LIVRE III

DU NAVIRE EN MOUVEMENT EN EAU CALME

CHAPITRE Ier

RÉSISTANCES DES CARÈNES

---

§ 1. — Généralités sur les résistances des carènes.

Flottaison du navire en mouvement. — Lorsque le navire se meut, il refoule le liquide devant lui, et il se produit le long de ses parois des dénivellements tels que la partie mouillée ne constitue plus à proprement parler une carène, c'est-à-dire un volume détaché dans le navire par l'intersection d'un plan. Cependant l'ébranlement du liquide étant local, nous pouvons convenir de désigner sous le nom de *Flottaison du navire en mouvement* l'intersection du navire par le plan de la surface libre de la mer dans les régions non ébranlées.

Actions du liquide sur la carène. — La pression que le liquide en mouvement exerce sur un élément infiniment petit de la carène peut être considérée comme décomposée en deux : l'une, normale à l'élément, est la *pression*; l'autre, tangentielle, est le *frottement*; cette dernière est d'autant plus grande que le liquide est plus visqueux et la carène moins lisse. Nous supposerons d'abord, pour dégager le problème, que les frottements sont nuls, nous montrerons ensuite comment on fait habituellement pour tenir compte de ces forces.

Pressions hydrostatiques et hydrodynamiques. — En chaque point de la carène, la pression par unité de surface peut être considérée comme égale à la somme algébrique de deux pressions distinctes :

1° La pression *hydrostatique,* qui est celle qu'exercerait le liquide au point considéré, si le navire flottait au repos dans la même flottaison ;

2° La pression *hydrodynamique,* qui est celle qu'il faudrait ajouter ou retrancher à la précédente pour obtenir la pression totale actuelle.

Les pressions hydrostatiques donnent pour résultante la poussée π correspondante à la flottaison du navire ; cette force est appliquée au centre de carène. Il ne reste donc à examiner que les pressions hydrodynamiques.

Recherches théoriques sur les pressions hydrodynamiques. — On conçoit que si l'on connaissait la pression hydrodynamique que subit un élément de la carène, en fonction de la grandeur de la vitesse et de l'obliquité de l'élément sur sa direction, on pourrait aisément obtenir les composantes de cette force suivant trois axes, et le calcul intégral donnerait ensuite les résultantes, suivant ces axes, des pressions supportées par tous les éléments de la carène. C'est par cette méthode que les différents auteurs qui se sont occupés de cette question ont abordé ce problème difficile et essayé de justifier la formule employée ordinairement.

Pour donner une idée des raisonnements à l'aide desquels on a établi la loi sur laquelle sont fondées les formules usuelles, nous transcrivons ici presque intégralement le raisonnement de Bouguer sur ce sujet. On remarquera que, conformément à un principe de mécanique connu, Bouguer, pour faciliter le langage, suppose que le navire immobile est soumis à un courant horizontal et uniforme [1].

1. Voir plus loin les contradictions apparentes constatées entre ce principe et les résultats de l'expérience, paradoxe de Dubuat (page 177).

« Lorsque l'eau vient rencontrer un plan, il est évident « que chacune de ses molécules doit faire plus ou moins d'im- « pression, selon qu'elle frappe plus ou moins perpendicu- « lairement. L'effort particulier doit être exprimé par le « sinus de l'angle d'incidence, puisque le sinus représente « la composante de la vitesse perpendiculairement au plan. « Mais, en même temps que chaque particule du fluide fait « plus ou moins d'impression, le nombre des particules qui « contribuent au choc est encore plus ou moins grand, selon « que la surface se présente plus ou moins directement, et « ce nombre de particules est encore proportionnel au sinus « de l'angle d'incidence ; ainsi le sinus de l'angle d'inci- « dence contribue doublement au choc et l'impulsion doit « être proportionnelle à son carré.

« Mais ce n'est pas seulement par le plus ou moins d'obli- « quité avec laquelle le fluide fait son choc que son impul- « sion est différente, c'est encore par le plus ou moins « de vitesse absolue qu'il a indépendamment de son obli- « quité. Aussitôt que le fluide se meut plus vite, il fait une « impulsion plus grande, et cette impulsion est proportion- « nelle au carré de la vitesse, puisque chaque molécule « frappe avec plus de force et qu'il y a en outre un plus « grand nombre de molécules qui survien- « nent dans le même temps et qui contri- « buent à l'impulsion. »

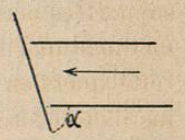

Fig. 75 *bis.*

On a ainsi, en appelant ω l'aire d'un élément de la carène, α l'inclinaison du courant sur l'élément, v la vitesse du liquide et K une constante dépendant de la nature du liquide :

$$R = K\omega v^2 \sin^2 \alpha.$$

Dans le cas où $\alpha = 90°$, c'est-à-dire où le plan de l'élément est normal à la direction du courant :

$$R = K\omega v^2.$$

Les raisonnements de Newton et d'Euler, quoique conçus

en termes plus précis, ne sont pas plus rigoureux et conduisent à des résultats analogues ; d'après Newton, la constante K serait $\frac{\delta}{g}$, et d'après Euler $\frac{\delta}{2g}$, δ étant le poids d'un mètre cube du liquide.

