

# CHAPITRE I - STABILITE THEORIQUE

La plate-forme flottante et le moyen de transport flottant existent depuis des milliers d'années et les hommes ont navigué sur les rivières, les fleuves, les lacs, les mers et les océans sans pour autant chercher à comprendre comment cela était possible. Les premières réflexions sont certainement venues avec les premiers échecs. La première brique de l'architecture navale théorique est posée il y a 23 siècles quand Archimède énonce son fameux principe. Un corps flottant n'en est pas pour autant stable. Il faudra attendre encore plus de 20 siècles avant que le premier texte d'une théorie de la stabilité du navire soit disponible [1]. La théorie de la stabilité du corps flottant s'énonce de manière générale mais dans ce document, son application est concentrée sur l'architecture navale.

La première section de ce chapitre est principalement dédiée à la présentation de la géométrie du navire. Ensuite, nous qualifierons et quantifierons sa stabilité à l'inclinaison au voisinage de son point d'équilibre. Le comportement du navire aux fortes inclinaisons fait l'objet de la troisième section. Puis nous verrons l'impact que tous les mouvements de masses, volontaires ou non, ont sur la stabilité du navire, aux petites et aux grandes inclinaisons. La cinquième et dernière section est dédiée à l'embarquement et au débarquement d'une masse.

## 1. NOTIONS PRELIMINAIRES

Le vocabulaire spécifique à la description du navire est très riche. En raison de cette diversité, il est indispensable d'être rigoureux quant aux termes et aux symboles qui sont utilisés. Quand on se place dans un contexte international, la situation est encore plus complexe et l'uniformisation devient un exercice très difficile.

Le comité technique *Symbols and Terminology* de l'ITTC<sup>3</sup> a pris en charge cette pénible tâche (voir référence [15]). A chaque grandeur répertoriée est attribué un symbole ITTC, un symbole informatique, un nom, une définition et une unité lorsque la quantité n'est pas adimensionnelle. Les unités recommandées sont celles du Système International (SI). Dans la mesure du possible, nous nous efforçons de nous rapprocher de cette nomenclature dans le présent ouvrage.

---

<sup>3</sup> International Towing Tank Conference.

## 1.1. Le navire dans son repère

### 1.1.1. Perpendiculaires

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

- les perpendiculaires sont placées à l'extrême avant et à l'extrême arrière d'une surface de flottaison de référence<sup>4</sup> (figure 3) ;
- l'axe de la mèche du safran<sup>5</sup> est pris pour perpendiculaire arrière ; la perpendiculaire avant est placée au point le plus arrière de la ligne d'étrave lorsque le navire est équipé d'un bulbe d'étrave<sup>6</sup> (figure 4).

Les perpendiculaires avant et arrière sont respectivement notées PPAV et PPAR.

La **perpendiculaire milieu**, notée PPM (*midship section*), est une droite verticale située à mi-distance des perpendiculaires avant et arrière.

La distance séparant les perpendiculaires avant et arrière est appelée **longueur entre perpendiculaires** et notée  $L_{PP}$  (*length between perpendiculars*). Elle correspond à la longueur de la surface de flottaison de référence lorsque les perpendiculaires sont définies ainsi.

