

Mer et physique : flottabilité d'un navire

Partie 2 : poussée d'Archimède, équilibre d'un navire

par **Nicolas CHEYMOL**

Académie de Montpellier

nicolas.cheymol@ac-montpellier.fr

Dominique DUCOURANT, Jean-Jacques CALLIET

Académie de Montpellier

Pierre FABRE

Lycée Joliot Curie - 34200 Sète

Guillaume PHILIPPE

Campus des métiers et des qualifications

Nauti-campus Occitanie

et **Marcel OLIVER**

Fédération française de voile

CET ARTICLE s'inscrit dans une nouvelle série de quatre articles sur le thème « Mer et physique » qui s'inspire de la série « Aéronautique et physique ». Ce second article⁽¹⁾ aborde la flottabilité d'un navire à l'aide d'une approche expérimentale ainsi que les problématiques de chargement d'un navire en fonction des zones de navigation.

INTRODUCTION

Un diplôme national d'initiation à la culture maritime et aux métiers de la mer, le Brevet d'initiation à la mer⁽²⁾ (BIMer), a été créé en 2020 [1-2]. Le BIMer est fortement inspiré du Brevet d'initiation à l'aéronautique (BIA) ; le BIMer est au monde maritime ce que le BIA⁽³⁾ est au monde aéronautique. Ainsi, le BIMer permet une acculturation du monde maritime et de la découverte des métiers et doit renforcer l'attractivité des métiers des industries de la mer souvent peu connue des élèves. Le BIMer c'est aussi un

- (1) Les *Bup* d'avril et mai aborderont la stabilité du navire et les forces aéro et hydrodynamiques s'exerçant sur un voilier.
- (2) Le BIMer a été officialisé par le décret n° 2020-1158 du 21 septembre 2020 après l'avis du Conseil supérieur de l'éducation du 9 juillet 2020. Il a été complété par l'arrêté du 21 septembre 2020 relatif au Brevet d'initiation à la mer et par l'arrêté du 21 septembre 2020 relatif au Certificat d'aptitude à l'enseignement d'initiation à la mer (CAEIMer) (cf. *Bulletin officiel* n° 37 du 1^{er} octobre 2020).
- (3) Brevet d'initiation aéronautique, *Bulletin officiel* n° 11 du 12 mars 2015 : https://cache.media.education.gouv.fr/file/11/35/4/ensel0689_annexe1_398354.pdf

moyen de donner davantage de sens aux enseignements disciplinaires, la « mer » étant le fil rouge. Que l'on enseigne de la physique-chimie, des mathématiques, de la SVT, de l'histoire géographie, de l'Éducation physique et sportive (EPS), de l'anglais... on peut toujours puiser des éléments du programme disciplinaire en lien avec la préparation du BImer. Le BImer permet notamment de faire des sciences autrement en privilégiant une approche contextualisée et ancrée sur le réel et les métiers.

De nombreuses notions abordées dans le programme⁽⁴⁾ de préparation au BImer mobilisent la physique et la chimie. Le Marco Polo de la compagnie française CMA-CGM est le porte-conteneurs le plus gros du monde (cf. figure 1). Ses caractéristiques sont impressionnantes : 396 m de long, un maître-bau de 53,5 m, un tirant d'eau de 16 m, un port en lourd de 188 470 tonnes. Il peut transporter 16 020 EVP⁽⁵⁾. Comment ces géants des mers peuvent-ils flotter ?

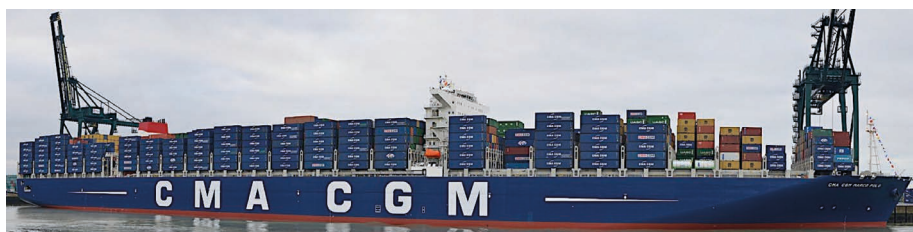


Figure 1 - Le Marco Polo, plus gros navire-porte-conteneurs au monde.

La figure 2 (cf. page ci-contre) présente un extrait du programme de préparation à l'examen du BImer sur la flottabilité d'un navire que nous allons étudier maintenant.

Il s'agit d'estimer la capacité à flotter d'un navire en fonction de sa forme, de son chargement et de l'état de la mer. Pour ce faire, nous devons présenter l'action mécanique exercée par l'eau sur la coque du navire, à l'origine de la flottabilité ; elle est modélisée par une force : la poussée d'Archimède, au programme de l'enseignement de spécialité physique-chimie de la classe de terminale⁽⁶⁾ (cf. figure 3, page ci-contre).

- (4) Le programme du BImer est détaillé dans le *Bulletin officiel* n° 37 du 1^{er} octobre 2020 : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/textes/tout-niveau/brevet-dinitiation-la-mer-bimer/12821-arrete-bimer-21-septembre-2020.pdf>
- (5) La capacité d'un porte-conteneurs est exprimée en EVP (Équivalent vingt pieds, en anglais : *Twenty-foot equivalent unit* (TEU)). C'est une unité approximative de mesure des terminaux et navires porte-conteneurs basée sur le volume d'un conteneur de 20 pieds. Un conteneur est caractérisé par sa longueur : les plus communs sont les 20 pieds (6,1 m) équivalents à 1 EVP et les 40 pieds (12 m) équivalents à 2 EVP.
- (6) *Bulletin officiel* spécial n° 8 du 25 juillet 2019 : https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf

Compétences attendues	Savoirs associés	Niveau d'acquisition des savoirs
Estimer la capacité à flotter d'un navire en fonction de sa forme, de son chargement et de l'état de la mer. Identifier les principes essentiels de la sécurité maritime.	2.1. La flottabilité des navires ◆ Notions préliminaires. ◆ Principe d'Archimède (centre de carène). ◆ Principe de force mécanique, point d'application, intensité, direction, sens. ◆ Centre de gravité. ◆ Réserve de flottabilité (marque de franc-bord). ◆ Étanchéité à bord d'un navire.	2

Figure 2 - Éléments du programme de préparation du BIMer correspondant au domaine 2.

3. Modéliser l'écoulement d'un fluide

Poussée d'Archimède	Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. <i>Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.</i>
---------------------	---

Figure 3 - Extrait du programme de spécialité physique-chimie de la classe de terminale.

Dans cet article, on fera référence à un certain nombre de caractéristiques du navire présentées dans l'article du *Bup* paru au mois de février 2022 [3]. Par ailleurs, la chaîne YouTube de l'académie de Montpellier, « Canal BIMer » propose une vidéo sur la flottabilité des navires illustrée à l'aide de nombreuses expériences, point d'appui de notre article.

1. ÉQUILIBRE VERTICAL D'UN NAVIRE : CONDITION DE FLOTTABILITÉ

1.1. Modélisation de l'action exercée par l'eau sur le navire (corps flottant)

Dans cette étude, on néglige l'action exercée par l'air sur le navire et donc on étudiera seulement l'action exercée par l'eau sur le navire et plus précisément sur la carène qui correspond au volume immergé de la coque du navire (cf. figure 4).

