
- 2- navire sur crête de la houle
- 3- navire au creux de la houle

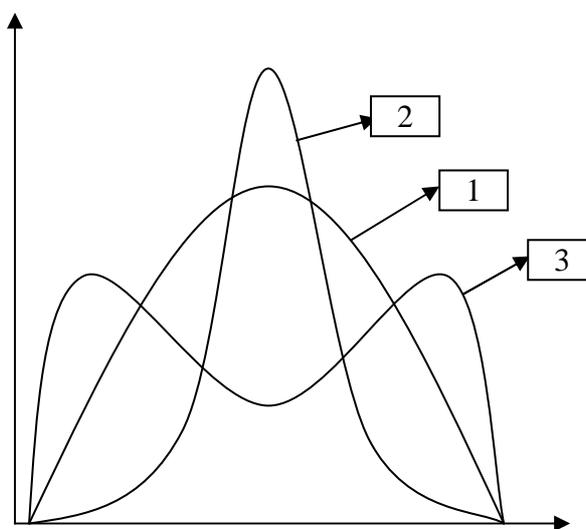


Figure II.8 : Courbes de la poussée typique.

- *Les forces d'inerties*

Les forces d'inertie dépendent des accélérations des divers points du navire. Dans la pratique on considère que le mouvement se décompose uniquement en pilonnement, oscillation de tangage et de roulis.

- *Les charges transitoires*

Lorsqu'un navire est en cale sèche, la coque repose sur des lignes de tins et est maintenue, pour les petits navires, par des accores. La poussée de l'eau est ici remplacée par la réaction des tins sur le bordé de fond.

Les charge sur cales de construction en cale sèche, figure II.9, les réactions hydrostatiques sont remplacé partiellement ou totalement pendant les calculs par des réactions d'appuis solide appeler « Tins ». La diminution de ces réactions inégale est obtenue par l'allègement de navire au maximum et en respectant le plan de pose des tins.

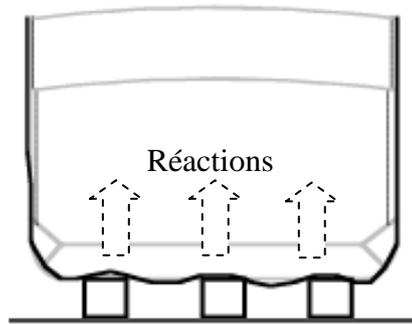


Figure II.9 : Réaction des tins sur le bordé de fond.

La stabilité et la flottabilité de la coque est assurée par le rapport entre le poids du navire (machine, équipement, coque...) et la poussée d'Archimède (déplacement) due à la pression de l'eau, figure II.10. Sur un tronçon AB on à l'équilibre statique on aura :

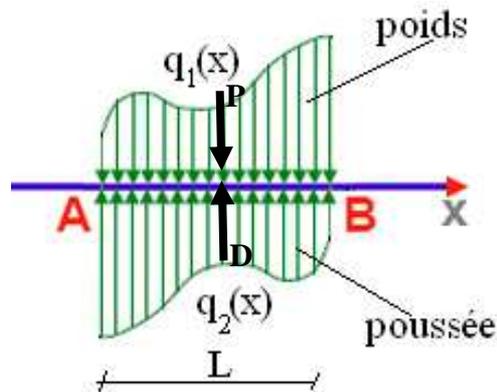


Figure II.10 : Équilibre statique de la coque navire.

Si on pose :

P : poids totale

D : déplacement (poussée)

Les conditions d'équilibre exigent :

$$\begin{aligned}\vec{P} + \vec{D} &= \vec{0} \\ \vec{M}(\vec{P}) + \vec{M}(\vec{D}) &= 0\end{aligned}\quad (\text{II.1})$$

L'équilibre d'ensemble du navire

$$\begin{aligned}P &= \int_0^L q_1(x) dx \\ D &= \int_0^L q_2(x) dx\end{aligned}\quad (\text{II.2})$$

$$\begin{aligned}|\vec{M}(\vec{P})| &= M_1 = \int_0^L q_1(x) x dx \\ |\vec{M}(\vec{D})| &= M_2 = \int_0^L q_2(x) x dx\end{aligned}\quad (\text{II.3})$$

D'où : $P=D$

$$\int_0^L q_1(x) dx - \int_0^L q_2(x) dx = 0 \Rightarrow \int_0^L (q_1(x) - q_2(x)) dx = 0 \quad (\text{II.4})$$

Si $Q(x) = q_1(x) - q_2(x)$ (Charge résultante, figure II.12)

$$\Rightarrow \int_0^L Q(x) dx = 0$$

Et, $M_1=M_2$

$$\begin{aligned}\int_0^L q_1(x) x dx - \int_0^L q_2(x) x dx = 0 &\Rightarrow \int_0^L (q_1(x) - q_2(x)) x dx = 0 \\ \text{Si } Q(x) = q_1(x) - q_2(x) & \\ \Rightarrow \int_0^L Q(x) x dx = 0 &\end{aligned}\quad (\text{II.5})$$

La représentation graphique de ces équations nous donne, figure II.11 et 12 :

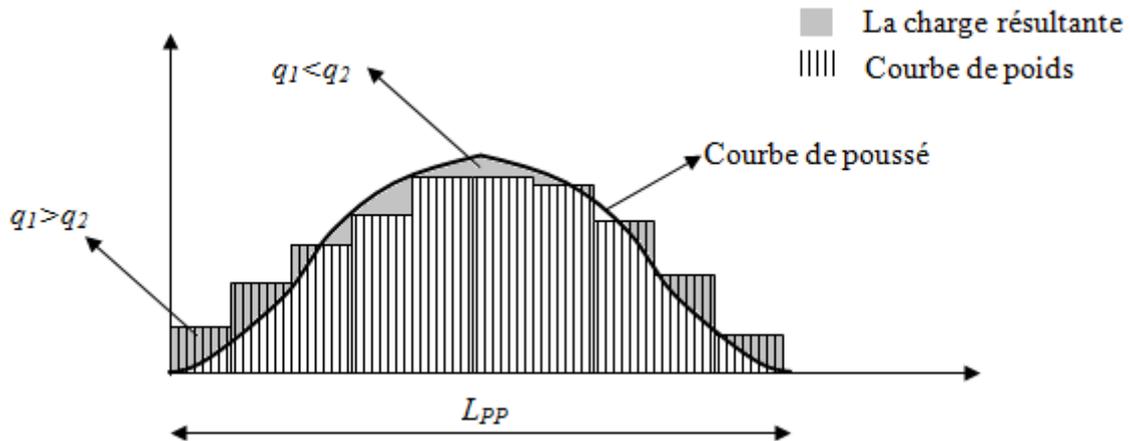


Figure II.11 : courbe de poids et de la poussée.

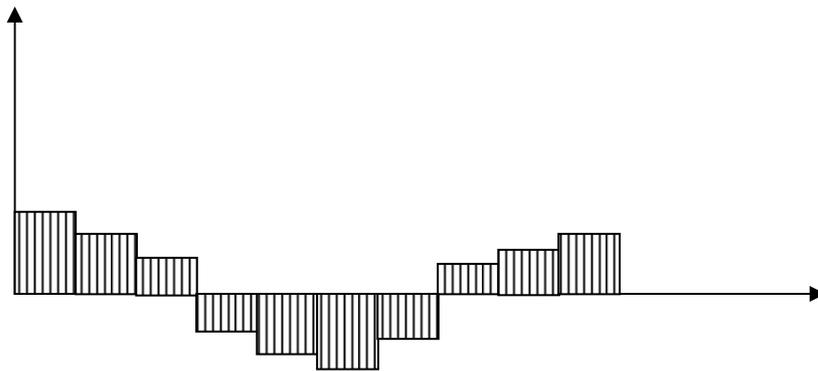


Figure II.12 : courbe de la charge résultante.

Du fait de l'équilibre d'ensemble du navire et si le calcul est juste : le totale des excès du poids sera égale au totale des excès des réactions hydrostatiques et le centre de gravité des aires totales de deux courbes de poids et de poussée soit sur une même verticale.

Dans le calcul de la charge quasi-statique pour un navire sur houle en prend la houle avec des paramètres fixés par rapport aux dimensions du navire, cette houle est appelée la houle standard, où une houle standard c'est une houle qui possède une longueur égale à celle du navire ($\lambda_{stan} = L_{PP}$) et la hauteur égale à 1/20 de la longueur du navire.

Remarque :

Il n'existe pas de houle standard universellement acceptée pour le calcul de la résistance longitudinale de la poutre navire.

La forme généralement admise est une trochoïde. Une trochoïde est une courbe obtenue en traçant le mouvement décrit par un point lié à un disque roulant (sans glisser) sur une droite, figure II.13.

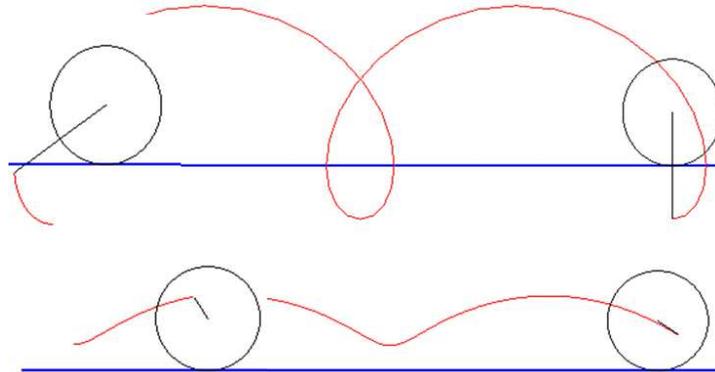


Figure II.13 : La forme généralement d'une trochoïde.

Soit un disque de rayon R roulant sans glisser sur une droite L (sur l'axe des x), le centre C se déplace parallèlement à L , et tous les autres points P dans le plan attaché au cercle forment un ensemble de points appelé trochoïde. Les équations paramétriques de la trochoïde, sont :

$$\begin{aligned} x &= R\theta - r \sin(\theta) \\ z &= r(1 - \cos(\theta)) \end{aligned} \tag{II.6}$$

Avec θ est la variable d'angle décrivant la rotation du cercle et $2r$ est la hauteur du vague.

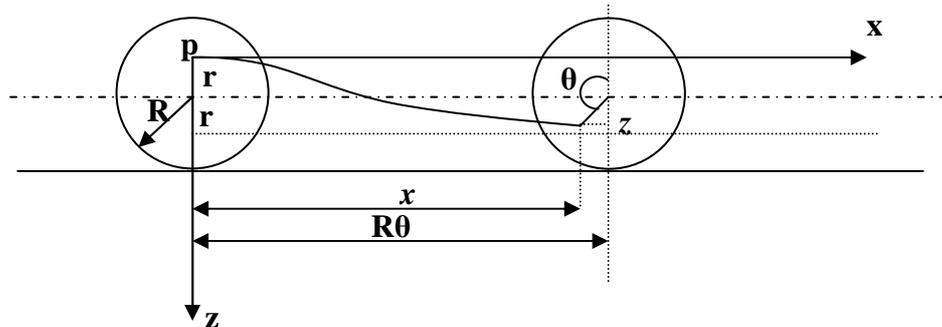


Figure II.14 : Propriété géométrique d'une courbe trochoïde.

Si $\theta = 2\pi$ le point p revient à sa position initiale est $L = 2\pi * R$

La houle standard accepter et celle qui a une hauteur égale 1/20 de sa longueur dans ce cas on a :

$$x = \frac{L}{2\pi}\theta - \frac{L}{40}\sin(\theta)$$

$$z = \frac{L}{40}(1 - \cos(\theta))$$
(II.7)

Application : Si la hauteur du vague trochoïdale égale à $\frac{\sqrt{L}}{2}$ ces deux équations devient :

$$x = \frac{L}{2\pi}\theta - \frac{\sqrt{L}}{4}\sin(\theta)$$
(II.8)

$$z = \frac{\sqrt{L}}{4}(1 - \cos(\theta))$$

II.3.4) Les forces dynamiques

On réalité la charge due a la houle à un caractère périodique et elle crée le problème de la résistance de fatigue pour la coque, sur houle inclinée on doit faire l'analyse de l'effort intérieur crée par le moment de torsion, figure II.15.

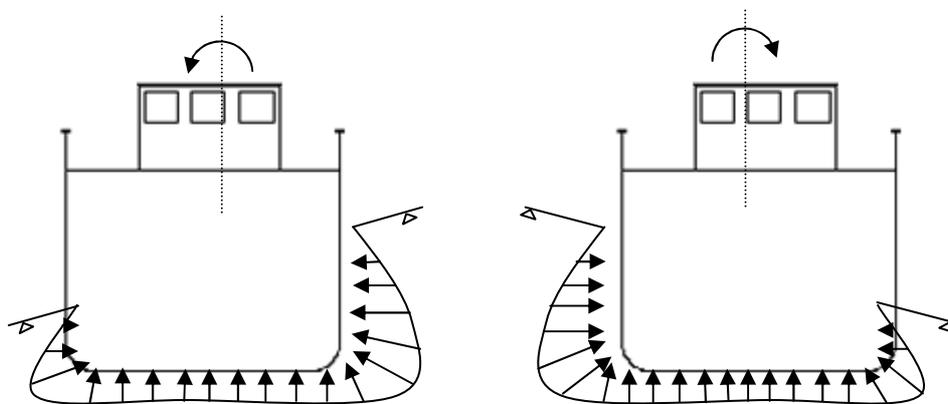


Figure II.15 : Moment de torsion due à une houle inclinée

Ou par un chargement asymétrique, figure II.16 :

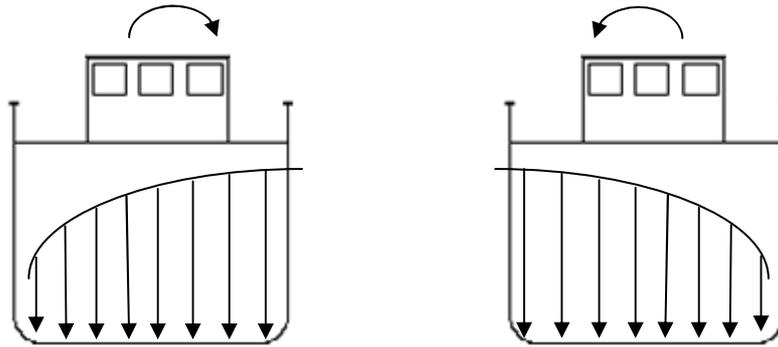
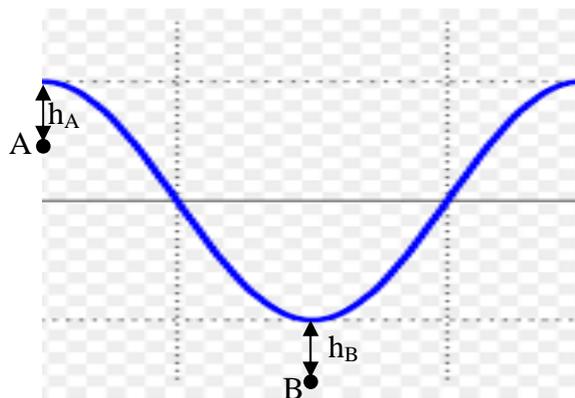


Figure II.16 : Moment de torsion due à un chargement asymétrique.

Le calcul de la charge dynamique par une méthode direct est très difficile, car le Slamming (augmentation des pressions sur les fonds par suite des ondes de chocs liées aux mouvements de pilonnement et de propulsion sur l'avant du navire) et les chocs de liquides dans les citernes remplies partiellement est un phénomène complexe et difficile à calculer.