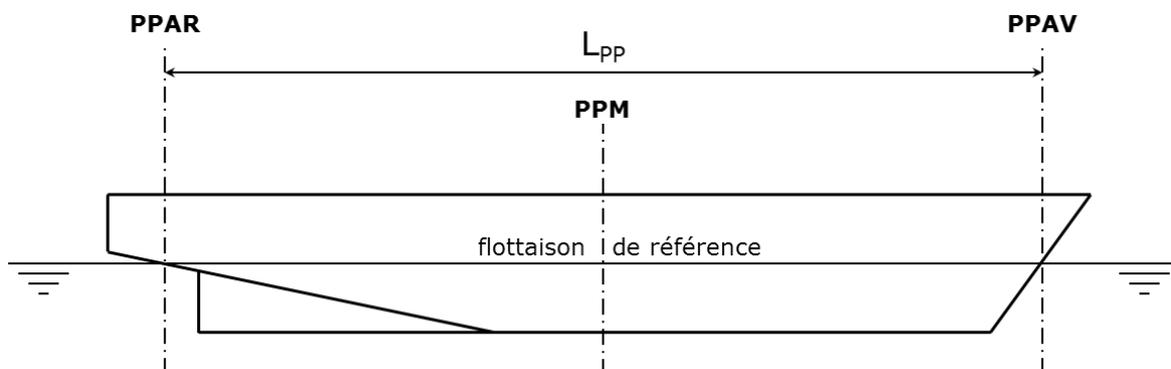


Figure 3 – Perpendiculaires définies par une flottaison de référence

<sup>4</sup> La surface de flottaison est définie un peu plus loin.

<sup>5</sup> La mèche est une solide pièce métallique autour de laquelle pivote le safran, également appelé gouvernail, pour manœuvrer le navire.

<sup>6</sup> Excroissance des formes immergées située à l'avant du navire destinée à réduire la résistance que l'eau oppose à sa vitesse.

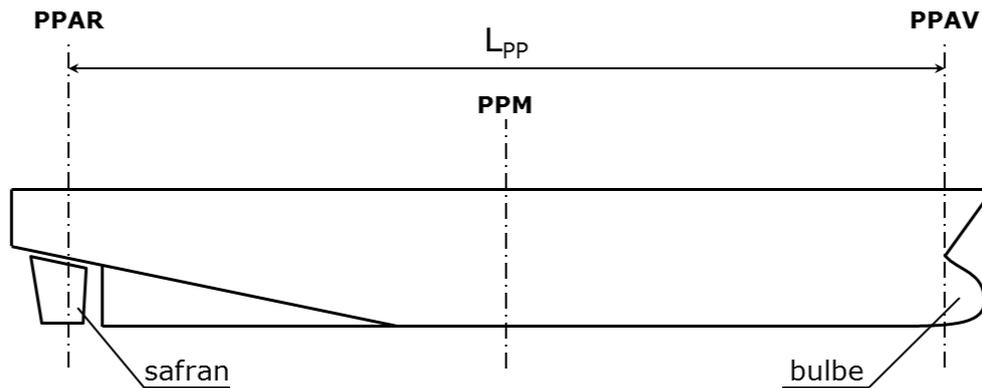


Figure 4 – Perpendiculaires définies par le safran et le bulbe d'étrave

### 1.1.2. Ligne de base

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

Si la quille du navire est orthogonale aux perpendiculaires, la ligne de base est généralement définie comme étant le dessus de la tôle de quille.

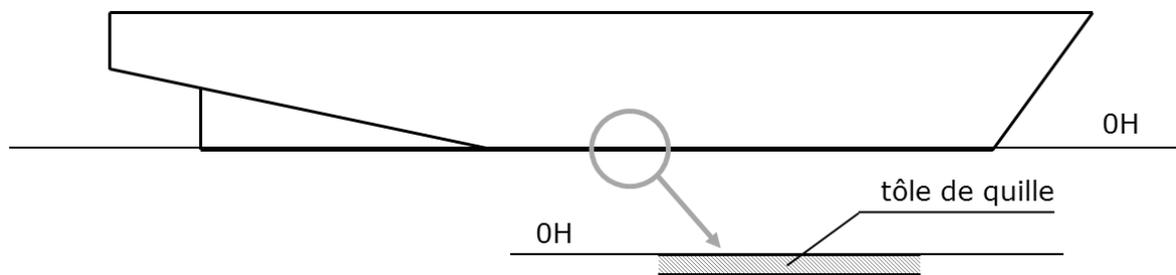


Figure 5 – Ligne de base d'un navire à quille horizontale

### 1.1.3. Relevé de quille

Dans le cas contraire, la ligne de base est placée à la hauteur du point d'intersection entre le dessus de la tôle de quille et la perpendiculaire milieu. On définit alors le **relevé de quille**, (*design drop of the keel line*) distance verticale séparant les points d'intersection de la ligne de quille avec les perpendiculaires avant et arrière. Il est noté  $d_{KL}$  selon les recommandations de l'ITTC [15].