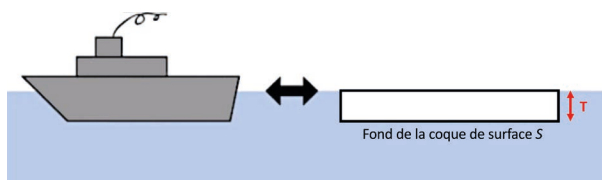


Figure 4 - Modélisation de la situation physique.

Soit un parallélépipède rectangle de volume égal à la carène du navire et de hauteur égale au tirant d'eau T , immergé dans une eau de masse volumique ρ_{eau} (cf. figure 5).

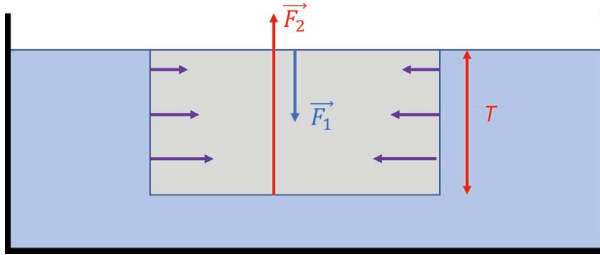


Figure 5 - Forces exercées par l'eau sur la carène du navire.

Sur chaque face de la carène, il s'exerce une force pressante : $F = p \times S_{\text{face}}$ perpendiculaire à cette surface et qui augmente avec la profondeur : $F_2 > F_1$, car $p_2 > p_1$. La face supérieure, qui correspond à la surface de flottaison, se trouve à une profondeur nulle, la face inférieure à une profondeur égale au tirant d'eau (T), du navire pour un état de charge donné. La pression statique à la surface de l'eau est $p_1 = p_{\text{atm}}$. L'intensité de la force pressante, dirigée vers le bas, F_1 exercée par l'air sur la face supérieure de la carène vaut donc : $F_1 = p_{\text{atm}} \cdot S$.

La pression statique à la profondeur correspondant au tirant d'eau T vaut :

$$p_2 = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot T + p_{\text{atm}}.$$

La force pressante ascendante F_2 sur la face inférieure de la carène est donc :

$$F_2 = p_2 \cdot S + p_{\text{atm}} S = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot T \cdot S + p_{\text{atm}} S.$$

Remarque : on ne prend pas en compte les forces pressantes sur les faces latérales de la carène, car celles-ci se compensent mutuellement.

Comme $F_2 > F_1$, le corps est soumis à une force résultante $F_A = F_1 + F_2$ qui est dirigée vers le haut et qui a pour intensité :

$$F_A = F_2 - F_1 = (\rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot T \cdot S + p_{\text{atm}} \cdot S) - (p_{\text{atm}} \cdot S) = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot S \cdot T = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot V_{\text{carène}}.^{(7)}$$

On retrouve la formule du déplacement du navire défini dans l'article [3] paru dans *Le Bup* de février 2022⁽⁸⁾. Ainsi, dans un référentiel galiléen, un corps flottant immobile dans l'eau (au repos) reçoit une poussée verticale dirigée du bas vers le haut,

(7) On peut montrer que cette expression reste valable pour toute autre forme que pourrait avoir le corps immergé.

(8) Le déplacement correspond au poids de l'eau équivalent au volume immergé de la coque (carène). Pour le physicien, le déplacement ainsi défini n'est autre que la valeur du poids du volume d'eau déplacé par le navire.

résultante des forces de pression exercée par l'eau sur ce corps qu'elle entoure. Cette poussée est opposée à la force poids du volume d'eau déplacé, c'est-à-dire au poids du fluide remplacé par la partie immergée de l'objet. L'intensité de cette poussée est égale à celle du poids du fluide déplacé. On l'appelle la poussée d'Archimède⁽⁹⁾, notée $\mathbf{F}_A$.

1.2. Caractéristiques de la poussée d'Archimède

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

- ◆ le point d'application : le centre de gravité du volume immergé, que l'on appelle le centre de carène⁽¹⁰⁾ pour les navires, noté C ou B en anglais (*Buoyancy* qui signifie flottabilité en anglais) ;
- ◆ la direction : la verticale ;
- ◆ le sens : vers le haut ;
- ◆ la valeur : $F_A = m_{\text{eau déplacée}} \times g = \rho_{\text{eau}} \times V_{\text{carène}} \times g$ ⁽¹¹⁾.

Représentation dans le cas d'un navire (cf. figure 6) :

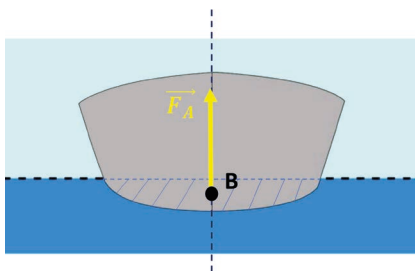


Figure 6 - Représentation de la poussée d'Archimède.

1.3. Condition d'équilibre statique d'un corps flottant : condition de flottabilité

Considérons un navire immobile avec un état de charge donné. Le navire est soumis à deux forces verticales et de sens contraires :

- ◆ le poids ($\mathbf{P}$) vertical et dirigé vers le bas qui s'applique au centre de gravité (G) du navire ;

- (9) C'est la raison pour laquelle un objet semble plus léger quand on le porte dans l'eau alors que son poids dans l'air ou dans l'eau est le même. Ceci est dû à l'existence de la poussée d'Archimède.
- (10) Ce centre de carène n'est pas fixe et varie en fonction de l'enfoncement du navire dans l'eau mais aussi en fonction des mouvements du navire : gîte, tangage, pilonnement...
- (11) Avec : F_A en Newton (N) ; ρ_{eau} , la masse volumique de l'eau en kg/m^3 ; $V_{\text{carène}}$, le volume de la coque immergée en m^3 ; g , le champ de pesanteur dont la valeur sur Terre est en moyenne $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- ◆ la poussée d'Archimède ($\mathbf{F}_A$) verticale et dirigée vers le haut qui s'applique au centre de carène C du navire.

Pour que ce navire soit à l'équilibre, deux conditions sont nécessaires :

- ◆ Première condition : la somme vectorielle des forces appliquées au navire doit être nulle :

$$\mathbf{P} + \mathbf{F}_A = \mathbf{0} \quad \text{soit} \quad P = F_A.$$

Cette condition signifie que le navire est à l'équilibre dans le sens de la verticale terrestre : c'est la condition de flottabilité⁽¹²⁾.