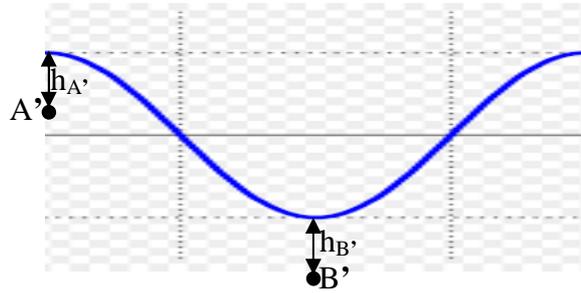
La houle est issue d'un mouvement orbital des particules d'eau. Il faut donc prendre en considération la pression dynamique, en pratique on prend en considération l'effet dynamique par l'introduction des facteurs correcteurs le déplacement du navire sur la houle.

- ✓ **Premier facteur :** La prise en considération les mouvements des particules d'eau.
- Théorie sinusoïdale :



$$\begin{cases} P_A = \rho h_A \\ P_B = \rho h_B \end{cases} \text{ Si } h_A = h_B \Rightarrow P_A = P_B \quad (\text{II.9})$$

- Théorie trochoïdale :



$$\begin{cases} P_{A'} < P_A = \rho h_A \\ P_{B'} > P_B = \rho h_B \end{cases} \text{ Et pour } h_{A'} = h_{B'} \Rightarrow P_{B'} > P_{A'} \quad (\text{II.10})$$

- ✓ **Deuxième facteur:** La prise en considération des mouvements oscillatoires du navire.

Parmi les six mouvements du navire deux sont plus importants pratiquement : le pilonnement et le tangage.

Pendant le mouvement de pilonnement, figure II.I17, on a :

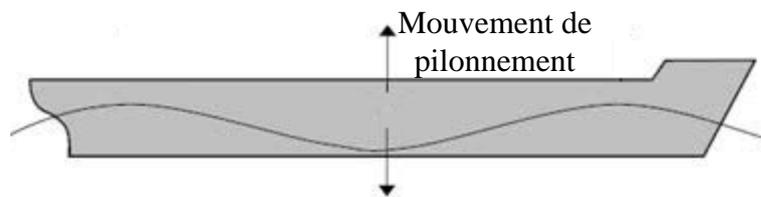


Figure II.17 : Mouvement de pilonnement

Le déplacement δ dans la direction \uparrow (vers le haut) est donné par :

$$\delta = \delta_{statique} - \delta_{dynamique} \quad (\text{II.11})$$

Le déplacement δ dans la direction \downarrow (vers le bas) est donné par :

$$\delta = \delta_{statique} + \delta_{dynamique} \quad (\text{II.12})$$

Pendant le mouvement de tangage :

- Le couple M est donné par, figure II.18 :

Au point A :

$$M = M_{statique} + M_{dynamique} \quad (\text{II.13})$$

Au point B :

$$M = M_{statique} - M_{dynamique} \quad (\text{II.14})$$

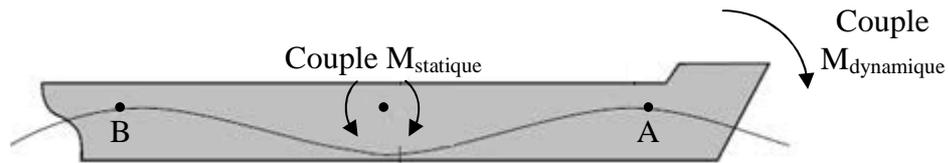


Figure II.18 : Mouvement de tangage, (cas 1)

➤ Le couple M est donné par, figure II.19:

Au point A :

$$M = M_{statique} - M_{dynamique} \quad (II.15)$$

Au point B :

$$M = M_{statique} + M_{dynamique} \quad (II.16)$$

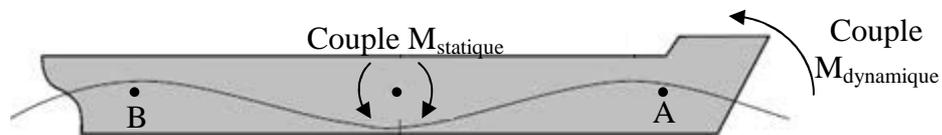


Figure II.19 : Mouvement de tangage, (cas 2)

Pour le navire à cargaison lourde (par exemple un minéralier) le mouvement de roulis doit être analysé. Une position basse de centre de gravité de la cargaison entraîne une réduction de la période de roulis.

La petite valeur de la période n'est pas avantageuse pour la construction et aussi pour l'équipage. Pour ce type de navire la condition suivante doit être assurée :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\Delta \cdot h}} \geq T_{adm} \quad (II.17)$$

Avec :

T : La période réelle

I : Le moment d'inertie de la masse du navire (inertie massique de roulis)

Δ : Déplacement

h : Hauteur métacentrique

Avec l'inertie massique de roulis égale à :

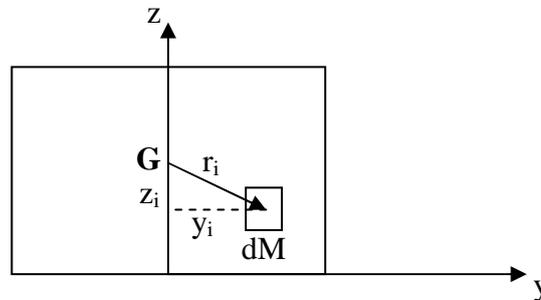
$$\begin{aligned} I_x &= \int dM r_i^2 \\ r_i^2 &= y_i^2 + z_i^2 \\ I_x &= \int dM (y_i^2 + z_i^2) \end{aligned} \quad (II.18)$$

Après développement :

$$I_x = \frac{1}{g} \sum [w_i (y_i^2 + z_i^2)] + \sum I_i \quad (\text{II.19})$$

w_i : Poids de l'ième élément

I_i : Moments d'inertie de l'ième élément par rapport à son centre de gravité propre



La même chose pour le moment de tangage :

$$\begin{aligned} I_y &= \int dM r_i^2 \\ r_i^2 &= x_i^2 + z_i^2 \\ I_y &= \int dM (x_i^2 + z_i^2) \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

Pour le moment de Lacet :

$$\begin{aligned} I_z &= \int dM r_i^2 \\ r_i^2 &= x_i^2 + y_i^2 \\ I_z &= \int dM (x_i^2 + y_i^2) \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

Quelle que période typique de roulis :

Type de navire	T _{adm} [sec]
Passager	20-25
Cargo passagers	10.5-14.5
Cargo	9-13
Tanker (pétrolier)	9-10
Chalutier	5.5-7

Remarque :

Les sollicitations sur la poutre navire sont dues aux :

- A la distribution longitudinale des deux systèmes de sollicitation verticales (poids-poussé) en eau calme ;
- Aux charges additionnelles dues aux passages d'un train de vagues ;

- c) Aux charges dues en plus aux vagues causer par le navire lui-même s'il navigue en eau calme.
- d) Aux charges dues à la variation de la distribution des poids causer par l'accélération du navire en mouvement.

Dans le calcul de la résistance général du navire en tient compte des deux cas a et b, les deux dernier cas (c.-à-d. c et d.) engendre des efforts moins importantes et ne sont pas prêt en considération.

II.4) Effort intérieurs

Suit aux chargements extérieurs, il se créé des efforts intérieurs qui ont tendance à garder l'équilibre statique de la coque. Les efforts intérieurs peuvent être déterminés par la méthode des sections. On peut déterminer la grandeur de ces efforts en remplaçant la coque par un modèle homogène de poutre et en considérant une section quelle conque perpendiculaire à l'axe longitudinal avec une résultante de force « R » et due moments « M », figure II.20.

On projetant les vecteurs résultantes force et moment sur les trois axes x , y , z on obtient :

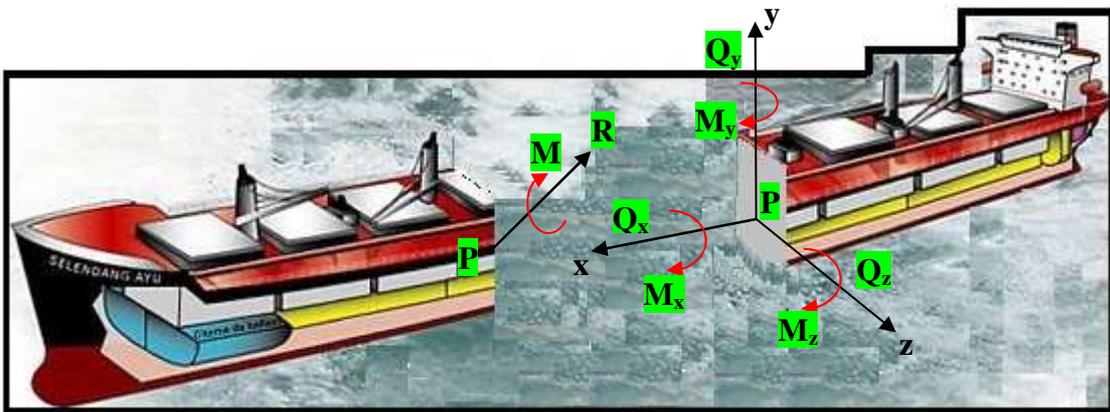


Figure II.20 : Les efforts intérieurs dans une section arbitraire.

Avec :

Q_x : Force axiale longitudinale (effort normal).

Q_y, Q_z : Forces transversales suivant y et z (effort tranchant)

M_x : Moment de torsion (M_t)

M_y, M_z : Moments de flexion dans les directions y et z

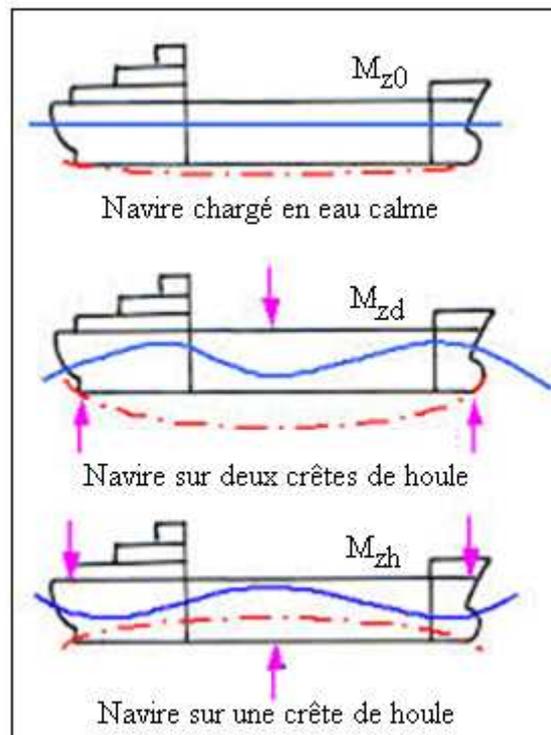
Du point de vue résistance, les efforts prises en considération sont la force transversale Q_y , le moment de torsion M_x et le moment de flexion M_z .

La réglementation est basée sur la division logique du moment M_z en deux parties :

- Le moment de flexion en eau calme, M_{z0}
- Le moment de flexion dans la houle, M_{zh} ou M_{zd}

Tel que :

$$M_z = M_{z0} + M_{zh} + M_{zd} \quad (\text{II.22})$$



La composante du moment, M_x apparait lorsqu'il y'a une inégalité de la répartition de pression hydrostatique dans les deux partie bâbord (gauche) et tribord (droite). Cette inégalité aura lieu à cause, figure II.21 :

- Une mal répartition de la cargaison,
- Une houle irrégulière ou bien une houle longitudinale avec un angle de cap par rapport au fond de la vague (cap : direction vers laquelle le bateau est orienté) : L'onde génère non seulement un moment de flexion déformant le navire dans un plan vertical longitudinal mais également un moment de flexion travaillant dans le plan horizontal, en raison des forces horizontales agissant sur la coque latérale. De plus, la vague provoque un moment de torsion dû à la variation de la surface de la vague à différentes sections le long de la longueur du navire. Si les charges de

résistance longitudinale ci-dessus dépassent la limite supérieure de résistance longitudinale de la coque, la coque sera pliée ou tordue. Par conséquent, la charge de résistance longitudinale est l'une des charges les plus importantes lors du calcul de la résistance globale d'une structure de coque.

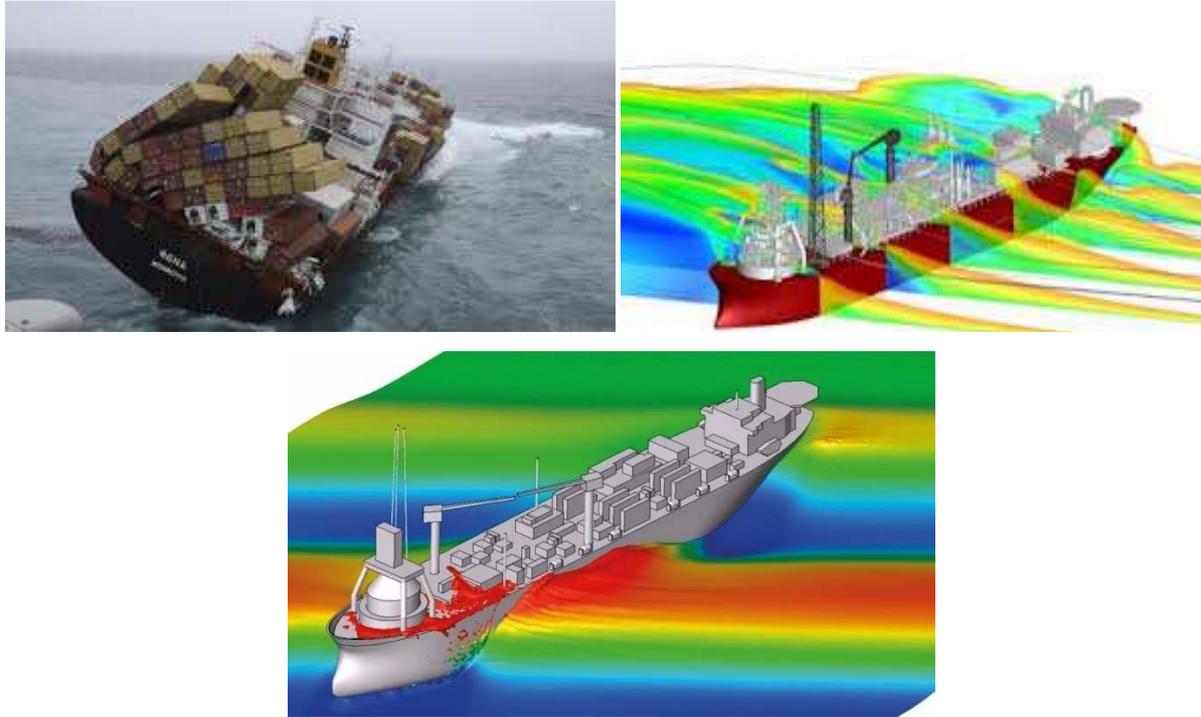


Figure II.21 : Répartition asymétrique de pression au tour du navire.

En pratique pour simplifier les calculs on décompose l'effort intérieur en deux composantes :

- a- L'effort intérieur en eau calme : comme fondamentale.
- b- L'effort intérieur sur houle : comme supplémentaire.

Si on néglige les effets dynamiques le moment de flexion longitudinale statique « M_t » auquel est soumis le navire à la mer peut être considéré comme la somme des deux composantes :

- a- Le moment fléchissant en eau calme M_0
- b- Le moment fléchissant due du passage de la houle M_h

Le moment dû à la différence de déplacement sur la longueur du navire entre les conditions de navigation en eau calme et à la houle, donne :

$$M_t = M_0 + M_h \quad (\text{II.23})$$

La même chose pour les efforts tranchant :

$$T_t = T_0 + T_h \quad (\text{II.24})$$

Les deux composantes du M_t fléchissant statique ne sont pas influencées par les mêmes facteurs :

- Le moment fléchissant en eau calme dépend de la répartition des poids sur la longueur du navire (répartition des poussées)
- Le complément du moment fléchissant dû au passage de la houle ne dépend que des formes du navire.