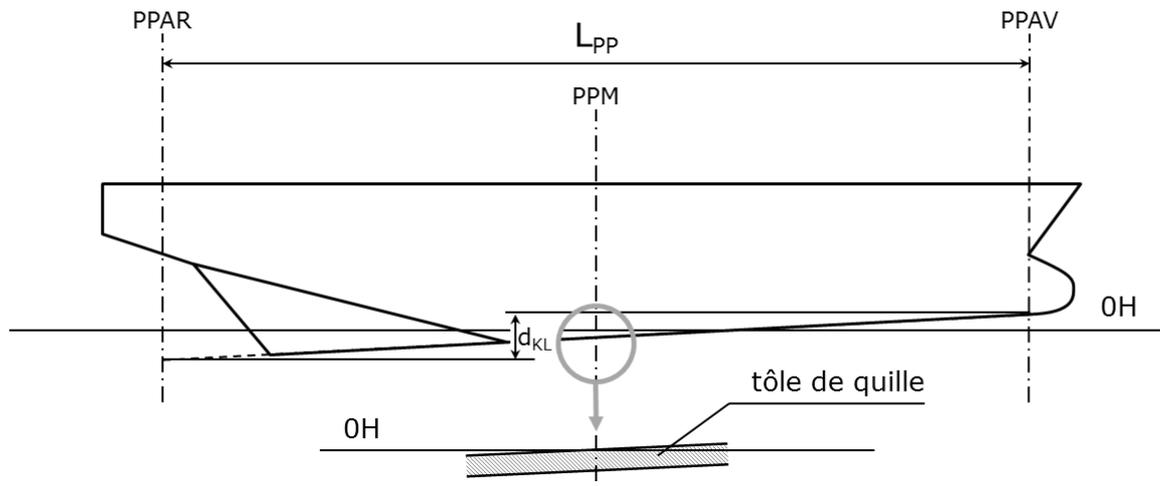


Figure 6 – Ligne de base et relevé de quille

#### 1.1.4. Repère

La perpendiculaire arrière et la ligne de base sont utilisées pour définir un repère orthonormé lié au navire :

- l'axe X est la ligne de base (OH) ; les coordonnées longitudinales sont croissantes vers l'avant ;
- l'axe Y est l'axe transversal du navire, normal aux deux autres axes ; les coordonnées transversales sont positives à bâbord<sup>7</sup> ;
- l'axe Z est la perpendiculaire arrière (PPAR) ; les coordonnées verticales sont croissantes vers le haut.

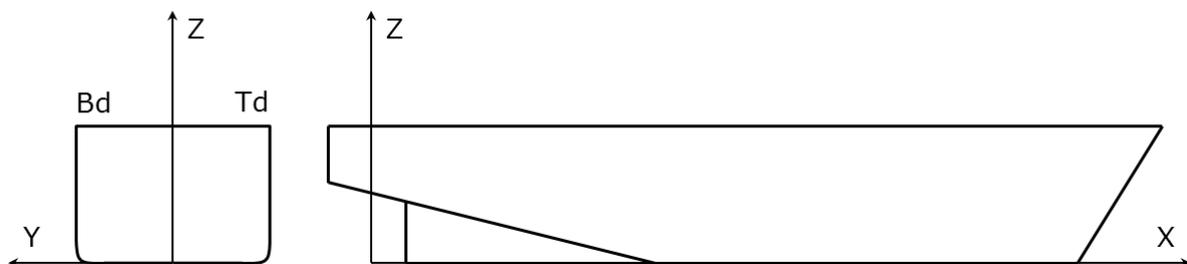
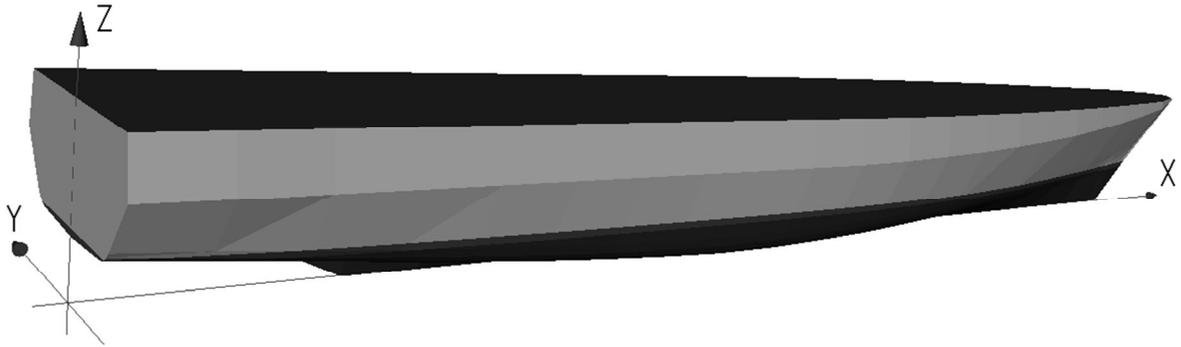