- ◆ Seconde condition : la somme des moments⁽¹³⁾ des forces par rapport à un point quelconque doit être nulle :

$$\mathcal{M}_{\mathbf{P}/O} + \mathcal{M}_{\mathbf{F}/O} = 0.$$

En considérant un point O quelconque, cette seconde condition peut s'écrire pour le navire :

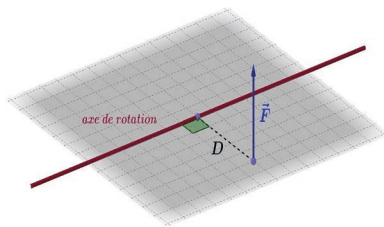
$$\mathbf{OG} \wedge \mathbf{P} + \mathbf{OB} \wedge \mathbf{F}_A = \mathbf{0}.$$

Or $\mathbf{P}$ et $\mathbf{F}_A$ sont dirigés en sens contraire par rapport à la verticale terrestre et $P = F_A$ d'où :

$$\mathbf{OG} \wedge \mathbf{P} - \mathbf{OB} \wedge \mathbf{P} = \mathbf{0}.$$

Soit $\mathbf{BG} \wedge \mathbf{P} = \mathbf{0}$. Ainsi, de cette seconde condition, on déduit que les vecteurs $\mathbf{CG}$ et $\mathbf{P}$ sont colinéaires, or $\mathbf{P}$ est de direction verticale et donc il en est de même de $\mathbf{CG}$: le navire est en équilibre si C et G sont situés sur une même verticale terrestre (cf. figure 7, page ci-contre).

- (12) La condition de flottabilité ne sera pas modifiée lors de l'inclinaison du navire. Deux flottaisons d'un même navire seront dites isocarènes si elle délimitent des carènes de géométrie différente mais de même volume. Par exemple, le déplacement d'une masse à bord d'un navire peut générer une variation d'inclinaison isocarène.
- (13) Le moment d'une force F , appliquée en un point M , par rapport à un point quelconque O dans l'espace est le vecteur défini par : $\mathcal{M}_{\mathbf{F}/O} = \mathbf{OM} \wedge \mathbf{F}$. Dans le cas où la force $\mathbf{F}$ est orthogonale à l'axe de rotation passant par O (c'est-à-dire situé dans le plan perpendiculaire contenant l'axe de rotation et le bras de levier) l'intensité du moment de cette force est le produit de l'intensité F par la distance D (appelée aussi bras de levier) entre le point d'application de la force et l'axe de rotation : $M = F \times D$. F est exprimée en newton (N), D est exprimée en mètre (m), le moment d'une force est exprimé en newton-mètre (Nm).



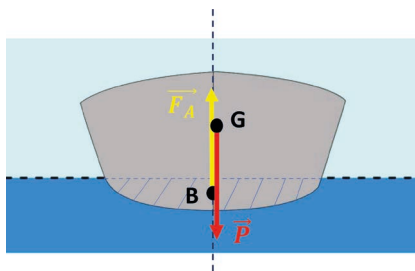


Figure 7 - Schéma des deux forces appliquées sur le navire portées la même droite d'action.
G au-dessus de B.

Lorsque l'équilibre est possible, il s'établit automatiquement, le navire prenant de lui-même une position telle que sa carène satisfasse aux conditions ci-dessus.

Remarques

- ◆ La condition d'équilibre au niveau des forces se traduit en terme de masses volumiques par la relation : $\rho_{\text{navire}} \cdot V_{\text{navire}} \cdot g = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot V_{\text{carène}}$, d'où la condition : $\rho_{\text{navire}} \cdot V_{\text{navire}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{carène}}$. Comme $V_{\text{navire}} > V_{\text{carène}}$, pour que le navire flotte il faut que $\rho_{\text{navire}} < \rho_{\text{eau}}$. Ceci n'est vrai que parce que le navire est creux et contient de l'air.
- ◆ Pour un navire de commerce ou de pêche, le centre de gravité G est situé au-dessus du centre de carène. Dans le cas d'un voilier, le centre de gravité se situe en dessous du centre de carène ; en effet, la quille⁽¹⁴⁾ du voilier, souvent en plomb, concentre une grande partie de la masse du voilier (cf. figure 8).

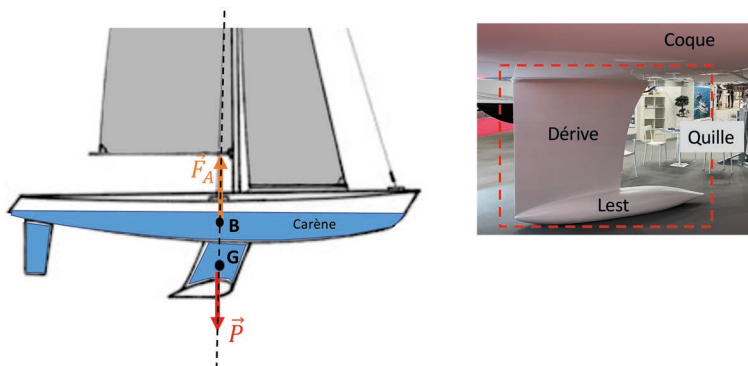


Figure 8 - Schéma des deux forces appliquées sur le voilier.
G est en dessous de B.

(14) La quille d'un voilier monocoque désigne la partie la plus basse du navire. Elle sert de plan anti dérive et porte généralement un lest. Ce lest est disposé en partie basse de la quille pour descendre au maximum le centre de gravité et augmenter la stabilité transversale.

2. APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE LA FLOTTABILITÉ D'UN NAVIRE ET PARAMÈTRES D'INFLUENCE

2.1. Mise en évidence et mesure de la poussée d'Archimède ; notion de poids apparent

Réalisons une expérience quantitative pour estimer la valeur de la poussée d'Archimède en mesurant l'intensité du poids (P) d'un objet de masse $m = 250\text{ g}$ à l'aide d'un dynamomètre respectivement immergé dans l'air puis dans l'eau (cf. figure 9).

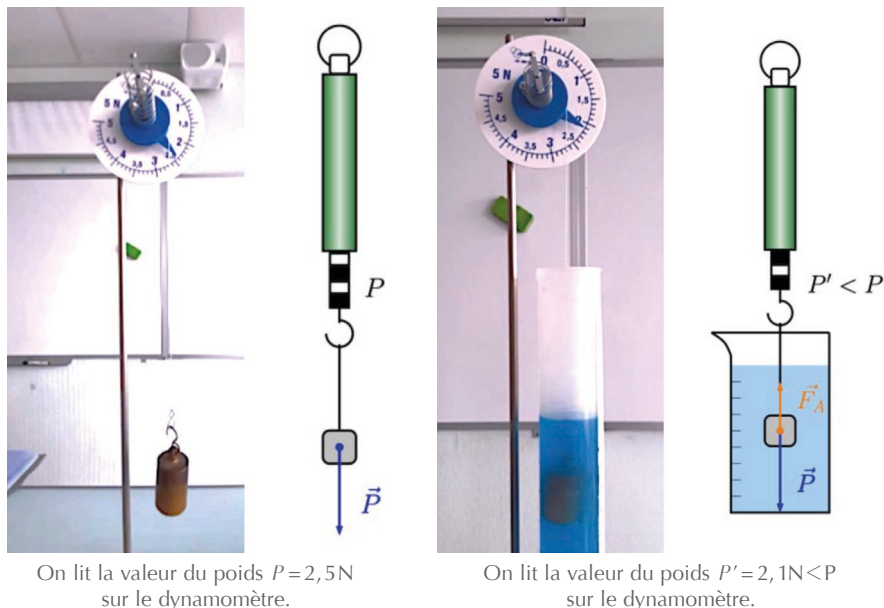


Figure 9 - Mesure de la poussée d'Archimède.