Désaccord entre les résultats de la formule usuelle et ceux de l'expérience. — Les conclusions qui précèdent seraient applicables au cas d'une veine liquide isolée venant frapper un plan *ab* (fig. 76), et s'épanouissant sur lui, de manière que les vitesses des molécules devinssent, après le choc, parallèles au plan. On pourrait alors, en effet, appliquer le théorème des projections des quantités de mouvement et des impulsions des forces sur un axe perpendiculaire au plan *ab;* mais ces circonstances sont très différentes de celles dans lesquelles se trouve un élément de carène ; il ne faut donc pas s'étonner que les résultats auxquels conduit l'application de la formule qui précède soient formellement en désaccord avec ceux de l'expérience. Les veines liquides se comportent, en effet, comme l'indique la figure 76 ; celle qui correspond à un élément *ab*, est, en effet, déviée de sa direction longtemps avant d'avoir atteint cet élément.

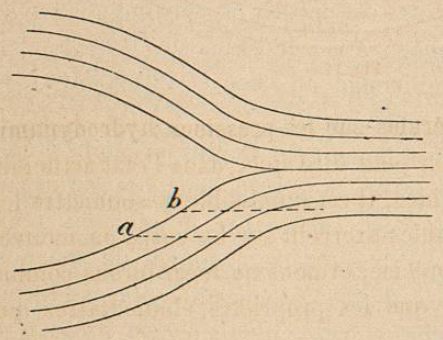

Fig. 76.

Proues et poupes liquides. — Il arrive même que, lorsque les formes du solide sont anguleuses ou discontinues, le liquide, dont les filets restent continus, ne peut plus glisser sur les parois elles-mêmes, il glisse sur un revêtement liquide (fig. 77), dont la carène s'entoure spontanément de

manière à rétablir la continuité des formes. Cette sorte de carène liquide accompagne le solide dans son mouvement, se renouvelant sans cesse, à l'aide de tourbillons, avec l'eau qu'elle emprunte aux filets qui la baignent.

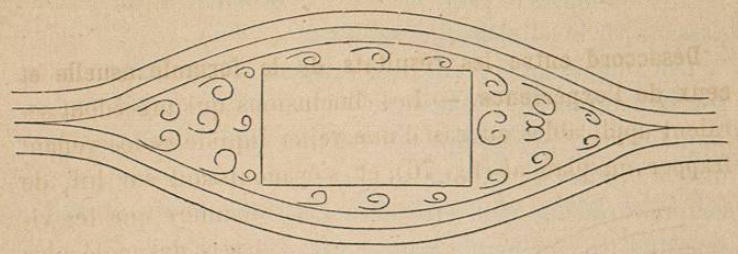
Fig. 77.

Considérations générales sur les pressions hydrodynamiques. — En résumé, on peut dire que, dans l'état actuel de la mécanique des liquides, il est impossible de soumettre les pressions que les liquides exercent sur les corps en mouvement à une analyse précise, et nous ne regarderons comme suffisamment établies que les propriétés élémentaires qui suivent.

Si l'on mène à la surface d'un corps en mouvement dans un liquide, un cylindre tangent parallèle à la direction de la vitesse, la ligne de contact avec la surface du corps partage cette dernière en deux parties, la *proue* et la *poupe ;* sur la

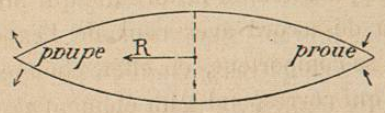

Fig. 78.

première, qui est comprise dans la région antérieure du cylindre, les pressions totales sont supérieures aux pressions hydrostatiques ; sur la deuxième, elles sont inférieures. Par conséquent, sur la proue, les pressions hydrodynamiques s'exercent de dehors en dedans, et, sur la poupe, elles s'exercent de dedans en dehors.

Enfin, sur la ligne de séparation de la proue et de la

poupe, en vertu de la continuité, les pressions hydrodynamiques sont nulles.

La pression hydrodynamique en chaque point peut être décomposée en deux forces, l'une verticale, l'autre horizontale; cette dernière est évidemment normale à la ligne d'eau passant par le point considéré.