Figure 7 – Repère (vue transversale et élévation longitudinale)

Le repère proposé ici est une convention parmi d'autres. Il est également possible d'orienter l'axe Y vers tribord, définissant ainsi un repère indirect. Dans le monde de l'offshore, l'usage est d'orienter Y vers tribord et Z vers le bas (repère direct).

<sup>7</sup> Bâbord (abréviation Bd, *port* en anglais) est le bord gauche du navire lorsqu'on regarde vers l'avant. Tribord (abréviation Td, *starboard* en anglais) est le bord opposé.



*Figure 8 – Repère (vue perspective)*



*La goélette Etoile devant l'Ile de la Giraglia*

## 1.2. Le navire et ses formes

### 1.2.1. Carène

La carène est le volume immergé. Le **volume de carène** est noté  $\nabla$  (prononcer vé, *displacement volume* en anglais) et est généralement exprimé en mètres cubes. On trouve encore toutefois la notion de tonneaux<sup>8</sup>, y compris dans certains documents officiels de l'OMI.

Il ne faut pas confondre la notion de carène avec la coque. La carène est la partie immergée de la coque. Elle change de géométrie lorsque le navire s'incline ou s'enfonce. La géométrie de la coque ne change pas.

Le centre du volume de carène, appelé **centre de carène**, est noté B (*centre of buoyancy*). Sa position change lorsque le navire s'incline ou s'enfonce. Les coordonnées longitudinale, transversale et verticale de B sont exprimées dans le repère précédemment défini et respectivement notées :

- LCB (*longitudinal centre of buoyancy*) ;
- YB ou TCB (*transverse centre of buoyancy*) ;
- KB ou VCB (*vertical centre of buoyancy*).

La coordonnée transversale (YB) est peu utilisée. Elle est nulle si la carène est symétrique (à gîte nulle).

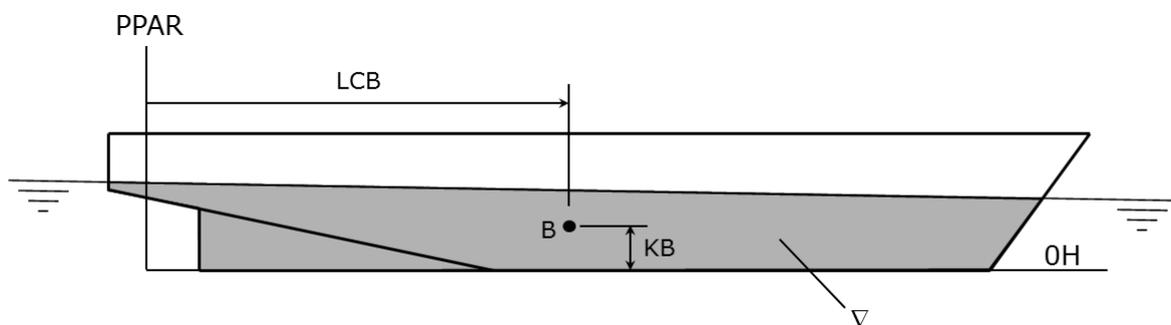


Figure 9 – Volume et centre de carène

La surface extérieure de la carène correspond à la surface mouillée. Elle est peu utilisée en hydrostatique, hormis dans la démonstration du théorème d'Archimède (voir annexe B). En revanche, en hydrodynamique, elle est couramment utilisée. Elle sert notamment à déterminer le coefficient de résistance de frottement (voir référence [28]).