On constate que la valeur du poids de l'objet plongé dans l'eau semble être devenue plus faible que celui dans l'air. Cependant, il est évident que le poids de l'objet n'a pas changé. En effet, la Terre attire l'objet toujours avec la même intensité. En conséquence, il doit y avoir une force supplémentaire, exercée par le liquide sur l'objet. Cette force doit être verticale et orientée vers le haut (car elle s'oppose au poids). C'est la poussée d'Archimède (F_A). L'intensité de la force mesurée par le dynamomètre lorsque le corps plonge dans le liquide est en fait le poids apparent P' . C'est la force résultante du poids P et de la poussée d'Archimède F_A : $F_A + P = P'$. Soit : $P' = P - F_A$. Ainsi, l'intensité de la poussée d'Archimède vaut : $F_A = P - P'$.

Dans notre expérience, on trouve une valeur pour la poussée d'Archimède :

$$F_A = P - P' = 2,5 - 2,1 = 0,4\text{ N}.$$

Avec cette expérience, on constate de plus que la poussée d'Archimède est indépendante de la profondeur d'immersion et de l'orientation du corps dans le liquide si celui-ci est complètement immergé. En revanche si l'objet est partiellement immergé (ce qui est bien sûr le cas des navires), la poussée d'Archimède exercée par l'eau ne prend en compte que la partie du navire immergée (carène) et l'on néglige la poussée d'Archimède exercée par l'air sur la partie émergée du navire.

2.2. Vérification expérimentale de la condition de flottabilité

Tout corps solide complètement immergé dans un liquide en équilibre subit de la part du liquide une poussée verticale ascendante dont l'intensité est égale au poids du volume de liquide déplacé.

On mesure la masse d'un objet dans l'air ($m_{\text{objet}} = 34,81 \text{ g}$). On plonge cet objet dans un bécher « trop-plein », rempli d'eau puis on recueille l'eau « déplacée » dans un bécher posé sur une balance préalablement tarée (cf. figure 10). On mesure la masse du volume d'eau récupérée, qui correspond au volume d'eau déplacé par l'objet immergé ($m_{\text{liq dépl}} = 34,86 \text{ g}$).

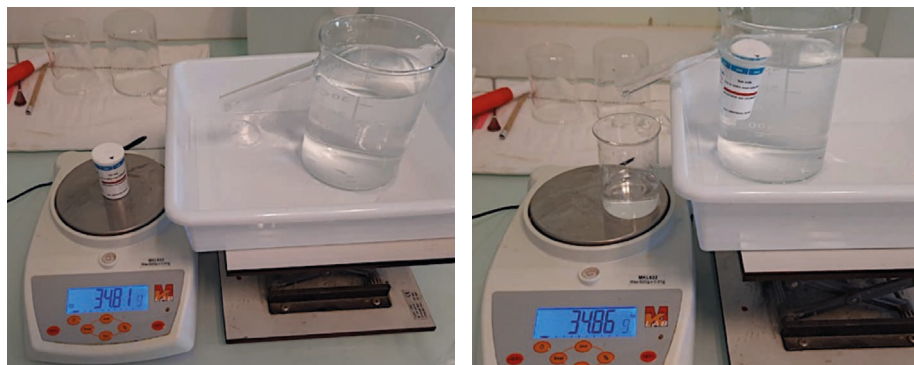


Figure 10 - Vérification expérimentale de la condition de flottabilité.

On peut calculer le poids du volume d'eau déplacé et le poids de l'objet :

$$P_{\text{objet}} = m_{\text{objet}} \cdot g = 34,81 \cdot 10^{-3} \times 9,81 = 0,341 \text{ N} \approx F_A.$$

$$P_{\text{eau dépl}} = m_{\text{eau}} \cdot g = 34,86 \cdot 10^{-3} \times 9,81 = 0,342 \text{ N} \approx F_A.$$

On constate qu'aux erreurs expérimentales près que le poids de volume d'eau déplacée, correspond au poids de l'objet immergé. On retrouve le principe d'Archimède :

$$F_A = m_{\text{eau déplacée}} \times g = \rho_{\text{eau}} \times V_{\text{eau déplacée}} \times g.$$

Il s'agit maintenant d'étudier les différents facteurs d'influence sur la valeur de la poussée d'Archimède.

2.3. Influence du volume d'eau déplacée sur la valeur de la poussée d'Archimède

On réalise une expérience en utilisant un objet de même masse que dans l'expérience du paragraphe 1. ($m_{\text{objet}} = 250 \text{ g}$), mais dont le volume est plus grand (cf. figure 11).



Figure 11 - Objet de même masse, mais de plus grand volume.

On mesure l'intensité du poids et du poids apparent de l'objet à l'aide d'un dynamomètre respectivement dans l'air puis dans de l'eau (cf. figure 12, page ci-contre). La poussée d'Archimède est donc égale à $P - P' = 2,5 - 1 = 1,5 \text{ N}$. Valeur supérieure à celle trouvée dans l'expérience du paragraphe 1.

On en conclut que la valeur de la poussée d'Archimède dépend du volume immergé de l'objet $V_{\text{immergé}}$ qui correspond au volume d'eau déplacée par l'objet. À masse constante, la valeur de la poussée d'Archimède augmente quand $V_{\text{immergé}}$ augmente.

Remarques : à propos du volume d'eau déplacé, deux cas sont à considérer :

- ◆ L'objet est complètement immergé (cas d'un plongeur, d'un sous-marin). Le volume du liquide déplacé est égal au volume du sous-marin (V).

$$P_{\text{eau dépl}} = m_{\text{eau dépl}} \cdot g = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot g.$$

Avec ρ_{eau} , la masse volumique de l'eau considérée. D'où finalement :

$$F_A = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot g.$$

- ◆ L'objet est partiellement immergé (cas d'un navire). Le volume du liquide déplacé est égal au volume de la carène ($V_{\text{carène}}$).

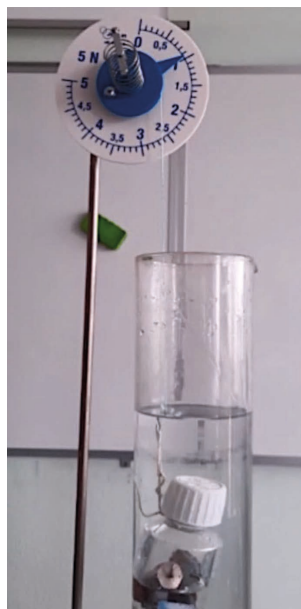
$$P_{\text{eau dépl}} = m_{\text{eau dépl}} \cdot g = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{carène}} \cdot g.$$

Avec ρ_{eau} , la masse volumique de l'eau considérée. D'où finalement :

$$F_A = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{carène}} \cdot g.$$



Dans l'air, on retrouve une valeur du poids égale à 2,5 N comme ans la première expérience.



Lorsque cet objet est immergé dans une éprouvette d'eau, on trouve un poids apparent $P' = 1\text{N}$.

Figure 12 - Influence du volume d'eau déplacé sur la valeur de la poussée d'Archimède.

Ainsi dans le cas d'un porte-conteneurs, le navire s'enfoncera davantage dans l'eau lorsque celui-ci est à pleine charge que lorsqu'il est « vide », on dit qu'il augmente son tirant d'eau. Ceci permet d'augmenter son déplacement et donc la valeur de la poussée d'Archimède qui dépend de ce déplacement d'eau (cf. figure 13).