Dans les sections transversales de la coque agissent des moments de torsion unitaires, par leurs sommation dans la direction longitudinale, le moment de torsion totale est :

$$M_x = M_T = \int_0^x m_t d\xi \quad (\text{II.25})$$

II.5) Efforts et contraintes sur la structure du navire

II.5.1) Dans le cas statiques

Les contraintes et les forces appliqués sur la coque du navire sont mesurées lorsque le navire n'est pas en mouvement (en cale sèche). Elles sont souvent produites par une mauvaise distribution longitudinale des poids.

Même si le poids total du navire est supporté par la poussé, ces forces peuvent ne pas être distribuées de façon homogène sur toute la longueur de navire. Si les forces de flottaison sont condensées au milieu de navire et que les extrémités sont chargées, le navire aura tendance à fléchir aux extrémités avant et arrière alors que la partie du milieu aura tendance à s'élever (où la coque du navire forme un arc), figure II.7. Dans cette condition la structure de pont seront en tension alors que la structure du fond sera en compression. Par contre si les forces de flottaison sont condensées aux extrémités du navire et que le milieu est chargé, le navire aura tendance à fléchir pour former un contre arc, figure II.7. Dans cette situation, les éléments de structure du pont seront en compression alors que les éléments du fond seront en tension. L'arc et le contre arc peuvent être amplifiés par le mouvement des vagues qui circulent le long de la coque.

Les efforts causés par les contraintes produites par ces deux phénomènes peuvent être calculés en utilisant le tableau des courbes de chargement, le tableau des courbes d'efforts de cisaillement et le tableau des moments de fléchissement.

II.5.2) Dans le cas dynamiques

Pendant la navigation de navire en mer certaines situations provoquent des contraintes supplémentaires sur la structure de la coque. Les contraintes supplémentaires sont produites pendant la navigation dans une mer agitée, par l'effet des vagues sur la coque. Le talonnement et l'effet de soufflet sont les principales causes de la création de ces contraintes.

- Le talonnement : Si le navire navigue dans une mer agitée. Il peut arriver que le soulèvement de la partie avant du navire coïncide avec un creux de vague (proue émerge de l'eau). Lorsque la proue entre de nouveau dans l'eau, elle subisse un choc très important qui va créer la contrainte de talonnement, figure II.22. Cette contrainte se produit aussi sur la partie arrière du navire, mais à un degré moindre.

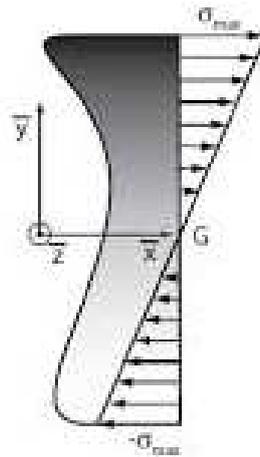


Figure II.22 : Diagramme de la contrainte due à la flexion de la partie avant du navire.

- L'effet de soufflet : Excitation des deux parties avant et arrière du navire par les vagues longitudinales provoque une égalité de la pression qui tend à pousser les tôles du bordé alternativement vers l'intérieur et vers l'extérieur.

Pour cela la structure de la partie avant du navire doit être renforcée afin d'éviter le pliage et l'endommagement du bordé sous l'effet des contraintes de talonnement et pour prévenir un mouvement exagéré du bordé de la coque.

II.6) Les lignes d'influences

Une ligne d'influence est la représentation graphique de la variation d'intensité d'un effort (moment de flexion, effort tranchant ou réaction d'appui, par exemple), à un emplacement donné (section), due à une force unitaire ($P=1$) mobile traversant la structure. Les lignes d'influence constituent un outil particulièrement efficace pour l'analyse de l'effet des forces mobiles qui peuvent avoir différentes positions d'application sur la structure. Le cas des bordés (partie immergée) est l'exemple typique de cette situation dans laquelle les charges des vagues se déplacent sur la structure. Auparavant, les lignes d'influence étaient abondamment employées pour le dimensionnement des structures. Leur utilisation a diminué en raison du recours de plus en plus systématique au calcul numérique des éléments finis par ordinateur. Cependant, leur importance reste entière, au moins du point de vue qualitatif, car les lignes d'influence permettent par exemple d'identifier d'un seul coup d'œil sur les configurations de charge les plus défavorables.

Donc les lignes d'influence décrivent l'influence de la position des charges mobiles sur la valeur d'un effet (R, Q ou M) dans une section déterminée; signification opposée à celle des diagrammes ordinaires.

	Ligne Influence	Diagramme
Position de la charge	Variable	Fixe
Position de la section	Fixe	Variable

Les lignes d'influence permettent de calculer assez facilement les effets élastiques produits par les chargements les plus divers. Elles sont plus particulièrement utiles dans la recherche des valeurs extrêmes de ces effets et des positions du chargement qui les provoquent.

II.7) Méthodes de détermination des lignes d'influence

II.7.1) Méthode directe

Elle consiste en règle générale à chercher l'expression analytique de l'effet élastique étudié dans la section considérée sous l'effet d'une charge unité. La position de la charge

est considérée comme la variable de l'expression cherchée, c'est-à-dire l'équation de la ligne d'influence de l'effet élastique étudié dans la section considérée. La ligne d'influence est tracée à partir des valeurs obtenues (coefficients d'influence) pour plusieurs positions de la cause (charge).

II.7.2) Méthode cinématique

La méthode est basée sur le théorème des travaux virtuels. Pour obtenir la ligne d'influence d'une grandeur R , M , N , Q on supprime la liaison lui correspondant et on la remplace par une inconnue. Avec la suppression d'une liaison, externe ou interne, le système isostatique devient alors un mécanisme à un degré de liberté, pouvant se déplacer sans se déformer. On applique ensuite au mécanisme un déplacement virtuel, c'est-à-dire très petit et compatible avec les liaisons restantes. La configuration obtenue représente la ligne d'influence cherchée. L'échelle réelle du diagramme s'obtient en calculant l'ordonnée d'un point.

II-8) Exercice d'application

Considérons la poutre simplement appuyée de longueur L . cette poutre est chargée par une force P verticale, à la distance « a » de l'appui A . Le calcul des différents efforts et moments dans une section droite (S) située à la distance x de l'appui A s'effectue comme suit :

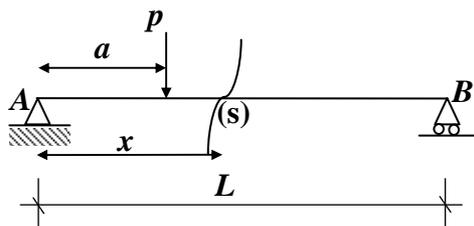


Figure II.23 : Exemple d'une charge mobile sur une poutre sur appuis simples.

On utilisant les équations de la statique, les deux réactions R_A et R_B valent :

$$R_A = P \frac{L-a}{L} \quad \text{et} \quad R_B = P \frac{a}{L}$$

✓ Section I : $x \leq a$

L'effort tranchant est égal : $T = P \frac{L-a}{L}$

Le moment fléchissant, soit : $M = R_A x = Px \frac{L-a}{L}$

✓ Section 2 : $x \geq a$

L'effort tranchant est calculé comme suit : $T = R_A - P \Rightarrow T = -P \frac{a}{L}$

Le moment fléchissant est donné par : $M = R_A x - P(x-a) = Pa \frac{(L-x)}{L}$

Considérons maintenant une charge unité verticale ($P=1$) pouvant se déplacer le long de la poutre, où « a » est variable. Cette charge unité produit un certain nombre d'effet élastique tels que réaction d'appui, effort tranchant et moment fléchissant.

➤ **Ligne d'influence de la réaction R_A**

$$R_A = 1 \frac{L-a}{L} \text{ Puisque } P=1$$

La fonction d'influence est donc : $f(a) = 1 - \frac{a}{L}$ avec a variant de 0 à L

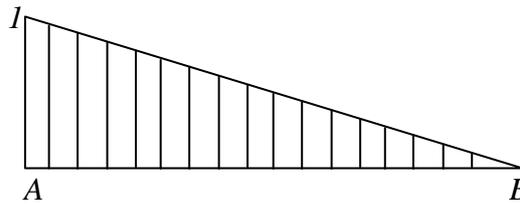


Figure II.24 : Ligne d'influence de la réaction R_A .

➤ **Ligne d'influence de l'effort tranchant**

$$\text{Nous avons : } \begin{cases} T = 1 \frac{L-a}{L} & \text{si } a > x \\ T = -P \frac{a}{L} & \text{si } a < x \end{cases}$$

La ligne d'influence de l'effort tranchant se compose de deux segments de droites parallèles.

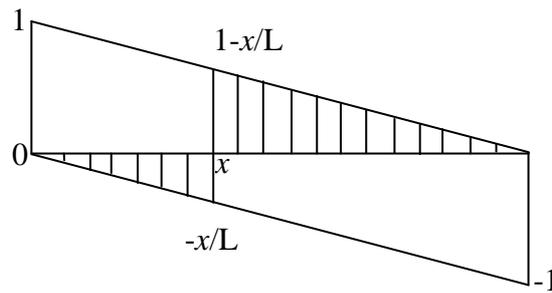


Figure II.25 : Ligne d'influence de l'effort tranchant.

➤ **Ligne d'influence du moment fléchissant**

Nous avons :

$$\begin{cases} M = \frac{x(L-a)}{L} & \text{si } a > x \\ M = \frac{a}{l}(L-x) & \text{si } a < x \end{cases}$$

La ligne d'influence se compose de deux segments de droites.

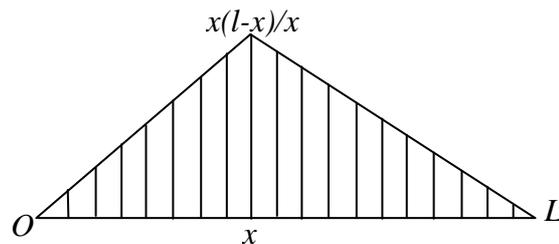


Figure II.26 : Ligne d'influence du moment fléchissant.

Remarque :

Si, au lieu d'une force unité une force d'intensité P était appliquée, on obtiendrait l'effet correspondant en multipliant par P la valeur de l'ordonnée précédente.

III.1) Introduction

La répartition non uniforme des poids et des poussées du navire en longueur engendrent des contraintes importantes sur la coque qui se traduisent par des déformations, voire des fissures des éléments de la structure, pouvant évoluer jusqu'à des ruptures.

Plus le navire s'enfonce dans l'eau, plus la pression de poussée (hydrostatique) est importante (ρgh) pour cela les dimensions (échantillonnage) des éléments de structure les plus immergés est plus important. Les éléments dans la direction transversale qui renforcent la structure de la coque, sont les varangues, membrures, goussets et les barrots de ponts. Sous le poids important du chargement, ces raidisseurs auront tendance à se déformer.

En eau calme, pour l'ensemble du navire il y a équilibre entre la poussée et le poids, mais si l'on considère une section quelconque dans la direction longitudinale du navire, cette égalité n'est plus vérifiée. Aussi, dans l'exemple d'un navire léger, il y a un excès de poids sur les poussées. A l'avant, le guindeau, les ancres, les chaînes, le local technique, les caisses ; à l'arrière, la machine, l'arbre porte hélice, l'hélice, l'appareil à gouverner ou le système de giration, représentent des poids importants qui ne sont pas complètement équilibrés par les poussées. Dans la partie centrale du navire, toujours léger, il y a un excès de la poussée sur le poids. Cela se traduit par la naissance de deux types de contraintes : les efforts tranchants (tendance au cisaillement) et les moments de fléchissant (tendance à la flexion).

III.2) Construction de la courbe des poids (distribution des poids)

La courbe des poids montre la répartition des poids du navire en longueur, les ordonnées de cette courbe représentent dans une échelle donnée les efforts des poids agissant sur une unité de longueur. Pour la construction de la courbe on divise la longueur totale du navire en 20 coupe théoriquement égaux, et pour simplifier les calculs on considère que les poids sont répartis régulièrement dans l'intervalle de chaque couple.

Pour la construction on peut diviser le poids du navire léger (NL) en 4 parties :

-
-
- Coque métallique CM ;
 - Appareil propulsive AP ;
 - Compliment de la coque CC (tuyauterie, câblage, bois...)
 - Superstructure SP.

Remarque :

Le déplacement total du navire est calculé par la formule suivante :

$$\Delta = DWT + NL \quad (\text{III.1})$$

Avec :

DWT : Est le port en lourd (Dead Weight), il varie avec la variation de la cargaison et l'équipage.

NL : Est le poids du navire lège, il ne change pas avec la changement de la cargaison et l'équipage, il est calculé par expression suivante:

$$NL = CM + AP + CC + SP \quad (\text{III.2})$$

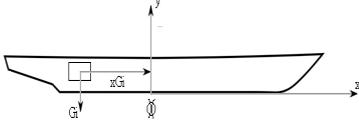
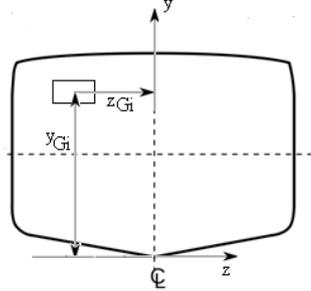
Il existe plusieurs méthodes pour la construction de la courbe des poids :

III.3) Courbe de poids de la coque métallique

Il ya plusieurs méthode pour la construction de la courbe de poids de la coque métallique.