<sup>8</sup> Un tonneau représente le volume de 100 pieds cubes, soit 2,83 m<sup>3</sup>.

### 1.2.2. Surface de flottaison

La **surface de flottaison** (*waterplane* en anglais) est l'intersection du plan de la mer (supposée parfaitement calme) avec le volume du navire. L'aire de la surface de flottaison est notée  $A_{WP}$  et exprimée en mètres carrés.

Le centre de la surface de flottaison, appelé **centre de flottaison**, est noté F (*centre of flotation*).

La coordonnée longitudinale du centre de flottaison est notée LCF (*longitudinal centre of flotation*). La coordonnée transversale, rarement utilisée, est notée YF ou TCF (*transverse centre of flotation*). Elle est nulle si la surface de flottaison est symétrique. La coordonnée verticale, rarement utilisée également, est exprimée sous la forme d'un tirant d'eau<sup>9</sup> et notée  $T_F$ .

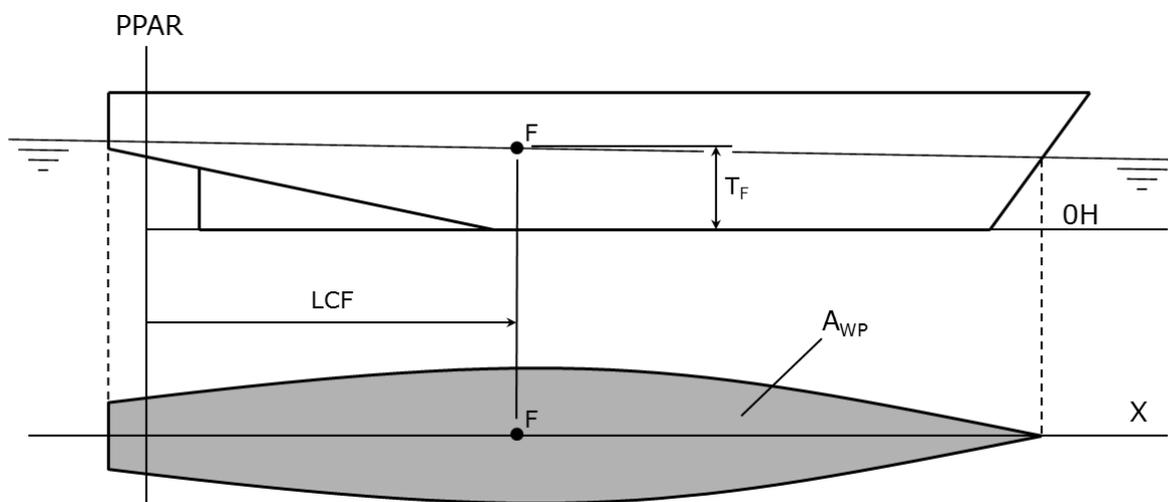


Figure 10 – Surface et centre de flottaison

Deux flottaisons d'un même navire sont dites **isocarènes** si elles délimitent des carènes de géométries différentes mais de même volume (*equivolume inclinations* en anglais). Par exemple, le déplacement d'une masse à bord d'un navire peut générer une variation d'inclinaison isocarène.