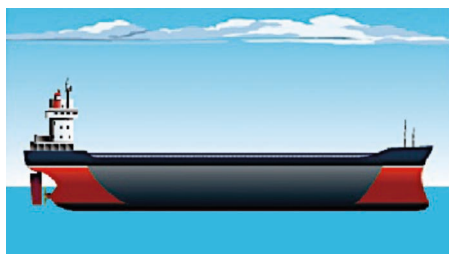
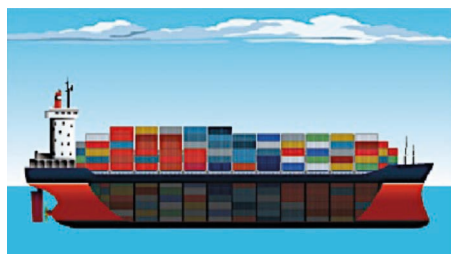


Figure 13 - Influence de la charge d'un navire.

Calculons le volume de carène nécessaire à la flottaison d'un navire d'une masse de 300 t évoluant dans une mer dont la masse volumique de l'eau est de 1025 kg/m^3 . Pour cela, utilisons la condition d'équilibre (ou de flottabilité) : le navire flotte si le poids du

navire et la poussée d'Archimède sont de même intensité (cf. figure 14).

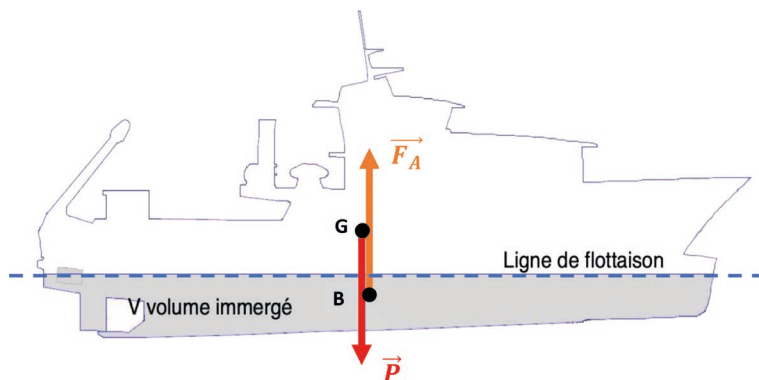


Figure 14 - Représentation des forces appliquées au navire.

Pour trouver le volume immergé, soit le volume de la carène nécessaire, appliquons la condition de flottabilité :

$$P_{\text{Navire}} = F_A.$$

Soit :

$$P_{\text{Navire}} = m_{\text{Navire}} \cdot g = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{carène}} \cdot g$$

$$V_{\text{carène}} = \frac{m_{\text{Navire}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{300\,000}{1025} = 293 \text{ m}^3.$$

2.4. Influence de la forme de l'objet immergé sur la flottabilité à masse constante

L'expérience⁽¹⁵⁾ ci-contre (cf. figure 15) permet de mettre en évidence l'influence de la forme de l'objet sur la flottabilité. On prend une boule de pâte à modeler de masse m et on la plonge dans l'eau. On constate que cette boule coule (cf. figure 15A), $P_{\text{objet}} < F_A$. On fabrique une sorte de coque de bateau à l'aide de cette boule de pâte à modeler. On constate à présent que cette coque flotte (cf. figure 15B), $P_{\text{objet}} = F_A$. Qu'est-ce qui a changé entre ces deux expériences ? Le poids de l'objet est le même, seule la poussée d'Archimède a été modifiée et a augmenté. En effet, d'après la condition de flottabilité :

$$P_{\text{objet}} = P_{\text{eau déplacée}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau déplacée}} \cdot g.$$

On en déduit que le volume d'eau déplacée par la forme « coque » est plus grand que le volume d'eau déplacée par la forme « sphère » de la pâte à modeler. La poussée d'Archimède appliquée sur l'objet en forme de coque a donc une plus grande valeur et peut compenser le poids de l'objet, ce qui lui permet de flotter.

(15) <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01081522/file/2011.TH18228.Rammal.Hussein.Chapitre%202.pdf>

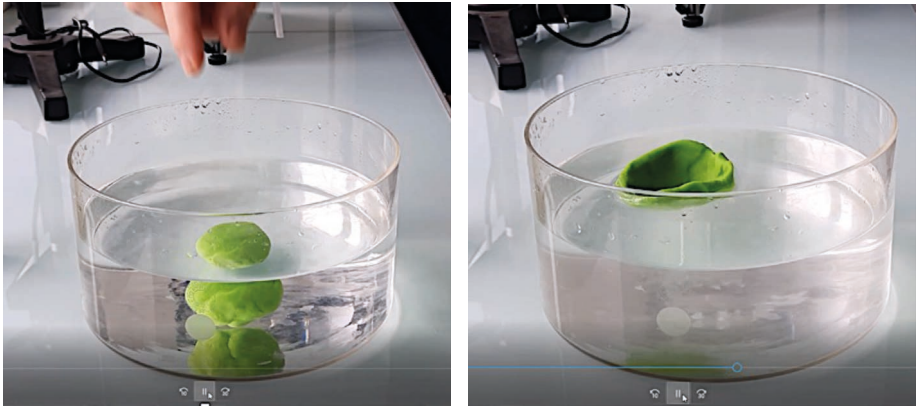


Figure 17 - Influence de la forme de l'objet sur la flottabilité.

Que se passe-t-il si la coque est percée ? Si la coque du navire est percée pour une raison ou une autre, de l'eau rentre en grande quantité dans la coque et remplace l'air qui y était contenu. La masse du navire augmente fortement et rapidement, le centre de gravité du navire varie également, ce qui peut avoir pour conséquence le naufrage du navire puisque la poussée d'Archimède peut ne plus compenser le poids du navire. Le naufrage du RMS *Titanic* est l'une des catastrophes maritimes les plus connues. Ce navire a heurté un iceberg au large de la côte sud de Terre-Neuve en avril 1912 (cf. figure 16). L'impact a ouvert plusieurs brèches dans la coque, laissant ainsi pénétrer



Image du domaine public de Wili Stöwer via Wikimedia Commons.

Figure 16 - Naufrage du paquebot *Titanic* le 15 avril 1912.

l'eau à l'avant du navire. À mesure que l'eau pénétrait dans le navire, elle prenait la place de l'air qu'il contenait, faisant peu à peu sombrer le navire. C'est pourquoi il a coulé en 2h40 après avoir heurté l'iceberg. C'est l'utilité des compartiments étanches ou des doubles coques, qui permettent d'empêcher l'eau de s'infiltrer partout en cas de sinistre.