III.3.1) Méthode exacte

Cette méthode peut être utilisée pratiquement pour la construction de la courbe de poids de la coque métallique déjà construite, ainsi si on connus toutes les dimensions des éléments de la construction (épaisseur, largeur, hauteur...), on peut dresser le tableau ci-dessous sur lequel on peut déterminer le poids totale de la coque métallique, le centre de graviter par rapport au maitre couple dans les deux directions x et y :

N°		Poids propre de l'élément G_i [T]	y_{Gi} [m]	Moment statique $G_i * y_{Gi}$ [Tm]	x_{Gi} [m]	Moment statique $G_i * x_{Gi}$ [Tm]
1	Varangue Carlingue centrale Carlingue latérale					
2						
3						
		$G = \sum G_i$		$M_y = \sum G_i * y_{Gi}$		$M_x = \sum G_i * x_{Gi}$

Donc, le centre de graviter par rapport au maitre couple est donné par :

$$y_G = \frac{M_y}{G} \text{ et } x_G = \frac{M_x}{G} \tag{III.3}$$

III.3.2) Méthode approximative

Si la coque métallique n'est pas encore construite, est si on connue le poids total de la coque métallique et son centre de gravité par rapport au maitre couple on peut utiliser des méthodes approximatives pour la construction de la courbe de poids de la coque.

a) Courbe de poids en trapèze

Cette méthode nous permet de tracer la répartition des poids du navire en longueur. Dans cette méthode en doit divisé notre navire en trois partie (avant, central et arrière). Les données nécessaires pour tracer la courbe de poids en trapèze sont G (le poids total de la coque métallique), L_{pp} , X_G et C_b

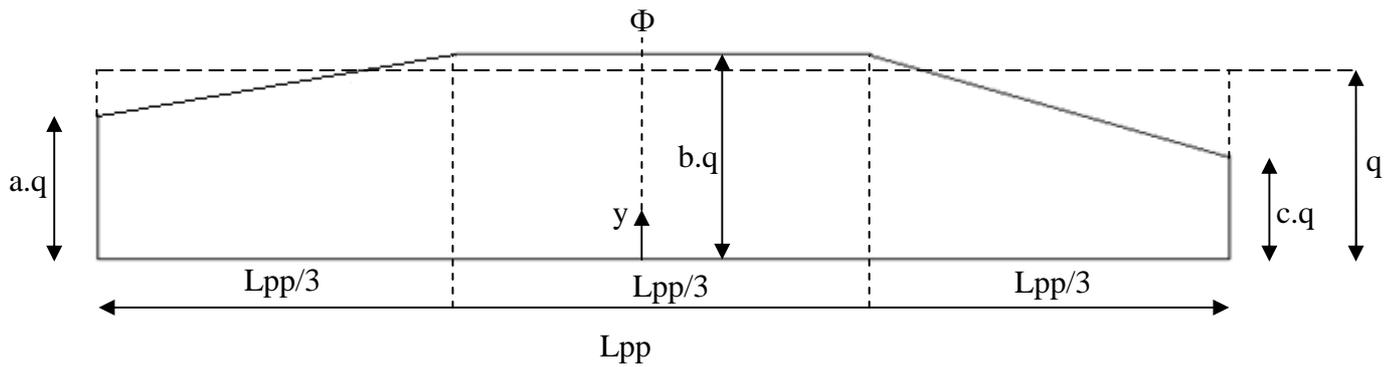


Figure III.1 : Courbe de poids en trapèze

Avec la charge répartie de la coque métallique q en [t/m] est donnée par :

$$q = \frac{G}{L_{pp}} \tag{III.4}$$

Les coefficients a, b, c représenté sur la figure III.1, sont données dans le tableau suivant :

✓ pour $X_G = 0$ (le centre de gravité se trouve au niveau du maitre couple)

Type de navire	Coefficients		
	A	b	c
	AR	Φ	AV
$C_b < 0.6$	0.65	1.20	0.57
$C_b > 0.6$	0.71	1.17	0.60

✓ pour $X_G \neq 0$ (le centre de gravité ne se coïncide pas avec le maitre couple)

Type de navire	Coefficients		
	a	b	c
	AR	Φ	AV
$C_b < 0.6$	$0.6 - 7.70 \frac{X_G}{L_{pp}}$	1.20	$0.6 + 7.70 \frac{X_G}{L_{pp}}$
$C_b > 0.6$	$0.66 - 7.70 \frac{X_G}{L_{pp}}$	1.17	$0.66 + 7.70 \frac{X_G}{L_{pp}}$

b) Courbe de poids en escalier

Dans cette méthode on doit diviser notre navire en 20 coupes égaux de longueur ΔL (écartement entre les couples théoriques).

$$\Delta L = \frac{L_{pp}}{20} \quad (\text{III.5})$$

Les données de cette méthode sont : le poids total de la coque métallique, G , le centre de gravité, X_G .

La représentation de la variation des poids en longueur avec l'utilisation de la méthode de courbe de poids en escalier prend la forme suivante :

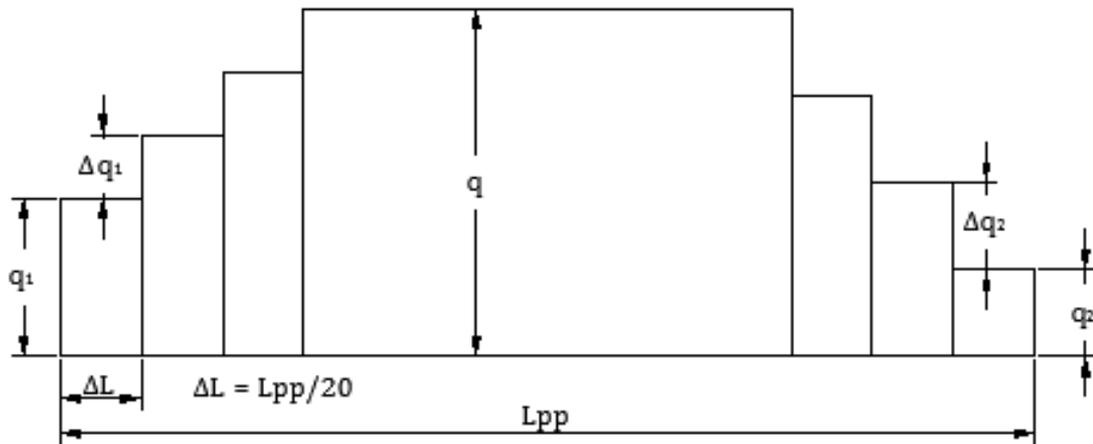


Figure III.2 : Courbe de poids en escalier

La variation de poids le long du navire est obtenue par :

$$\begin{aligned} q &= m \frac{G}{20} \\ q_1 &= m_1 \frac{G}{20} \\ q_2 &= m_2 \frac{G}{20} \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Les constantes m , m_1 et m_2 sont définies selon :

❖ *Navire avec une longue partie cylindrique (8 intervalle au milieu)*

$$\begin{aligned}
 m &= 1.18 \\
 m_1 &= 0.667 + 0.365 \frac{X_G}{L_{pp}} \\
 m_2 &= 0.667 - 0.365 \frac{X_G}{L_{pp}} \\
 \Delta q_1 &= \frac{m - m_1}{6} \frac{G}{20} \\
 \Delta q_2 &= \frac{m - m_2}{6} \frac{G}{20}
 \end{aligned} \tag{III.7}$$

❖ *Navire avec une longue partie cylindrique (6 intervalle au milieu)*

$$\begin{aligned}
 m &= 1.18 \\
 m_1 &= 0.730 + 0.333 \frac{X_G}{L_{pp}} \\
 m_2 &= 0.730 - 0.333 \frac{X_G}{L_{pp}} \\
 \Delta q_1 &= \frac{m - m_1}{7} \frac{G}{20} \\
 \Delta q_2 &= \frac{m - m_2}{7} \frac{G}{20}
 \end{aligned} \tag{III.8}$$

c) Courbe de poids de la coque d'un navire sans partie cylindrique

Cette méthode est utilisée pour les navires sans partie cylindrique. La répartition des poids de la coque est représentée par un rectangle et une parabole. La surface de chaque partie est égale à la moitié du poids total de la coque G dans une échelle donnée.

✓ Si le centre de gravité se trouve en maître couple : $X_G=0$

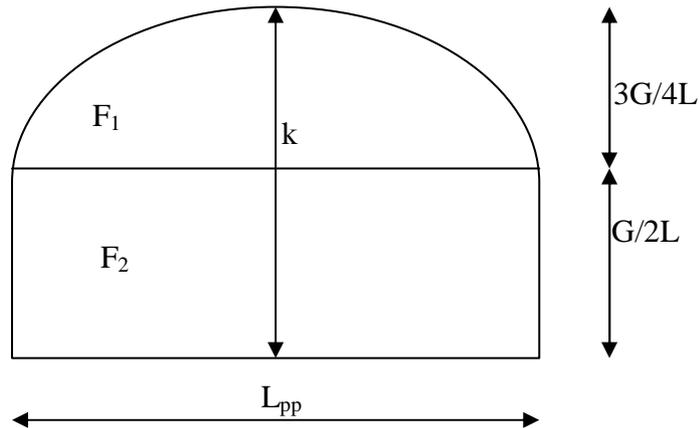


Figure III.3 : Courbe de poids d'un navire sans partie cylindrique

La surface de chaque partie de la courbe de poids représenté sur la figure III.3 est exprimé par :

$$\begin{cases} F_1 = \frac{3}{4} \frac{G}{L} \left(\frac{2}{3}L\right) = \frac{G}{2} \\ F_2 = \frac{G}{2L}(L) = \frac{G}{2} \end{cases} \Rightarrow F_1 + F_2 = G \quad (\text{III.9})$$

L'ordonnée du centre de la coque métallique sans partie cylindrique est égale à la relation suivante :

$$k = \frac{3}{4} \frac{G}{L} + \frac{G}{2L} = \frac{5}{4} \frac{G}{L} \quad (\text{III.10})$$

✓ Si le centre de gravité ne se trouve pas en maitre couple, $X_G \neq 0$

Pour coïncider le centre de gravité de la courbe de poids avec le centre de gravité de la coque métallique, il faut faire déplacer certaine partie de la surface de la courbe (de forme d'un triangle) d'un côté à l'autre, figure III.4.

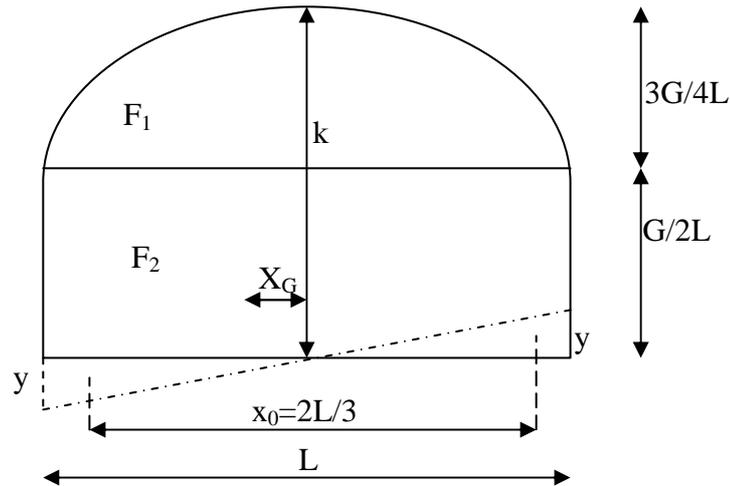


Figure III.4 : Courbe de poids d'un navire sans partie cylindrique avec $X_G \neq 0$

La surface de la courbe (de forme d'un triangle) déplacé est égale à :

$$f = \frac{1}{2} y \frac{L}{2} \quad (\text{III.11})$$

La distance y peut être calculée par la relation suivante :

$$y = \frac{6X_G G}{L^2} \quad (\text{III.12})$$

Si on connaît la position du centre de gravité de la coque on peut déterminer facilement la valeur de y .

Le moment statique partiel M_s égale à :

$$M_s = f \cdot x_0 = X_G G \quad (\text{III.13})$$

Donc, le centre de gravité de la coque on peut déterminer par :

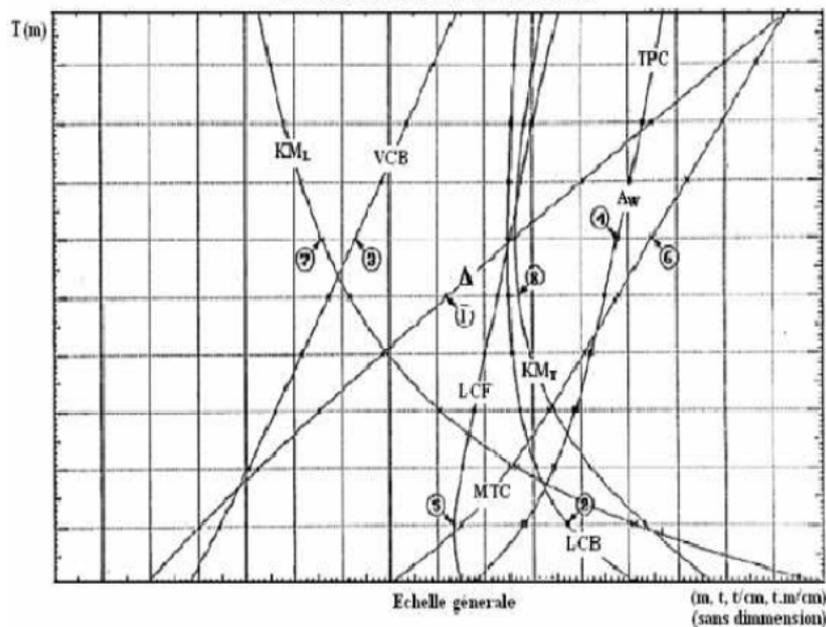
$$X_G = \frac{M_s}{G} = \frac{f \cdot x_0}{G} = \frac{\frac{1}{6} y L^2}{G} \quad (\text{III.14})$$

Remarque :

Toutes les courbes obtenues par les deux méthodes : trapèze et méthode des courbes de poids de la coque sans partie cylindrique seront transformé en courbe échelonnées (en escalier) équivalant en surface et par la position de leur centre de gravité.

III.4) Construction de la courbe des réactions hydrostatiques

La courbe des réactions hydrostatique donne le principe de la variation des composantes verticale de la pression de l'eau déterminée par le principe de la répartition du volume d'eau déplacé. La connaissance des surfaces et des volumes donc la variation de différentes caractéristiques et des paramètres d'un navire en partants soit des formes soit du tableau des couples, on procède au tracé d'une série de courbes dites courbes hydrostatiques ou courbes de forme, figure III.5.



Avec :

	Unité		Unité		Unité
① déplacement Δ	(t)	④ TC	(t/cm)	⑥ MTC	(t.m/cm)
		P)	
② LCB	(m)	④ Aw	(m)	⑦ KM_L	(m)
③ VCB	(m)	⑤ LC	(m)	⑧ KM_T	(m)
		F			

Figure III.5 : Courbes hydrostatiques ou courbes de forme.

Pour différentes flottaisons, donc de tirants d'eau T , on trace les courbes hydrostatiques qui sont en fait les courbes de variation des caractéristiques et paramètres en fonction de tirant d'eau T . Notamment, celles des coefficients de forme C_B, C_P, C_W, C_M, C_V , des coordonnées du centre de gravité G (LCG et VCG) et du centre de carène immergée B (LCB et VCB) dont les composantes verticales par rapport à K , longitudinales par rapport à la perpendiculaire arrière P_{AR} , le centre de flottaison longitudinal LCF par

rapport la perpendiculaire arrière, le déplacement Δ , les hauteurs métacentriques transversale KM_T et longitudinale KM_L , l'aire de surface de flottaison A_w , l'immersion (enfoncement) parallèle à la flottaison par cm TPC (ton/cm), le moment par différence des tirant avant et arrière (assiette) MTC . Chaque paramètre est tracé en portant en ordonné le tirant d'eau T et en abscisse l'échelle et l'unité appropriée (m, ton, ton/m ...etc.)

Pour faire construire cette courbe il faut utiliser l'échèle Bonjeau et connaître les tirant d'eau avant T_{AV} et arrière T_{AR} .

III.5) Courbe (échelle) de Bonjeau

Représente les courbe donnant les aires immergées des coupes ainsi que les moments initiaux des aires par rapport au plan de base et cela en fonction du tirant d'eau.

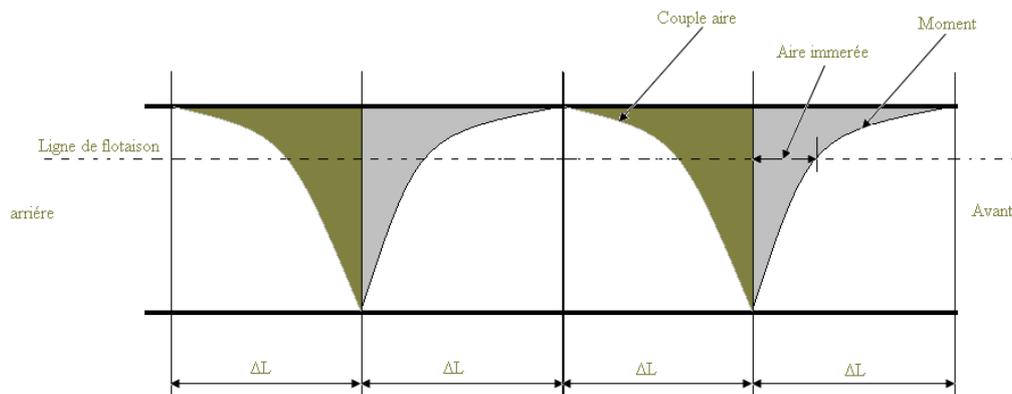


Figure III.6 : Courbes (échelle) de Bonjeau

Les courbes de Bonjeau sont utilisées aussi pour la détermination du déplacement du navire pour différents enfoncements (tirants d'eau) et de même que pour différentes inclinaison longitudinales du navire (assiettes).