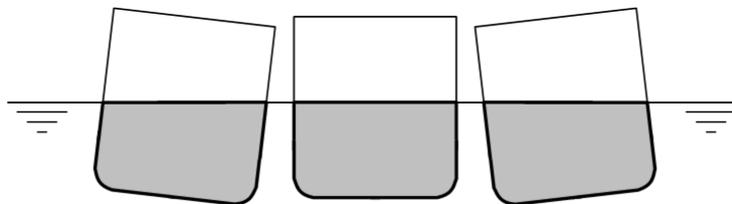


Figure 11 – Flottaisons isocarènes

<sup>9</sup> Les tirants d'eau sont définis un peu plus loin dans le présent chapitre.

Deux flottaisons parallèles d'un même navire sont dites **isoclines** (*parallel waterplanes*). Par exemple, l'embarquement ou le débarquement d'une masse sans variation d'inclinaison génère une variation d'enfoncement isocline.

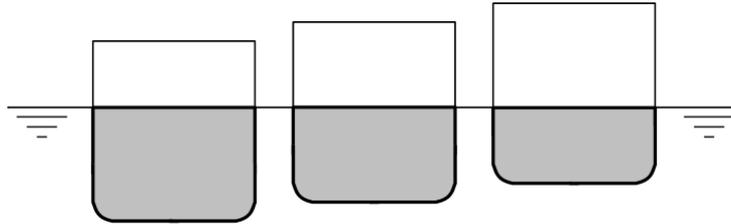


Figure 12 – Flottaisons isoclines

### 1.2.3. Volume étanche

Le **volume étanche** (*watertight volume*) est le volume matérialisé par la carène et situé sous un pont appelé **pont d'étanchéité** (*watertight deck*). Le volume étanche est complété par celui des appendices<sup>10</sup> s'ils sont eux-mêmes étanches, et « évidé » des ouvertures pratiquées dans la coque<sup>11</sup>. Les **superstructures** (*superstructure* en anglais), situées au-dessus du pont d'étanchéité, sont considérées comme non étanches à l'immersion.

La réglementation militaire définit deux ponts d'étanchéité différents :

Le **pont exposé** (*exposed deck*) garantit l'étanchéité aux intempéries, aux vagues et aux embruns. Il ne garantit pas l'étanchéité à l'immersion prolongée. Il constitue la limite supérieure du volume étanche du navire à l'état intact.

Le **pont de cloisonnement** (*bulkhead deck*) garantit l'étanchéité à l'immersion prolongée. Il constitue la limite du volume étanche du navire en cas d'avarie (notamment envahissement). Il peut être partiellement ou totalement confondu avec le pont exposé. Dans le cas contraire, il est situé en dessous.

La figure 13 et la figure 14 représentent respectivement le volume étanche d'un même navire limité par le pont exposé et par le pont de cloisonnement. On note la présence des lignes d'arbres, des hélices, du gouvernail, des quilles antiroulis et d'un bulbe sonar.

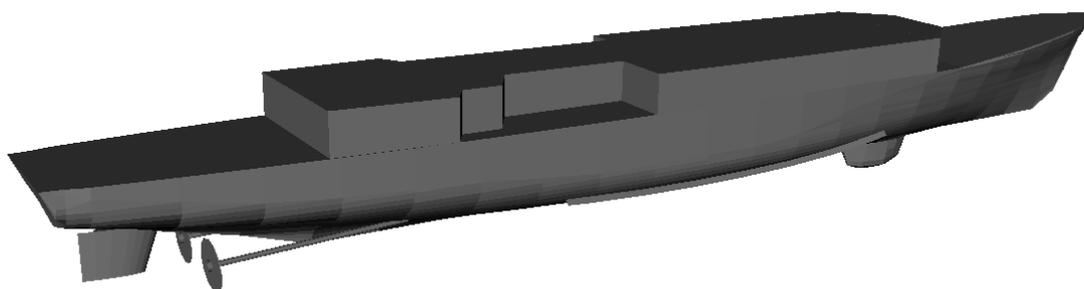


Figure 13 – Volume étanche limité par le pont exposé

<sup>10</sup> Safrans, lignes d'arbres, hélices, quilles anti-roulis, bulbes sonars, etc.

<sup>11</sup> Tunnels des propulseurs latéraux, logements des ailerons de stabilisation rétractables, prises d'eau de mer pour la machine, etc.