2.5. Influence de la masse de l'objet sur la valeur de la poussée d'Archimède à volume immergé constant

On prend deux sphères de même volume, mais de masse différente (cf. figure 17):

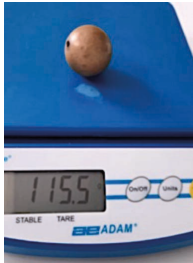
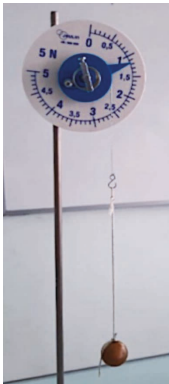
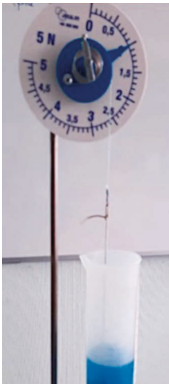
Expériences	Intensité du poids dans l'air	Intensité du poids apparent dans de l'eau	Valeurs de la poussée d'Archimède : $P - P'$
	 $P = 1 \text{ N}$	 $P = 0,8 \text{ N}$	$F_A = 0,2 \text{ N}$
	 $P = 1,2 \text{ N}$	 $P' = 1 \text{ N}$	$F_A = 0,2 \text{ N}$

Figure 17 - Influence de la masse de l'objet sur la valeur de la poussée d'Archimède.

On conclut qu'à volume immergé constant, la valeur de la poussée d'Archimède ne dépend pas de la masse de l'objet immergé.

3. RÉSERVE DE FLOTTABILITÉ D'UN NAVIRE

Il nous reste un paramètre à explorer dans l'équation de flottabilité :

$$P_{\text{navire}} = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot V_{\text{carène}},$$

l'influence de la masse volumique de l'eau sur laquelle le navire navigue. D'après l'équation de flottabilité, pour un navire de masse fixée :

- ◆ Si la masse volumique de l'eau où navigue le navire diminue, la valeur de la poussée d'Archimède diminue et ne compense plus le poids du navire. Pour rétablir l'équilibre des forces le volume la carène augmente : le tirant d'eau augmente.
- ◆ Inversement, si la masse volumique de l'eau augmente, la valeur de la poussée d'Archimède augmente et ne compense plus le poids du navire. Pour rétablir l'équilibre des forces, le volume de la carène diminue : le tirant d'eau diminue.

Soit deux éprouvettes contenant respectivement de l'eau douce, de masse volumique 1000 kg/m^3 et de l'eau salée de masse volumique dans l'expérience égale à 1050 kg/m^3 à une température T . On plonge un petit objet de masse fixe respectivement dans chacune des éprouvettes remplies d'eau (cf. figures 18A et 18B).

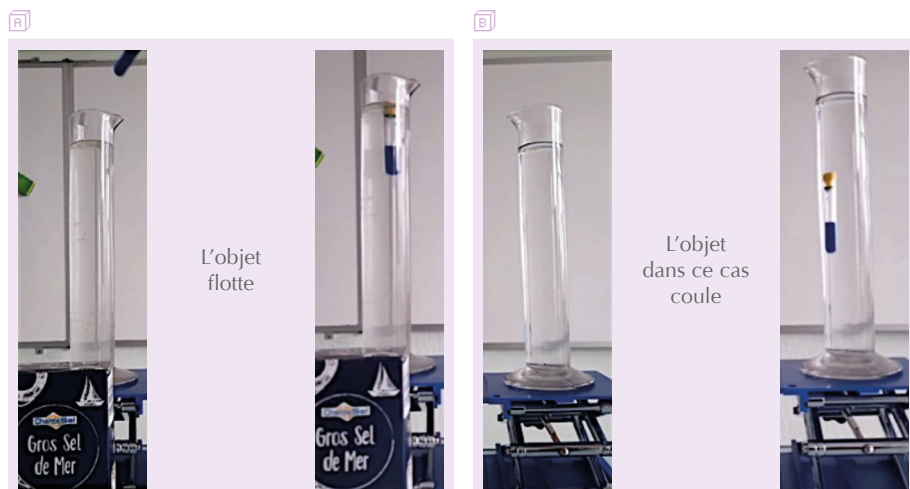


Figure 20 - A Eau salée de masse volumique égale à 1050 kg/m^3 -

B Eau douce de masse volumique égale à 1000 kg/m^3 .

Ainsi, à température constante suivant la salinité de l'eau, un même objet flotte

ou coule. On en conclut que la valeur de la poussée d'Archimède pour notre objet dans l'eau douce est plus faible que dans l'eau salée. En effet, l'eau salée a une masse volumique plus grande que l'eau douce. En conséquence, un navire devra être moins chargé dans une eau douce (fleuve) que dans l'eau de mer sous peine de s'y enfoncer davantage voir de couler... Le tableau 1 fournit quelques valeurs de la salinité des mers et océans.

Nom	S (g/l)
Mer Baltique	7
Océan Antarctique	34,7
Océan Pacifique	35
Océan Indien	36,5
Océan Atlantique	36,5
Mer Méditerranée	38,5
Mer Rouge	39,7

Tableau 1 - Salinité S de quelques mers et océans.

La figure 19 donne l'évolution de la masse volumique de l'eau en fonction de la salinité d'une part et de la température d'autre part.

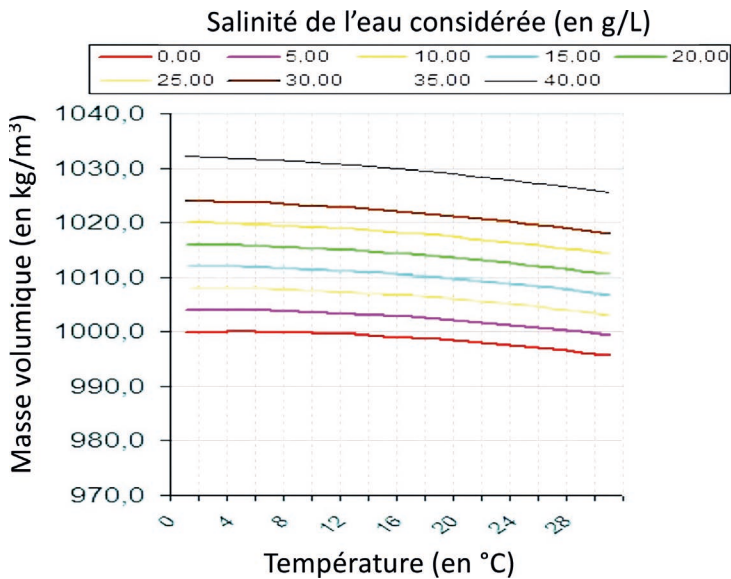


Figure 19 - Évolution de la masse volumique de l'eau en fonction de la température et de la salinité.

De ce graphique, on en déduit que la masse volumique de l'eau diminue quand la température de l'eau augmente, et/ou la salinité de l'eau diminue. Ainsi, toute chose égale par ailleurs, la poussée d'Archimède diminue lorsque l'océan est plus chaud et moins salé. Pour maintenir la flottabilité du navire son volume immergé augmentera et donc son tirant d'eau.

Un navire de chargement donné est amené à naviguer dans des mers ou des océans de salinité et de température différentes donc de masse volumique différente. Le capitaine devra vérifier que les conditions de flottabilité du navire durant toute la navigation soient toujours respectées⁽¹⁶⁾ en s'assurant que le chargement du navire est compatible avec les ports de départ et d'arrivée et avec la route de navigation choisie. C'est la raison pour laquelle, il existe des lignes de charge marquées sur le bordé du navire (appelées aussi marques de franc-bord ou ligne de Plimsoll⁽¹⁷⁾) (cf. figure 20). Ces marques sont réalisées par l'architecte naval responsable de la conception du navire en respectant les règles de la convention internationale établie en 1966⁽¹⁸⁾.