Elles représentent sur l'axe vertical de chaque couple (section transversale) les aires du couple pour différentes flottaisons parallèles.

On les obtient en portant en abscisse et le long de l'axe vertical (l'axe de symétrie z) du couple, pour chaque flottaison l'aire du couple, les courbes ainsi obtenues permettant de définir, pour chaque flottaison parallèle ou inclinée, la courbe des aires des couples. Ce qui permet en intégrant d'obtenir pour la flottaison concernée le volume donc le déplacement correspondant à la flottaison considérée.

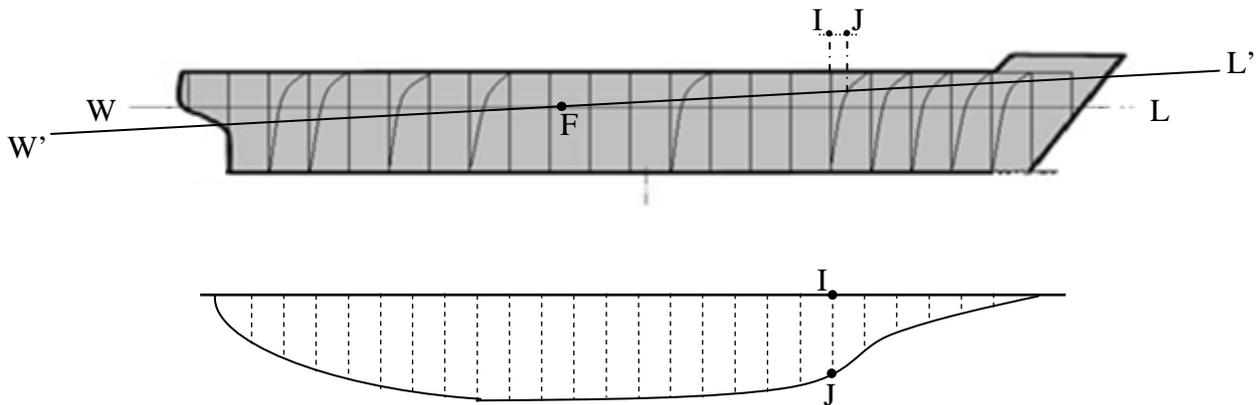


Figure III.7: courbes des aires des couples pour une ligne de flottaison $W'L'$

Les courbes des aires des couples d'une flottaison, $W'L'$, s'obtient en reportant perpendiculairement sur un axe horizontal la distance IJ , figure III.7, correspondant au segment de droite horizontale (projection horizontale) reliant les points d'intersection de la ligne de flottaison considérée avec l'axe vertical du couple et la courbe de Bonjeau du couple (courbe des aires du couple des différents flottaisons).

L'échelle de Bonjeau à une grande utilité pour la détermination

- Des volumes et centre de carène en cas d'assiette importante qui est nécessaire en cas d'échouage ou envahissement ;
- Les efforts statiques ;
- Elle est nécessaire pour les courbes de la stabilité.

III.5.1) Navire en eau calme

En premier lieu il faut déterminer la position de la ligne de flottaison, après il faut déterminer les T_{AV} et T_{AR} , c.-à-d qu'il faut faire l'équilibre du navire.

Les conditions d'équilibre du navire sont :

1) $\Delta = G$ $\Delta = \rho \nabla$: déplacement du navire (poussé d'Archimède)

2) $X_G = X_C$ (les deux centres se trouve sur la même vertical)

Avec : X_G : centre de gravité du navire ;

X_C : centre de poussé de la carène ;

G : poids total du navire.

Pour le navire en équilibre, on détermine les surfaces des courbe immergée à l'aide de l'échelle Bonjeau (courbe Bonjeau) c.à.d. que l'on détermine les ordonnées de la courbe des surfaces des couples à la flottaison, puis on multiplie ces ordonnées par le poids

volumique de l'eau et on obtient ainsi la courbe des réactions hydrostatique (poussée), figure III.8.

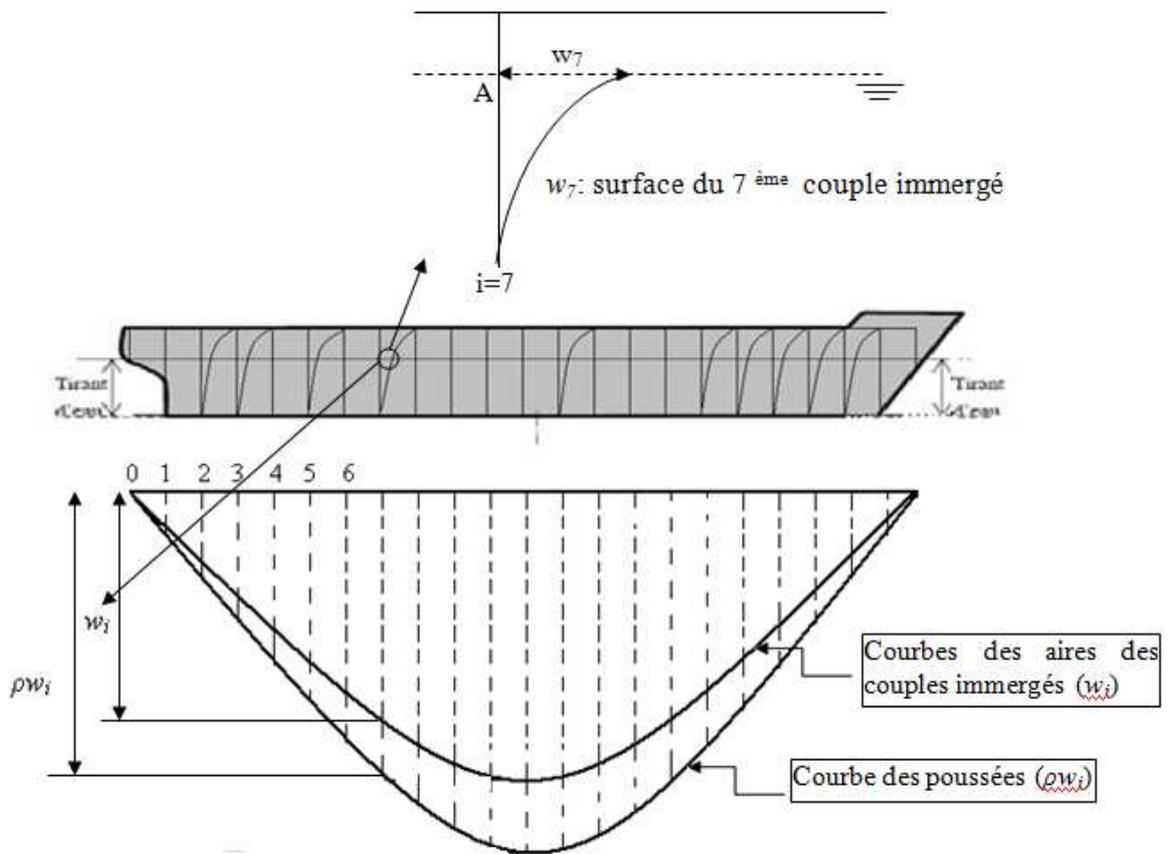


Figure III.8 : courbes des aires des couples immergés et courbe des poussées.

Pour faciliter les calculs on transforme la courbe des poussés de sa forme initiale en courbe échelonnée équivalente en surface et par la position de son centre de gravité.

III.5.2) Navire sur houle

Pour construire la courbe de la réaction hydrostatique d'un navire sur mer agitée il faut prendre en considération la variation du profile ondulatoire de la ligne de flottaison (ligne d'eau L_w). Le changement de la forme de ce profile influe constamment sur le processus d'oscillation du navire, ce processus dépend de l'angle de cap du navire par rapport au sens de mouvement des vagues, de leurs dimensions (hauteur, longueur) et ainsi que la vitesse d'avancement du navire.

Le cas le plus critique du point de vue résistance générale est le cas où le navire perpendiculaire par rapport à la crête des vagues de longueur d'onde $\lambda \approx L_{pp}$ et au moment où le navire est sur crête ou au creux de la vague.

Dans le cas d'une navigation sur des vagues courtes (par rapport à L_{pp}) on a des variations insignifiantes des réactions hydrostatiques par rapport au cas du navire en eau calme.

Dans le cas d'une navigation sur vague de longueur d'onde beaucoup plus grande que L_{pp} le rayon de courbure de la surface de l'eau L_w sur la longueur du navire sera très grande donc les variations des réactions hydrostatiques ne seront pas importantes et par conséquent la variation de la flexion du navire ne sera pas importante aussi. Dans les deux cas la variation du moment fléchissant ne sera pas importante.

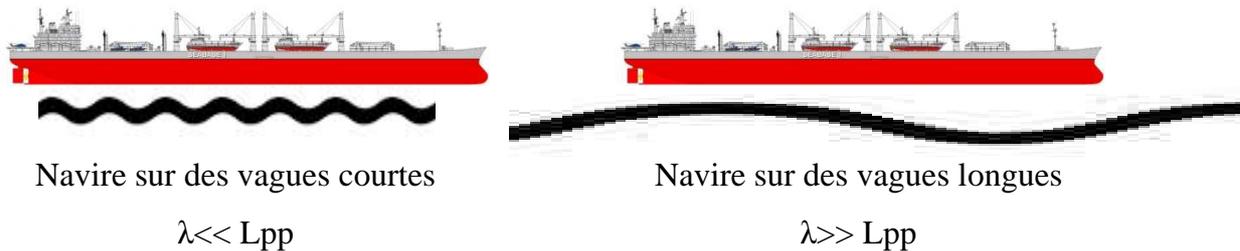


Figure III.9 : Navire sur des vagues courtes et longues.

Les chercheurs ont montré que la plus grande valeur du moment fléchissant se trouve au maître couple lorsque la longueur du vague $\lambda \approx L_{pp}$, donc quand un navire est placé statiquement sur houle longitudinal on considère que $\lambda \approx L_{pp}$, la composante statique du moment fléchissant M_h sur houle et la courbe des réactions hydrostatiques sont déterminés par la condition $\lambda = L_{pp}$.

Pour construire la courbe des poussées sur houle il faut connaître la relation entre la hauteur h et la longueur d'onde λ et la forme de la vague (houle trochoïdale).

III.6) Construction des courbes de charges résultantes

La représentation des courbes de poids et les courbes de poussée sont effectuées avec la même échelle et en forme échelonnée. Dans les différentes sections du navire, la relation poids/poussée, comme nous avons déjà vu, elles ne seront pas égales dans certaines parties de la coque, il y a un excès de poids dans certaines régions et un excès de réaction hydrostatiques dans d'autres régions, figure III.10.

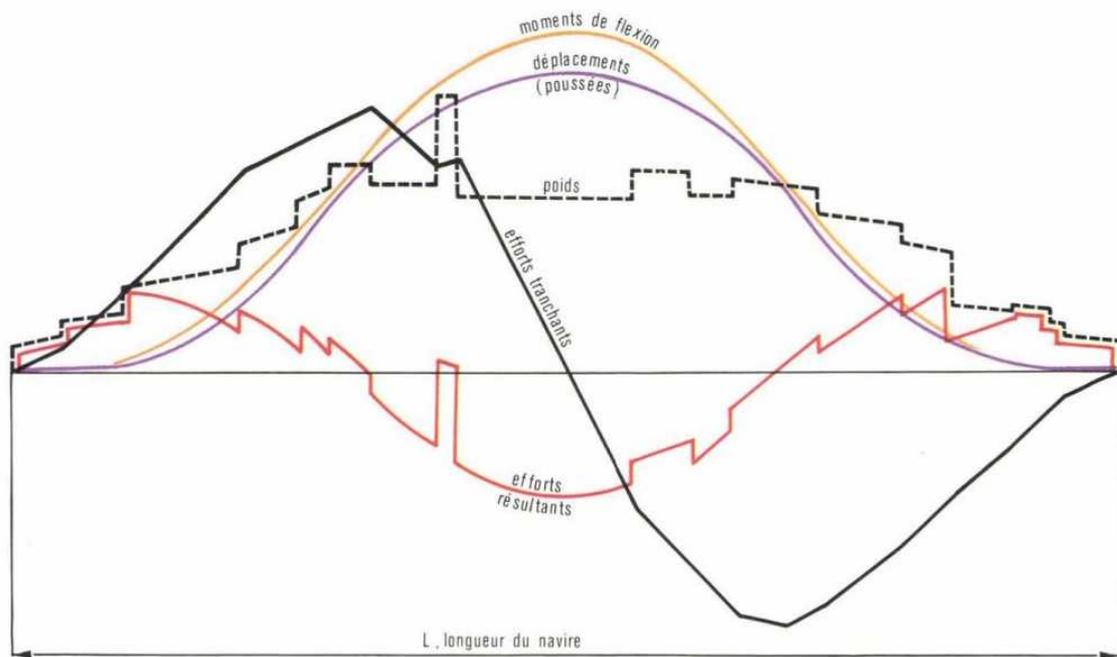


Figure III. 10: Les différentes forces subies par un navire. Distribution des charges résultantes (en rouge), effort tranchants (en noir continue), moments fléchissant (en jaune), du poids (en noir discontinu) et de la poussée (en mauve) le long du navire.

Si le calcul est juste le totale des excès de poids sera égale au totale des excès des réactions hydrostatiques est le centre de gravité de la courbe résultantes se trouvera sur la même verticale que le centre de gravité de la courbe de poids et le centre de la carène du navire (c'est-à-dire que les trois centres se trouvent sur la même verticale).

La nouvelle courbe échelonnée s'appelle courbe de charge (résultante) la grandeur de son ordonnée \$q\$ dans chaque écartement théorique (\$L_{pp}/20\$) est déterminée par la différence entre les ordonnées des courbes de poids et des réactions hydrostatiques tel que :

$$q_j = P_j - \rho w_j \quad (\text{III.15})$$

\$P_j\$: Ordonnée de la courbe des poids [t/m]

\$\rho\$: Masse volumique de l'eau égale à 1025 t/m³

\$\rho w_j\$: Ordonnée de la courbe des réactions hydrostatiques [t/m]

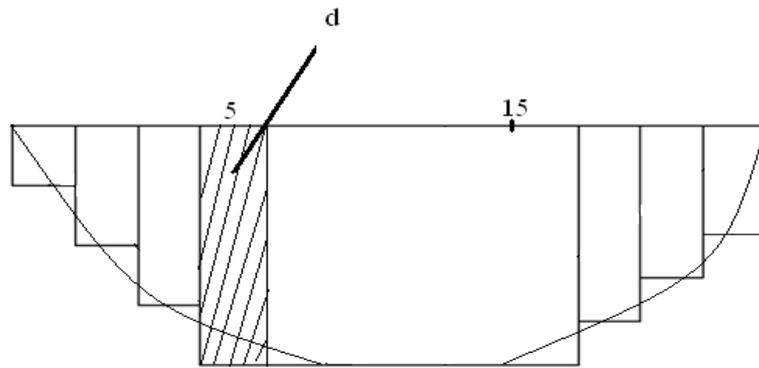
\$w_j\$: Est la surface immergée moyenne de chaque écartement théorique en [m²]

Elle est calculée par :

$$w_j = \frac{w_i + w_{i+1}}{2} \quad (\text{III.16})$$

Pour une répartition régulière des réactions hydrostatique dans l'intervalle ΔL sa grandeur sera déterminée par la valeur suivante :

$$d = \left(\frac{w_i + w_{i+1}}{2} \rho \right) \Delta L \tag{III.17}$$



III.7) Répartition des poids concentrés ou réparties sur deux intervalles voisins

Dans le contexte des courbes de poids on peut répartie d'une manière uniforme les poids concentré ou répartie sur deux intervalles voisins.