Figure 20 - Marques de franc-bord.

(16) On parle de réserve de flottabilité.

(17) Samuel Plimsoll (né le 10 février 1824 à Bristol, mort le 3 juin 1898 à Folkestone) est un homme politique britannique qui contribua à la sécurité et au bien-être des marins en donnant naissance à la ligne de Plimsoll, symbole international de limite de charge des navires (source : Wikipédia).

(18) La convention internationale sur les lignes de charge établie en 1966 a pour but de fixer des règles en ce qui concerne les limites autorisées pour l'immersion des navires en raison de la nécessité d'assurer la sécurité de la vie humaine et des biens en mer. Cette convention s'applique à tous les navires immatriculés dans les pays dont l'État est signataire de la convention. Néanmoins, la convention ne s'applique pas aux navires de plaisance ne se livrant à aucun trafic commercial. Un « certificat international de franc-bord » est délivré à tout navire qui a été soumis à une visite et marqué conformément aux dispositions de la convention. Aucun navire soumis aux prescriptions de la convention ne doit prendre la mer s'il n'est pas pourvu de ce certificat.

Elles indiquent le niveau d'enfoncement maximum autorisé pour chaque navire en fonction de la saison de l'année ainsi qu'à la zone ou à la région dans laquelle peut se trouver le navire. Elles ne doivent être immergées à aucun moment lorsque le navire prend la mer, pendant le voyage et à l'arrivée. Ainsi, ces marques doivent permettre aux capitaines d'effectuer leur chargement de façon à ce que leur navire, à tout moment du périple, présente un enfoncement au plus égal à celui qui correspond à la zone où il va naviguer et à la saison.

La marque de franc-bord est un anneau de 25 mm d'épaisseur et de 300 mm de diamètre extérieur coupé par une bande horizontale de 25 mm de large et de 450 mm de long, dont le bord supérieur passe par le centre de l'anneau. Le centre de l'anneau doit être situé au milieu du navire. Les lignes de charge qui indiquent les francs-bords assignés conformément aux règles sont matérialisées par des bandes horizontales de 230 mm de long et 25 mm de large, qui sont disposées perpendiculairement à une bande verticale de 25 mm de large, située à une distance de 540 mm à l'avant du centre de l'anneau. Les lettres doivent mesurer 115 mm en hauteur et 75 mm en largeur. Les lignes utilisées sont les suivantes (cf. figure 21) :

- ◆ La *ligne de charge d'été*, qui est indiquée par le bord supérieur de la bande passant par le centre de l'anneau et également par le bord supérieur d'une bande marquée «S» (*Summer Temperate Seawater*).
- ◆ La *ligne de charge d'hiver*, qui est indiquée par le bord supérieur d'une bande marquée «W» (*Winter Temperate Seawater*).
- ◆ La *ligne de charge d'hiver dans l'Atlantique Nord*, qui est indiquée par le bord supérieur d'une bande marquée «WNA» (*Winter North Atlantic*).
- ◆ La *ligne de charge tropicale*,

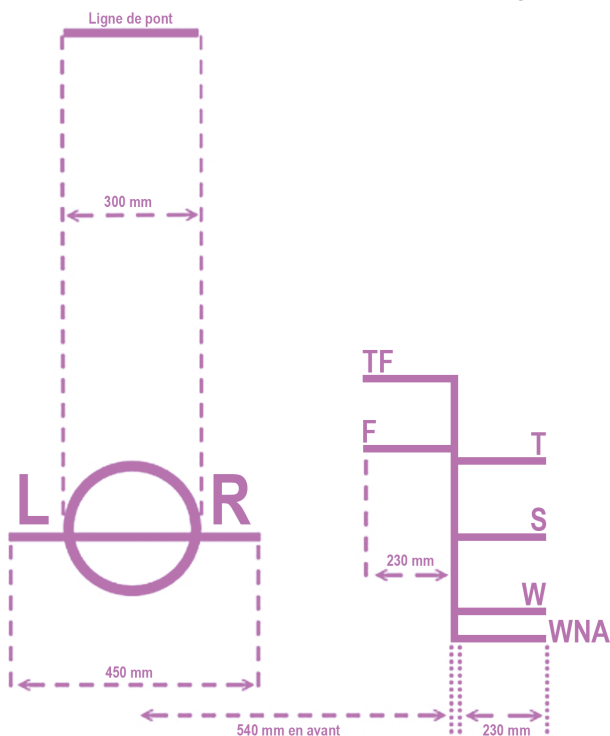


Figure 21 - Représentation des marques de franc-bord sur la coque d'un navire.

qui est indiquée par le bord supérieur d'une bande marquée « T » (*Tropical Seawater*).

- ◆ La *ligne de charge d'été en eau douce*, qui est indiquée par le bord supérieur d'une bande marquée « F » (*Fresh Water*), tracée à partir de la bande verticale vers l'arrière.
- ◆ La *ligne de charge tropicale en eau douce*, qui est indiquée par le bord supérieur d'une bande marquée « TF » (*Tropical Fresh Water*), tracée à partir de la bande verticale vers l'arrière.
- ◆ Le disque de franc-bord est accompagné des initiales de la société de classification qui a défini les lignes de charge (AB for the *American Bureau of Shipping*, LR for *Lloyd's Register*, GL for *Germanischer Lloyd*, BV for *Bureau Veritas*, IR for the *Indian Register of Shipping*, RI for the *Registro Italiano Navale*, NV for *Det Norske Veritas*).

Le volume disposé entre la ligne de flottaison du navire en charge maximum et la ligne de charge autorisée par la marque de jauge constitue la réserve de flottabilité du navire.

Essayons de comprendre la lecture et l'utilisation de ces marques de franc-bord. Pour cela, imaginons un navire qui se trouve initialement dans un port de l'Atlantique Nord en hiver, donc dans une eau plutôt froide et salée. Dans ces conditions, ce navire pourra être chargé de telle façon que la ligne de flottaison corresponde au plus à la marque de franc-bord WNA (cf. figure 22) de telle sorte que cette marque soit apparente.

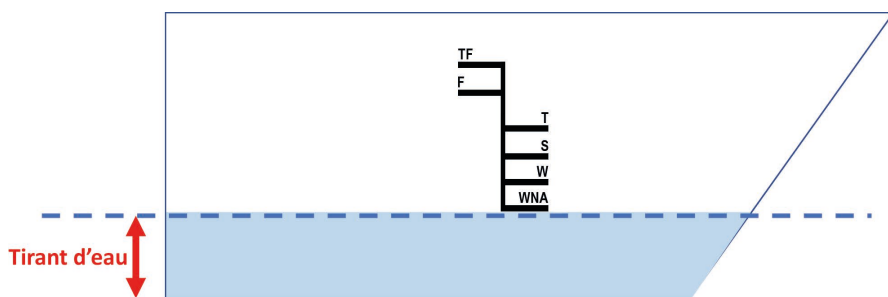


Figure 22 - Navire dans un port situé en atlantique nord en hiver (eau salée et froide) avant le départ

Ce même navire appareille pour se rendre dans un port situé en zone salée tropicale. La masse volumique de cette eau salée tropicale est plus faible que celle d'une eau salée froide correspondant à l'Atlantique Nord ; on en déduit qu'avec le même chargement, la coque du navire va s'enfoncer davantage. De combien ? C'est là tout l'intérêt des marques de franc-bord. Si au départ la ligne de flottaison correspondait au maximum à la marque « WNA » on en déduit qu'à l'arrivée, la ligne de flottaison correspondra au plus à la marque « T » (cf. figure 23, page ci-après). Le commandant du navire connaît ainsi l'évolution de son tirant d'eau au cours de sa navigation, sa réserve

de flottabilité et peut vérifier sa compatibilité avec le port de départ et d'arrivée ainsi que pour la traversée d'éventuel canal (comme Suez).

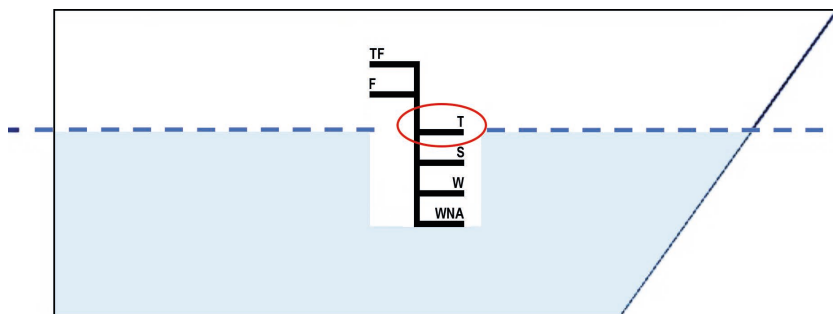
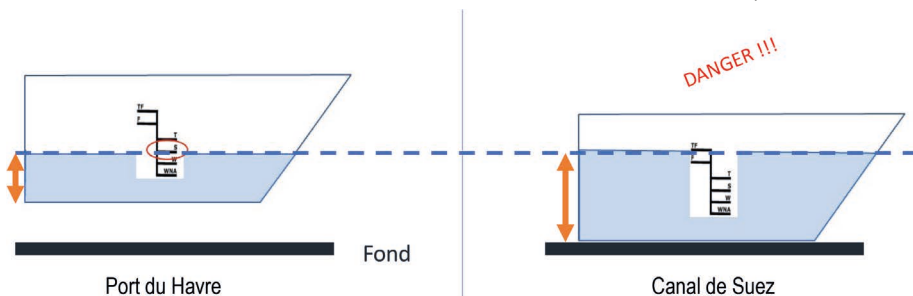


Figure 23 - Navire dans un port situé en zone salée tropicale à l'arrivée.

Que se passe-t-il si la ligne de charge n'est pas respectée lors du chargement ? Imaginons que le commandant charge son navire de telle sorte que la marque de franc bord corresponde à S, en étant toujours dans le même port de départ que dans l'exemple précédent. Dans ce cas, au port d'arrivée, la ligne de flottaison dépassera largement la marque T, le navire s'enfoncera davantage avec le risque de frotter le fond du port (cf. figure 24).

Navire initialement chargé dans un port de l'Atlantique Nord en hiver.

Ce même navire initialement chargé dans un port de l'Atlantique Nord en hiver, se retrouve dans un port dans une mer salée tropicale.



Le tirant d'eau a augmenté

Figure 24 - Ligne de chargement non respectée lors du chargement d'un navire.

CONCLUSION

Le tirant d'eau d'un navire résulte de l'équilibre entre le poids du navire et la poussée d'Archimède : le navire s'enfonce jusqu'à ce que le volume de la coque immergé

(carène) soit suffisant pour compenser exactement le poids du navire ; c'est la condition de flottabilité d'un navire. Si l'on charge le navire, il s'enfonce davantage dans l'eau, augmentant son tirant d'eau, ce qui augmente la valeur de la poussée d'Archimède et permet ainsi de compenser le nouveau poids du navire. Cet enfoncement est peu perceptible pour un voilier, mais il peut être très important pour un navire de commerce, le tirant d'eau pouvant varier d'une dizaine de mètres. Par ailleurs, un navire est amené à naviguer dans des mers ou des océans de salinité et de température différentes, et donc de masse volumique différente. Par exemple si la masse volumique de l'eau diminue, le navire s'enfonce davantage, ce qui augmente son tirant d'eau, la valeur de la poussée d'Archimède augmente et permet de compenser le poids du navire.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier, pour leur implication dans ce projet :

- ◆ le Lycée de la mer – pôle de formation maritime Paul Bousquet – de Sète, son directeur Guillaume Pelegrin ;
- ◆ le Lycée Rosa Luxemburg de Canet-en-Roussillon, sa proviseure Françoise Legros, son directeur délégué aux formations professionnelles et technologiques (DDFPT) Philippe Lagane ;
- ◆ le campus des métiers et des qualifications Nauti-campus Occitanie, son directeur opérationnel Guillaume Philippe ;
- ◆ la Fédération française de voile (FFV) ;
- ◆ la Marine nationale.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] BIMer : site Éduscol :
<https://eduscol.education.fr/sti/formations/tout-niveau/brevet-dinitiation-la-mer-bimer>
- [2] Le vademécum BIMer et CAEIMer est disponible sur le site :
https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/08/vademecum_bimer.pdf
- [3] N. Cheymol, D. Ducourant, J.-J. Calliet et G. Philippe, «Mer et physique : le brevet d'initiation à la mer – Partie 1 : un diplôme de découverte de la culture maritime, des métiers de la mer et de la plaisance», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 116, n° 1041, p. 175-190, février 2022.

Pour en savoir plus

- ◆ La chaîne YouTube de l'académie de Montpellier «Canal BIMer» propose chaque semaine une vidéo en lien avec le programme de l'examen du BIMer pour préparer,

revoir ou s'entraîner à l'examen :

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLciYMfFOTAZYmHvnFOopuSAh-XC-REGL>



La flottabilité d'un navire est traitée dans l'émission E15.

- ◆ F. Grinnaert et J.-M. Laurens, *Stabilité du navire, théorie, réglementation, méthode de calcul, cours et exercices corrigés*, Ellipses, 2013.
- ◆ D. Paulet, D. Presles et F. Neuman, *Architecture navale, connaissance et pratique*, Dunod, 2020.



Nicolas CHEYMOL

IA-IPR physique-chimie

Conseiller académique pour la promotion des sciences, de la technologie, de l'aéronautique, de l'espace et de la mer -

BIA/CAEA - BIMer/CAEIMer

CAST

Académie de Montpellier



Dominique DUCOURANT

Professeure de physique-chimie retraitée

Chargée de mission CAST

Académie de Montpellier



Jean-Jacques CALLIET

Professeur de mathématiques retraité

Chargé de mission CAST

Académie de Montpellier



Pierre FABRE

Professeur de physique-chimie

Lycée Joliot Curie

Sète (Hérault)

Chargé de mission CAST

Académie de Montpellier



Guillaume PHILIPPE

Directeur opérationnel

Campus des métiers et des qualifications

Nauti-campus Occitanie

Chargé de mission CAST

Académie de Montpellier



Marcel OLIVER

Professeur de technologie retraité

Marin

Fédération française de voile (FFV)