La répartition des poids concentré sur deux intervalles voisins peut s'effectuer de la manière suivante :

Avec P et F deux charges concentrées dans les deux intervalles voisins [i-1, i] et [i, i+1] et h est la longueur théorique de chaque intervalle, figure III.11.

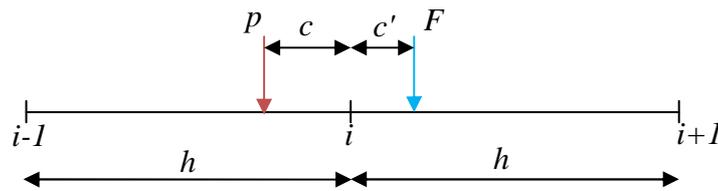


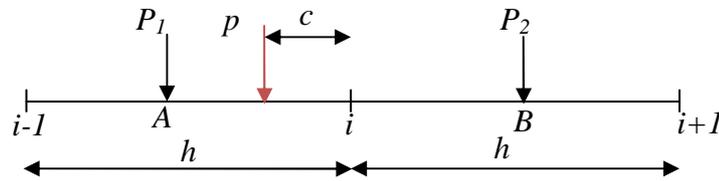
Figure III.11 : Deux charges concentrées dans les deux intervalles voisins.

Cette longueur, est exprimé par :

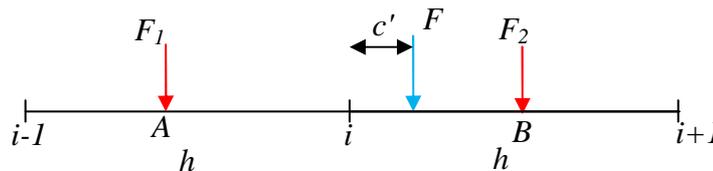
$$h = \frac{Lpp}{20} \tag{III.18}$$

On appliquant à cette poutre les équations de la statique et en utilisant la méthode de la superposition on obtient les expressions de P_1 et P_2 séparément, (les mêmes constatations pour les de F_1 et F_2).

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P \left(0.5 + \frac{c}{h} \right) \\
 P_2 &= P \left(0.5 - \frac{c}{h} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.19}$$



$$\begin{aligned}
 F_1 &= F \left(0.5 - \frac{c}{h} \right) \\
 F_2 &= F \left(0.5 + \frac{c}{h} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.20}$$

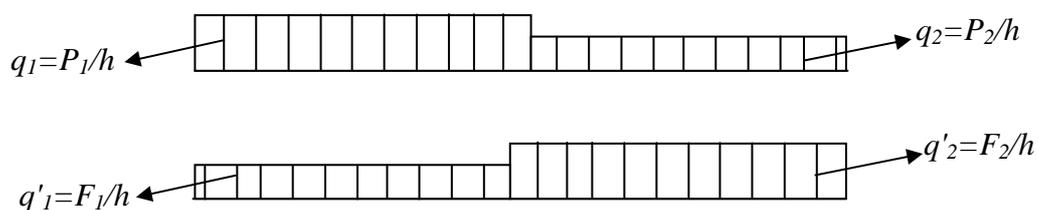


Démonstration :

$$\begin{aligned}
 \sum M /_A = 0 &\Rightarrow p \left(\frac{h}{2} - c \right) + p_2 h = 0 \\
 \Rightarrow p_2 &= - \frac{p \left(\frac{h}{2} - c \right)}{h} = p \left(\frac{1}{2} - \frac{c}{h} \right)
 \end{aligned}$$

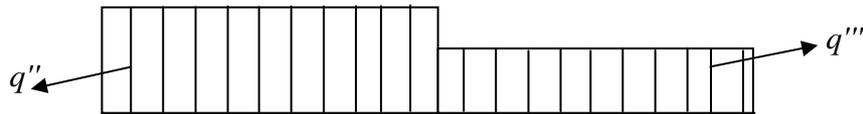
$$\begin{aligned}
 \sum F /_y = 0 &\Rightarrow p = p_1 + p_2 \\
 \Rightarrow p_1 &= p - p_2 = p - p \left(\frac{1}{2} - \frac{c}{h} \right) \\
 \Rightarrow p_1 &= p \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{c}{h} \right) = p \left(\frac{1}{2} + \frac{c}{h} \right)
 \end{aligned}$$

En suite on répartie les charges calculer P_1 , P_2 , F_1 et F_2 sur chaque intervalle tel que :

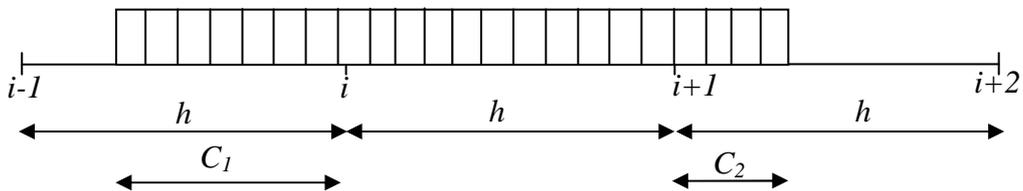


Finalement : on se servant du principe de la superposition on obtient :

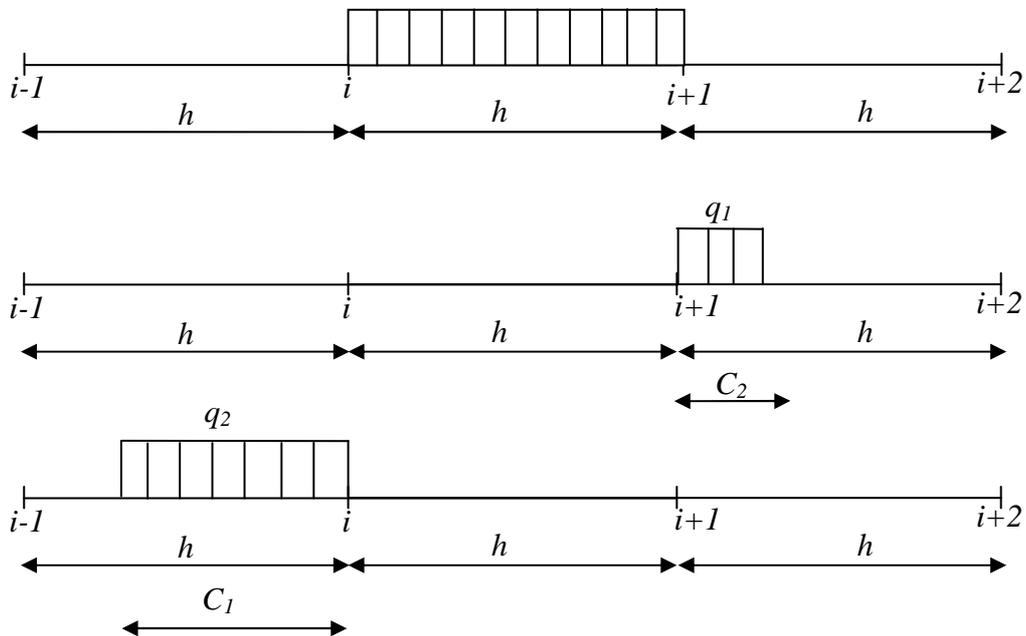
$$\begin{aligned} q'' &= q_1 + q_1' \\ q''' &= q_2 + q_2' \end{aligned} \tag{III.21}$$



Le même raisonnement peut se faire dans le cas des charges répartir.



On appliquant à cette poutre le principe de la superposition on obtient :



On suivant les même étapes que l'exemple présidant, on repartie les deux charges q_1 et q_2 sur les deux intervalles voisins $[i, i+1]$, $[i+1, i+2]$ et $[i-1, i]$, $[i, i+1]$ respectivement.

Finalement on addition les charges trouvé sur chaque intervalle pour les trois cas.

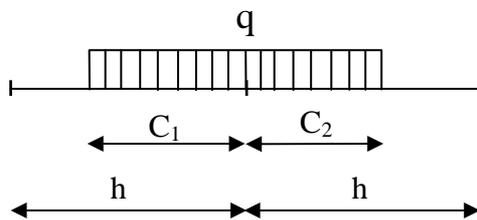
Ainsi l'obtention de la charge sera comme suit :

$$q_j = \frac{p_j}{h}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.22})$$

III-8) Exercice d'application

- **Application 1 :**

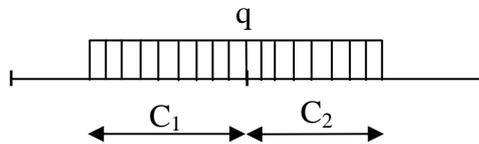
Répartie la charge montrée sur la figure ci-dessous sur les intervalles correspondant, sachant que : $C_1=2$ m, $C_2=1.5$ m, $q=2$ kN, $L_{pp}=100$ m



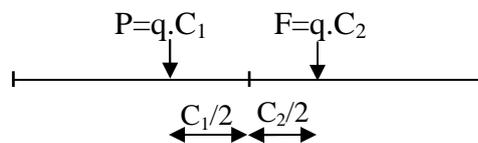
Solution

Donné : $C_1=2$ m, $C_2=1.5$ m, $q=2$ kN

$L_{pp}=100$ m $\rightarrow h=L_{pp}/20=5$ m



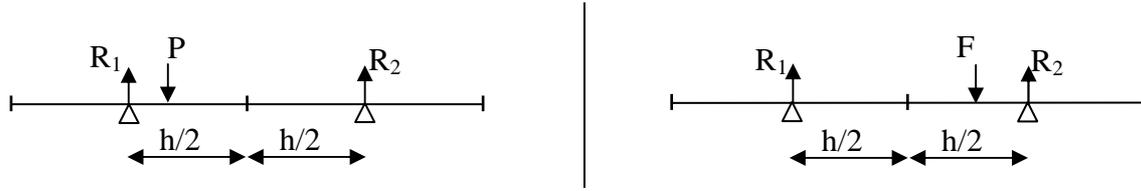
Transformation de la charge répartie q dans chaque zone en deux charges concentrées P et F tel que :



On divise le problème en deux on obtient :

$$P = 2 \cdot 2 = 4 \text{ kN}$$

$$F = 2 \cdot 1.5 = 3 \text{ kN}$$



En utilisant les deux équations III.19 et 20 on obtient :

$$R_1 = P \left(\frac{1}{2} + \frac{C_1/2}{h} \right) \quad \text{et} \quad R_2 = P \left(\frac{1}{2} - \frac{C_1/2}{h} \right) \quad \left| \quad R_1 = F \left(\frac{1}{2} - \frac{C_2/2}{h} \right) \quad \text{et} \quad R_2 = F \left(\frac{1}{2} + \frac{C_2/2}{h} \right)$$

Répartition des charges calculées sur toute la longueur l'intervalle h :



Avec :

$$q_1 = \frac{R_1}{h} = \frac{4000}{5} \left(\frac{1}{2} + \frac{2/2}{5} \right) = 560 \text{ N/m}$$

$$q_2 = \frac{R_2}{h} = \frac{4000}{5} \left(\frac{1}{2} - \frac{2/2}{5} \right) = 240 \text{ N/m}$$

$$q'_1 = \frac{R_1}{h} = \frac{3000}{5} \left(\frac{1}{2} - \frac{1.5/2}{5} \right) = 210 \text{ N/m}$$

$$q'_2 = \frac{R_2}{h} = \frac{3000}{5} \left(\frac{1}{2} + \frac{1.5/2}{5} \right) = 390 \text{ N/m}$$

Finalement : en utilisant la méthode de la superposition on obtient :

$$q_{1F} = q_1 + q'_1 = 560 + 210 = 770 \text{ N/m}$$

$$q_{2F} = q_2 + q'_2 = 240 + 390 = 630 \text{ N/m}$$

• **Application 2 :**

Pour le ponton en eau calme dont la distribution de poids est représentée sur la figure 1 et dont le diagramme de la charge résultante est montré sur la figure 2.

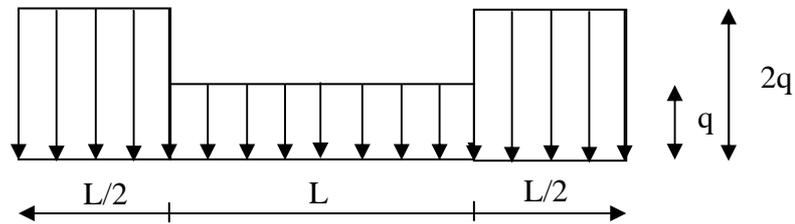


Figure 1

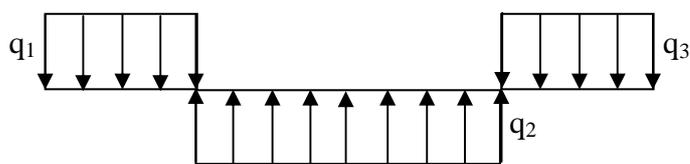
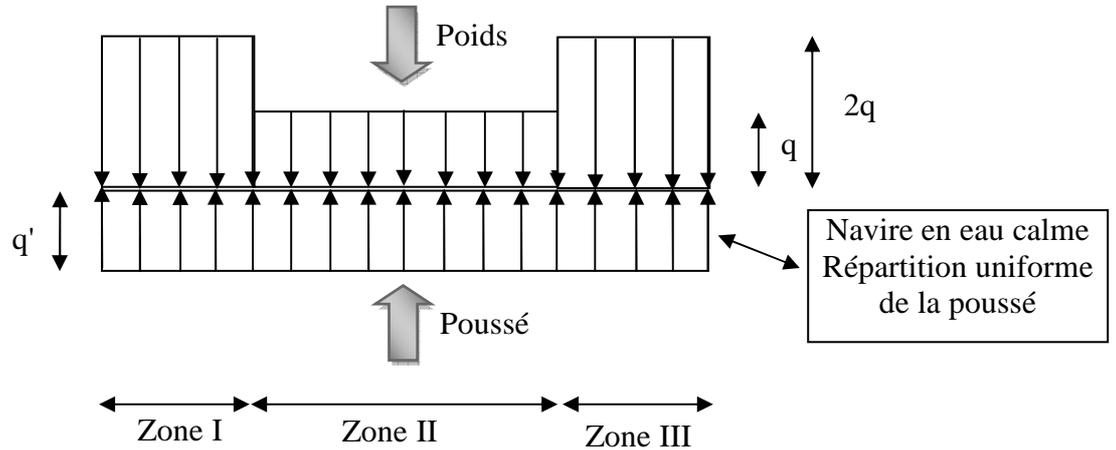


Figure 2

- Déterminer la valeur de q_1 , q_2 et q_3
- Tracer le diagramme de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

Solution :

Diagramme du moment fléchissant et de l'effort tranchant :



En eau calme : poids=poussé

$$\underbrace{2q \frac{L}{2} + qL + 2q \frac{L}{2}}_{\text{poids}} = \underbrace{q' 2L}_{\text{poussé}} \Rightarrow q' = \frac{3}{2} q$$

Convention des signes

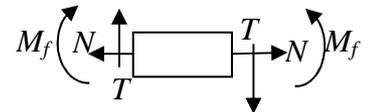


Diagramme de la charge résultante (q_1 , q_2 , q_3)

✓ Zone I : $0 \leq x \leq L/2$

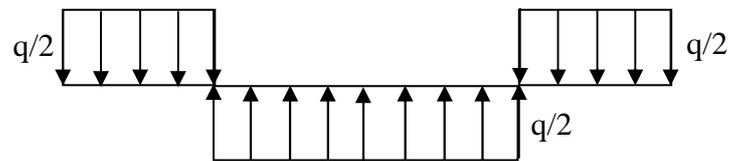
$$2q \frac{L}{2} - q' \frac{L}{2} = q_1 \frac{L}{2} \Rightarrow q_1 = \frac{q}{2}$$

✓ Zone II : $L/2 \leq x \leq 3L/2$

$$qL - q' L = q_2 L \Rightarrow q_2 = -\frac{q}{2}$$

✓ Zone III : $3L/2 \leq x \leq 2L$

$$2q \frac{L}{2} - q' \frac{L}{2} = q_3 \frac{L}{2} \Rightarrow q_3 = \frac{q}{2}$$



✓ Effort tranchant et moment de fléchissant :

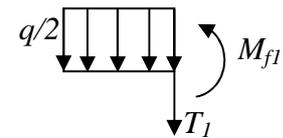
Remarque:

Puisque le diagramme de la charge résultants est admit un plan de symétrie, de ce fait on étudié que la moitié du problème [0, L].

➤ Section 1 : $0 \leq x \leq L/2$

$$T_1 + \frac{1}{2}qx = 0 \Rightarrow T_1 = -\frac{1}{2}qx \Rightarrow \begin{cases} x = 0 & T_1 = 0 \\ x = L/2 & T_1 = -\frac{qL}{4} \end{cases}$$

$$M_{f1} = \int_0^{L/2} T_1(x)dx = -\frac{qx^2}{4} \Big|_0^{L/2} \Rightarrow \begin{cases} x = L/2 & M_{f1} = -\frac{qL^2}{16} \\ x = 0 & M_{f1} = 0 \end{cases}$$



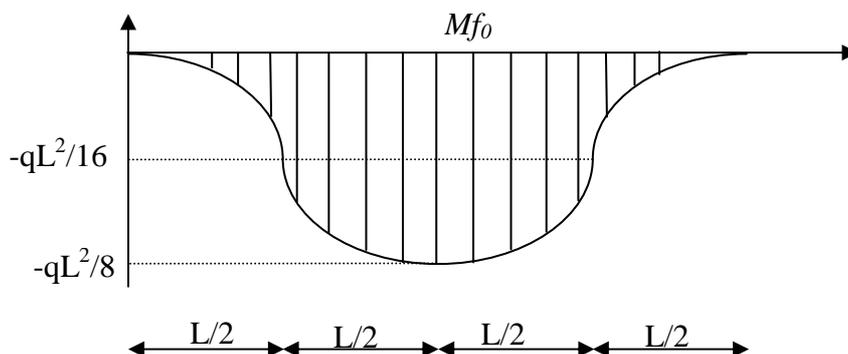
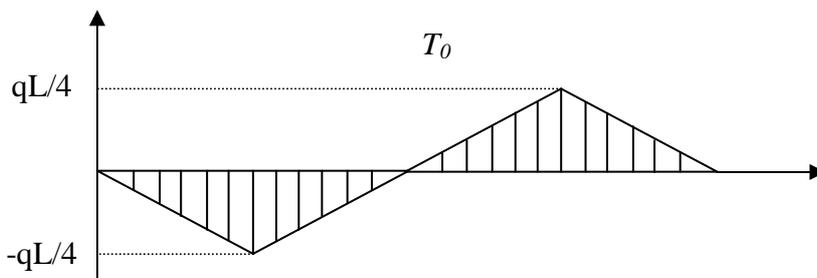
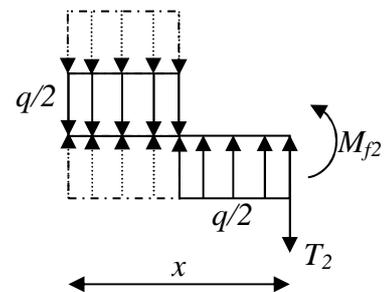
➤ Section 2 : $L/2 \leq x \leq L$

$$T_2 + \frac{q}{2} \frac{L}{2} - \frac{q}{2}x + \frac{q}{2} \frac{L}{2} = 0 \Rightarrow T_2 = \frac{q}{2}x - \frac{qL}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = L/2 & T_2 = -\frac{qL}{4} \\ x = L & T_2 = 0 \end{cases}$$

$$M_{f2} = \int_0^{L/2} T_1(x)dx + \int_{L/2}^L T_2(x)dx = -\frac{qx^2}{4} \Big|_0^{L/2} + \frac{qx^2}{4} - \frac{qLx}{2} \Big|_{L/2}^L$$

$$= -\frac{qL^2}{16} + \frac{qL^2}{4} - \frac{qL^2}{2} - \frac{qL^2}{16} - \frac{qL^2}{4}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x = L/2 & M_{f2} = -\frac{qL^2}{16} \\ x = L & M_{f2} = -\frac{qL^2}{8} \end{cases}$$



IV.1) Introduction

Le moment fléchissant est dû à trois facteurs : la répartition du poids entre les extrémités du navire et son milieu. La houle qui, selon la position du navire par rapport à elle, peut augmenter ou inverser le moment fléchissant. Et enfin la poussée de l'hélice et la résistance de l'eau accentuent également le moment fléchissant. Selon son sens, le moment fléchissant donnera au navire une forme d'arc ou de contre-arc (voir figure II.7). Quand le navire est en forme de contre-arc, le pont subit de la compression et le fond de la traction, et inversement en cas de forme en arc. En cas de compression trop importante, le phénomène de flambage se produit et peut très vite provoquer une rupture de la structure

Dans ce chapitre, nous répondrons simplement à la question: qu'est-ce qu'un moment de flexion en eau calme et du au passage de la houle dans une section d'un navire? Un moment de flexion est une force normalement mesurée en une force multipliée par une longueur (par exemple. kNm). Les moments de flexion se produisent lorsqu'une force est appliquée à une distance donnée d'un point de référence; provoquant un pliant effet. Dans les termes les plus simples, un moment de flexion est essentiellement une force qui fait plier quelque chose. Si l'objet n'est pas bien retenu, la force de flexion entraînera la rotation de l'objet autour d'un certain point.

Aujourd'hui, il n'a pas encore été possible de décrire avec certitude quelles charges subies par le navire ont entraîné la catastrophe. Cependant il est intéressant d'étudier la nature de ces charges et d'émettre des hypothèses sur le « scénario » du drame d'un point de vue technique, ou plus précisément du point de vue de la Résistance et Déformation des Structures (RDS).

IV.2) Moment fléchissant maximum en eau calme

Cette méthode consiste à calculer le M_f en maître couple en eau calme, puis à déterminer et tracer les courbes d'évolution de efforts tranchants et moment fléchissant de part et d'autre de ce maître couple.

En première approximation on ne tient pas compte de l'assiette éventuelle qui procède de navire :

$$M_T = M_0 + M_h \quad (IV.1)$$

Avec M_0 , M_h sont le moment en eau calme et du au passage de la houle respectivement (on néglige la correction de Smith).

Le moment fléchissant en maitre couple M_0 est égale à la différence des moments dû aux poids et aux poussés s'exerçants tout les deux d'un même côté de la section en maitre couple.

IV.2.1) Méthode de calcul

Le moment fléchissant au maitre couple en eau calme M_0 est égal à la différence des moments dû au poids M_{poids} et aux poussées $M_{poussée}$ s'exerçant tous deux d'un même côté de la section en maitre couple :

$$M_0 = M_{poids} - M_{poussée} \quad (IV.2)$$

Si nous affectons des indices :

P et d : Les moments dû aux poids et aux poussées

a et f : Les moments des parties AR et AV

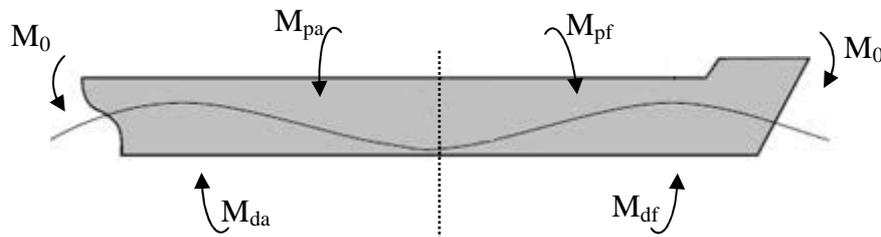


Figure IV.1 : Les moments fléchissant dus au poids et à la poussée des parties AR et AV.

Le moment fléchissant en eau calme en maitre couple, peut être écrite par:

$$M_0 = M_{pa} - M_{da} \quad (IV.3)$$

$$M_0 = M_{pf} - M_{df} \quad (IV.4)$$

Nous pouvons écrire

$$M_0 = M_{pa} - M_{da} = M_{pf} - M_{df} \quad (IV.5)$$

Si on divise l'équation (IV.5) par deux on trouve :

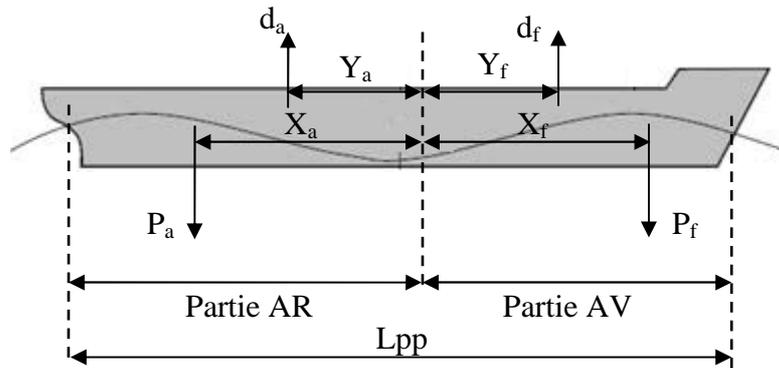
Donc :

$$\frac{M_0}{2} = \frac{M_{pa} - M_{da}}{2} = \frac{M_{pf} - M_{df}}{2} \quad (IV.6)$$

$$M_0 = \frac{M_0}{2} + \frac{M_0}{2} = \frac{M_{pa} - M_{da}}{2} + \frac{M_{pf} - M_{df}}{2}$$

$$M_0 = \frac{M_{pa} + M_{pf}}{2} - \frac{M_{da} + M_{df}}{2} \tag{IV.7}$$

On se rapportant à la figure ci-dessous, on peut écrire :



$$M_{pa} = P_a X_a$$

$$M_{pf} = P_f X_f$$

$$M_{da} = d_a Y_a$$

$$M_{df} = d_f Y_f$$

(IV.8)

$$M_0 = \frac{M_{pa} + M_{pf}}{2} - \frac{M_{da} + M_{df}}{2}$$

Avec :

X_a et X_f : représentent le centre de gravité de la partie arrière et avant respectivement.

Y_a et Y_f : représentent le centre de la carène de la partie arrière et avant respectivement.

On sait par ailleurs que le déplacement du navire Δ dans le cas d'un chargement étudié (c.-à-d. charge appliquée égale au volume déplacé) doit être égal :

$$\Delta = d_a + d_f$$

$$\Delta = P_a + P_f$$

(IV.9)

Si : $X_a \neq X_f$ et $Y_a \neq Y_f$ on peut écrire les relations suivantes:

$$Y\Delta = d_a Y_a + d_f Y_f$$

$$X\Delta = P_a X_a + P_f X_f$$

(IV.10)

Avec X et Y sont respectivement les distances entre le maître couple et centre de gravité des poids et du centre de la carène du navire.

Substituant l'équation (IV.8) et (IV.10) dans l'équation (IV.7) on obtient :

$$M_0 = \frac{\Delta}{2}(X - Y) \quad (\text{IV.11})$$

On utilisant des coefficients adimensionnelles équation (IV.11) devient :

$$M_0 = \frac{\Delta L_{pp}}{2}(g - c) \quad (\text{IV.12})$$

Avec : $g = \frac{X}{L_{pp}}$ et $c = \frac{Y}{L_{pp}}$

La détermination du moment fléchissant M_0 (on négligeant l'influence de l'assiette) est donc ramenée à la détermination des coefficients « g » et « c » soit à partir des courbes de poids et de poussées en flottaison soit à partir des renseignements statistiques.

Le coefficient « c » dépend uniquement de la forme de la courbe des aires des courbes aux différents tirants d'eau. De nombreux auteurs ont proposé des formules empiriques simples en fonction des caractéristiques principales de la carène, tel que :

- Formule de Murray :

Tirant d'eau (T)	c
0,06 Lpp	0,179 Cb+0,063
0,05 Lpp	0,189 Cb+0,052
0,04 Lpp	0,199 Cb+0,041
0,03 Lpp	0,209 Cb+0,030

- Bureau Veritas :

Cb	c
0,6	0,1743
0,62	0,1765
0,64	0,1789
0,66	0,1816
0,68	0,1846
0,70	0,1878
0,72	0,1916
0,74	0,1948
0,76	0,1986
0,78	0,2024
0,80	0,2063
0,82	0,2103
0,84	0,2144

- Valeurs statistiques

- ✓ **Navire sans bulbe**

$$c = 0,2C_b^2 - 0,12C_b + 0,173 \quad (\text{IV.13})$$

- ✓ **Navire avec petit bulbe**

$$c = 0,2C_b^2 - 0,12C_b + 0,1745 \quad (\text{IV.14})$$

- ✓ **Navire avec bulbe important**

$$c = 0,2C_b^2 - 0,12C_b + 0,177 \quad (\text{IV.15})$$

IV.3) Moment fléchissant maximum complémentaire du au passage de la houle

Le moment de flexion dû au passage de la houle est en fait la somme de tous les éléments plus ou moins connus qui viennent modifier le moment en eau calme quand le navire est sur houle.

Ce moment dépend de plusieurs facteurs :

- Les formes de navire ;
- Le profil de la vague ;
- Les variations de la pression dans la vague (effet de Smith) ;
- La vitesse de navire ;

Le calcul mathématique du moment est impossible, et seul le calcul expérimental permet une évaluation sûre.

Dû à la difficulté et l'étendue sur le temps de ces calculs expérimental, il faut donc se contenter sur l'estimation du moment dû au passage de la houle, en éliminant des paramètres secondaire.

Parmi les hypothèses de base permettant le calcul de ce moment :

- Le navire est placé de manière statique (instantanément statique) sur une houle ;
- Le profil de la vague est souvent pris sinusoïdal ;
- Le moment est calculé au maitre couple.

IV.3.1) Formule de Murray : Le profil de la vague est une houle trochoïdale.

Murray a explicité le moment complémentaire sous la forme :

$$M = b L^3 B 10^{-3} [Tm] \quad (IV.16)$$

Avec :

L : est la longueur entre perpendiculaire

B : est la largeur

La longueur b dépend du bloc coefficient et est différente pour le navire sur crête et le navire sur creux.

Les valeurs de b_h correspondant au navire sur crête et b_s correspondant au navire sur creux sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

C_b	b_h sur crête	b_s sur creux
0,7	0,766	0,865
0,72	0,793	0,893
0,74	0,82	0,922
0,76	0,845	0,95
0,78	0,87	0,978
0,8	0,897	1,004
0,82	0,924	1,036

Ces valeurs sont valables pour une hauteur de vague h égale à $\frac{L}{20}$.

Si la hauteur h est différente de $\frac{L}{20}$, il suffit de multiplier les deux coefficients b_h, b_s par le rapport $\frac{h}{\frac{L}{20}}$.

Murray recommande d'apporter une hauteur de houle égale à $h = 1,1\sqrt{L_{pp}}$

(Avec L_{pp} et h sont en pieds)

IV.3.2) Formule de Bureau Veritas : Le profil de la vague est une houle sinusoïdale.

Bureau Veritas a explicité le moment complémentaire sous la forme :

$$M = m B L^2 h \quad (\text{IV.17})$$

Avec :

h : est la hauteur de la vague ;

m est un coefficient dépendant du bloc coefficient et du rapport h/T (si $m=m_h$ navire sur crête et si $m=m_s$ navire sur creux).

Les valeurs de m sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

$C_b \backslash h/T$		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
0,6	m_h	13,99	13,88	13,78	13,68	13,61
	m_s	14,92	15,05	15,18	15,31	15,43
0,7	m_h	16,14	16,04	15,93	15,82	15,73
	m_s	16,79	16,88	16,98	17,08	17,19
0,8	m_h	18,71	18,63	18,54	18,44	18,35
	m_s	19,24	19,29	19,41	19,41	19,62

Remarque :

Le moment dû à la houle sur creux est toujours plus grand que celui dû à la houle sur crête.

IV.3.3) Formule de Vedeler

Norske Veritas a explicité le moment complémentaire par le calcul du coefficient dépendant du bloc coefficient m par :

✓ Sur creux :

$$m_s = 1,86(C_b + 0,8)L^{2,6}B 10^{-4} \quad [\text{Tons.pied}] \quad (\text{IV.18})$$

✓ Sur crête :

$$m_h = 3,2C_bL^{2,6}B 10^{-4} \quad [\text{Tons.pied}] \quad (\text{IV.19})$$

T et B sont exprimés en pieds.

IV.4) Méthode de Harry Cross de distribution des moments

Cette méthode bien connue est particulièrement bien adapté au calcul des portiques tels que ceux relatifs à une structure navale. Un type de chargement de la structure maître couple d'un navire est représenté sur la figure IV.2.

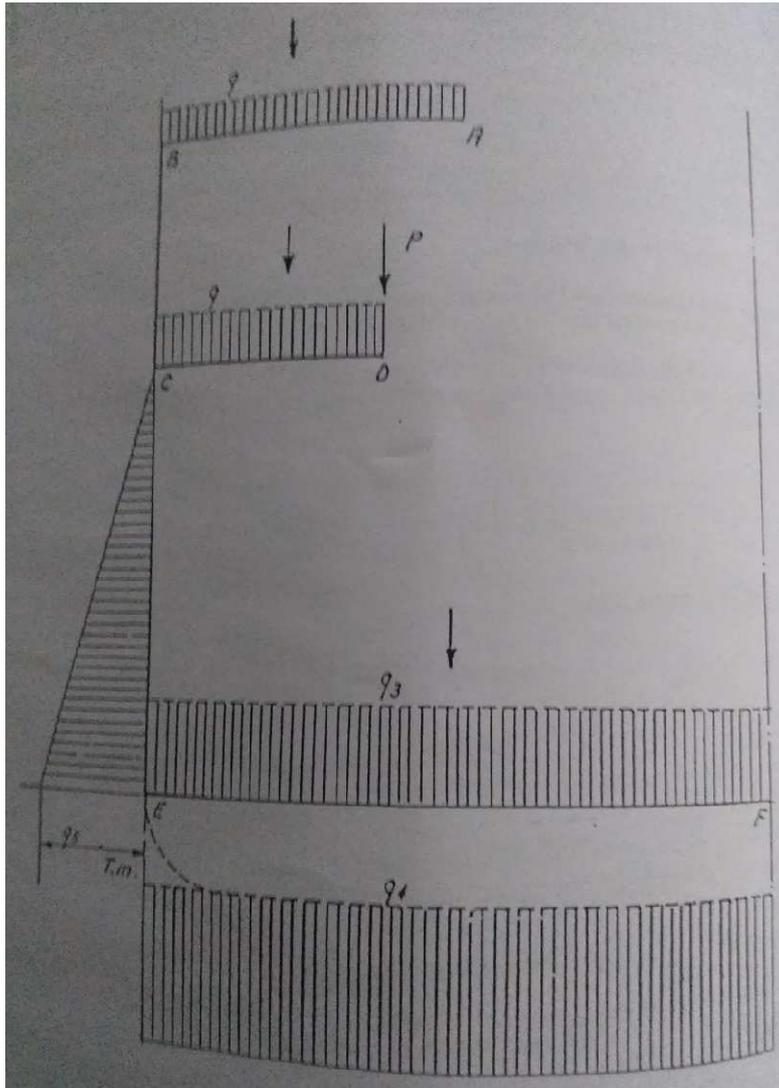


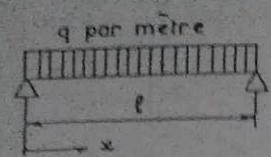
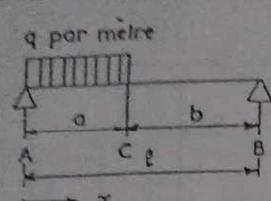
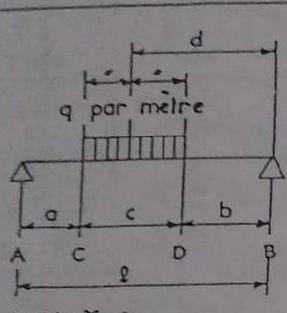
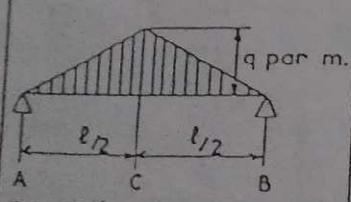
Figure IV.2 : Type de chargement de la structure maître couple d'un navire

Cette méthode est basée sur les étapes suivantes :

- On bloque les différents nœuds en empêchant toute rotation de ceux-ci.
- On calcule alors pour chaque barre les moments transmis par les nœuds aux barres, sous charges extérieures propres à chaque barre. Ces moments sont reproduits à la figure IV.3. Les moments ainsi trouvés correspondent donc à l'action combinée des charges réelles et des couples de fixation des nœuds.
- On relâche ensuite les nœuds les uns après les autres en laissant à chaque fois les autres nœuds fixés. Le moment de fixation d'un nœud se répartit entre les banes qui y aboutissent proportionnellement aux coefficients de répartition de ces barres. L'existence d'un moment de relâchement (de signe contraire au couple de fixation) à l'extrémité d'une barre entraîne à l'autre extrémité de

cette barre existence d'un moment de même signe et égal au produit de ce moment de relâchement par le coefficient de transmission de la barre.

- Lorsqu'on a effectué le tour des nœuds, après les avoir débloqués et rebloqués successivement les uns après les autres, il faut refaire ces opérations un certain nombre de fois, les corrections obtenues à chaque tour tendant vers zéro.
- Le moment final dans une barre, à un nœud donné est égal à la somme du moment d'encastrement calculé initialement et des diverses corrections obtenues à chaque tour des nœuds.
- A la fin de ces opérations, la somme des moments transmis aux barres à chaque nœud doit être algébriquement nulle.

Cas de charge	Moment en un point quelconque
	$\mu = \frac{q}{2} (lx - x^2)$
	$\begin{aligned} \text{De } A \bar{a} C \quad \mu &= \frac{qa(2l-a)x}{2l} - \frac{qx^2}{2} \\ \text{De } C \bar{a} B \quad \mu &= \frac{qa^2}{2} - \frac{qa^2x}{2l} \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \text{De } A \bar{a} C \quad \mu &= \frac{qC}{l} \left(l - \frac{2a+C}{2} \right) x \\ \text{De } C \bar{a} D \quad \mu &= \frac{qC}{l} \left(l - \frac{2a+C}{2} \right) x - \frac{q}{2} (x-a)^2 \\ \text{De } D \bar{a} B \quad \mu &= \frac{qC}{l} \left(l - \frac{2a+C}{2} \right) x - qC \left(x - \frac{2a+C}{2} \right) \\ \text{Max. } \mu_m &= \frac{qCd}{l} \left(a + \frac{Cd}{2l} \right) \quad \bar{a} \quad x = a + \frac{Cd}{l} \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \text{De } A \bar{a} C \quad \mu &= \frac{qlx}{4} - \frac{2qx^3}{6l} \\ \text{En } C \quad \mu_m &= \frac{ql^2}{12} \\ \text{De } C \bar{a} B \quad \mu &= \frac{q}{12} (4x^3 - 12lx^2 + 9l^2x - l^3) \end{aligned}$

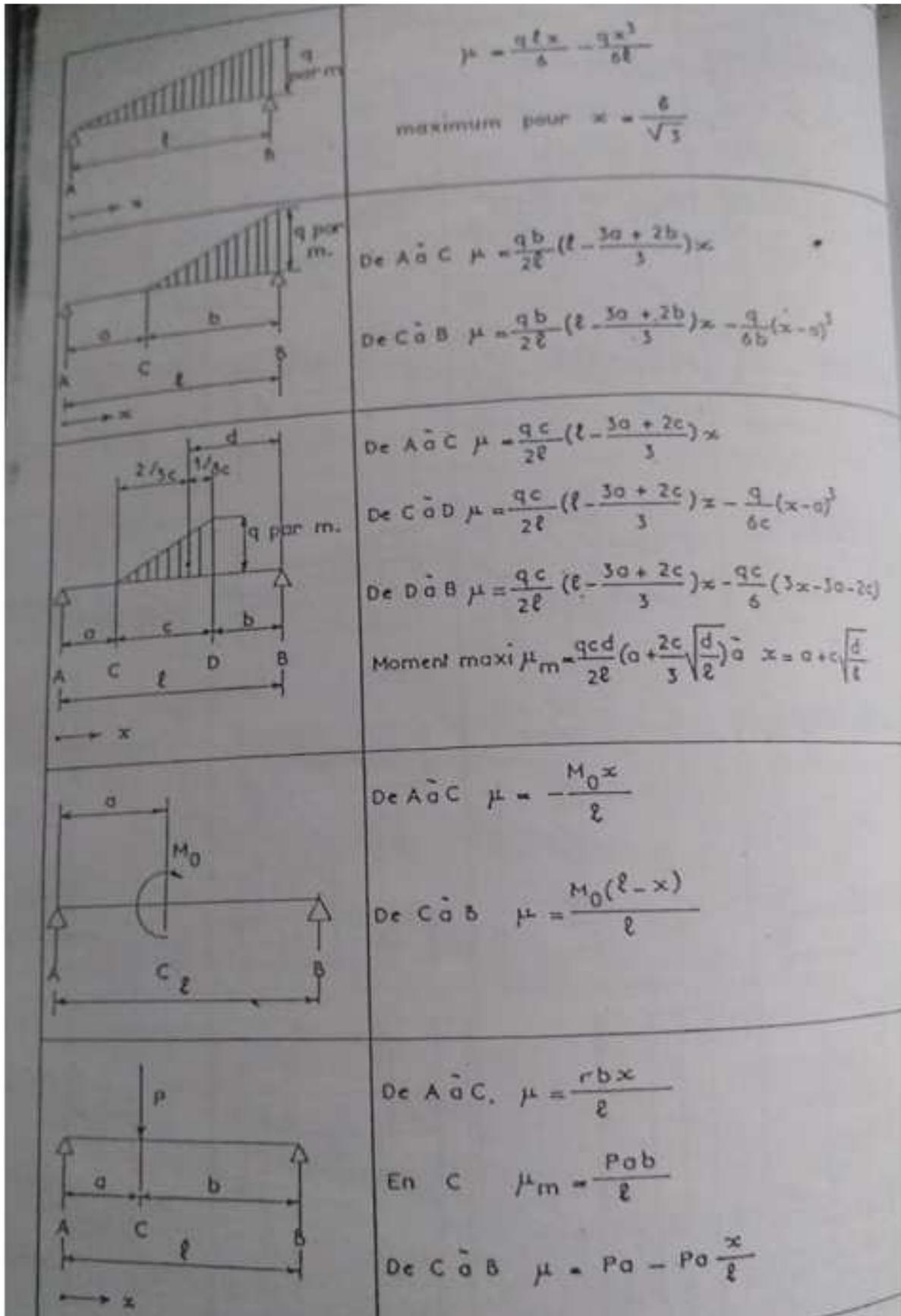


Figure IV.3 : Valeurs des moments transmis par les nœuds aux barres

IV.5) Calcul des moments dus à l'action combinée des charges réelles et des couples de fixation des nœuds

Les formules de WILSON et MANEY permettent de calculer les composantes U_1 , et V_1 du déplacement du centre de gravité d'une section d'abscisse curviligne S_1 et la rotation q_1 de cette section en fonction de ces valeurs U_0 , V_0 et q_0 correspondant à la section curviligne S_0 et du moment de flexion en un point quelconque de la poutre S_0S_1 .

$$U_1 = U_0 + \theta(Y_1 - Y_0) - Y_1 \int_{S_0}^{S_1} \frac{M}{EI} ds + \int_{S_0}^{S_1} \frac{My}{EI} ds \quad (\text{IV.20})$$

$$V_1 = V_0 - \theta(X_1 - X_0) + X_1 \int_{S_0}^{S_1} \frac{M}{EI} ds - \int_{S_0}^{S_1} \frac{Mx}{EI} ds \quad (\text{IV.21})$$

$$\theta_1 = \theta_0 - \int_{S_0}^{S_1} \frac{M}{EI} ds \quad (\text{IV.22})$$

Si :

MA est le moment de flexion en A ;

MAB est le moment transmis par le nœud A à la barre AB ;

MB est le moment de flexion en B ;

MBA est le moment transmis par le nœud B à la barre BA ;

μ est le moment de la flexion en un point quelconque si la poutre repose sur deux appuis.

Le moment en x de la poutre AB vaut :

$$M_x = \mu + M_A + \frac{M_B - M_A}{L} x \quad (\text{IV.23})$$

Comme la convention de signe de la méthode impose le signe positif à un moment agissant dans le sens des aiguilles d'une montre on aura :

$$\begin{aligned} M_A &= -M_{AB} \\ M_B &= -M_{BA} \end{aligned} \quad (\text{IV.24})$$

D'où :

$$M_x = \mu - M_{AB} + \frac{M_{AB} - M_{BA}}{L} x \quad (\text{IV.24})$$

Nous allons définir pour différents cas les valeurs M_{AB} et M_{BA} pour cela il faut calculer M_x et remplacer ces valeurs dans les deux dernières équations de WILSON et MANEY.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) J. L. J. Marchal, 1988 : **Cours de constructions navales**, Tome I, calcul de la structure, Université de LIEGE.
- 2) J. L. J. Marchal, 1988 : **Cours de constructions navales**, Tome II, Description de la structure, Université de LIEGE.
- 3) J. BRAYARD, P. CHATAIGNIER : **Les navires de commerce, efforts subis par le navire a la mer**, Tome 0, introduction et généralités, ENSTA.
- 4) J. BRAYARD, 1979 : **Les navires de commerce, efforts subis par le navire a la mer**, Tome IV, moments fléchissant et efforts tranchants, ENSTA.
- 5) J. BRAYARD, P. CHATAIGNIER: **Les navires de commerce, efforts subis par le navire a la mer**, Tome III, **exemples. Méthodes d'estimation rapides**, ENSTA.
- 6) Yasuhisa Okumoto, Yu Takeda, Masaki Mano, Tetsuo Okada, 2009: **Design of hull ship structures**, Verlag Berlin Heidelberg
- 7) J. PGLL A H1) ET A. DUDEB OUT, 1892: **Théorie du navire**, tome III, dynamique du navire : mouvement de coulis sur houle, mouvement rectiligne horizontal direct (résistance des carènes), Paris.
- 8) Jean Marie AUZON, 1999 : **Fatigue de la coque**, E.N.M.M, pp. 19-26 Marseille.
- 9) Adrian B. Biran , Rubén López-Pulido, 2014 : **Ship Hydrostatics and Stability**, Second Edition