Les composantes verticales, dirigées soit de bas en haut, soit de haut en bas, pourront, d'après un principe de mécanique connu, être composées en une force verticale appliquée au centre de la flottaison, et en un couple vertical; ce couple lui-même peut être décomposé en deux : un couple longitudinal, un couple transversal.

La force verticale, appliquée au centre de la flottaison, tend à modifier l'immersion sans changer l'assiette; elle est tellement faible, relativement à la force que fait naître un changement d'immersion presque insensible, que ses effets sont négligeables.

Les deux couples tendent à modifier l'assiette, mais leurs effets sont généralement insensibles sur les navires ordinaires[1].

Nous n'aurons donc à considérer que les composantes horizontales des pressions hydrodynamiques.

Division de l'étude des résistances des carènes. — Dans ce chapitre, nous étudierons les résistances des carènes successivement dans la translation directe et dans la translation oblique. Dans les chapitres suivants, nous appliquerons les résultats de cette étude à la théorie du halage et de la propulsion.

Plus loin, nous analyserons les résistances des carènes dans

1. Cependant, sur les navires animés de grandes vitesses, les résistances de la carène peuvent occasionner des changements d'assiette sensibles; les pressions hydrodynamiques normales à la coque ont pour résultantes : à l'avant, une force dirigée de l'avant à l'arrière et de bas en haut, et à l'arrière, une force dirigée de haut en bas vers l'arrière; il en résulte que le navire en marche tend à relever l'avant et à plonger l'arrière. Cet effet est très sensible sur les torpilleurs.

les girations, et nous appliquerons les résultats obtenus à l'étude des mouvements que prend le navire sous l'influence du gouvernail.

§ 2. — Translation directe.

Dans la translation directe, la flottaison du navire se meut dans son plan et dans la direction de son axe.

Résistance directe. — Les composantes horizontales des pressions hydrodynamiques à la proue comme à la poupe, sont dirigées d'avant en arrière (fig. 78), et, comme elles sont symétriques relativement au plan longitudinal, elles donnent pour résultante une force R horizontale, dirigée d'avant en arrière et située dans le plan longitudinal; c'est cette force qu'on nomme la *Résistance directe*.

Centre de résistance directe. — Cette force peut être supposée appliquée en un point quelconque de sa direction; mais on convient de prendre pour point d'application, le point où elle traverse le plan du maître couple. Dans l'impossibilité de déterminer exactement la hauteur de ce point sur l'axe du couple, on admet, dans la pratique, qu'il est situé au centre de l'aire immergée de cette section.

Intensité de la résistance, formules usuelles. — On a cherché des méthodes permettant de calculer d'avance la résistance totale d'une carène donnée; Newton, Euler, Bouguer, ont également cherché à résoudre les problèmes des solides de moindre résistance, c'est-à-dire ont cherché les surfaces par lesquelles il conviendrait de terminer des carènes satisfaisant à des conditions données (par exemple, ayant un déplacement et un maître couple donné), pour offrir au mouvement la moindre résistance. Mais les auteurs de ces recherches ont pris pour base la formule $K\omega v^2 \sin^2\alpha$, dont nous avons fait ressortir l'insuffisance plus haut, aussi

les résultats obtenus n'offrent aucun intérêt et ont été laissés dans l'oubli.

A défaut d'une formule exacte, on a admis et on admet encore que la résistance d'une carène est proportionnelle au carré de la vitesse et à l'aire immergée B^2 du maître couple, c'est-à-dire que l'on a :

$$R = KB^2V^2.$$

Cette formule est justifiée par les considérations suivantes : la résistance d'un plan mince, ayant pour surface B^2, transporté perpendiculairement à lui-même serait exprimée, d'après la théorie qui précède, par KB^2V^2. On admet que l'addition d'une proue et d'une poupe n'altère pas la forme de l'équation et modifie seulement la valeur du coefficient K, qui resterait ainsi constant pour un même navire, quels que soient la vitesse et le degré d'immersion.

Voici des valeurs du coefficient K données par M. le vice-amiral Bourgois pour différents types :

Vaisseaux rapides (*Napoléon*). .	11 nœuds.		$K = 3^k,0$
Frégates — (*Audacieuse*) .	11	—	$K = 3,4$
Corvettes — (*Primauguet*).	10	—	$K = 3,8$
Avisos (*Marceau*).	10	—	$K = 4,6$
Canonnières (*Arquebuse*). . . .	10	—	$K = 4,5$

Pour les plans minces, K serait de 50 à 60 kilogrammes.

Influence du frottement. — L'influence du frottement sur les carènes rugueuses est mise en évidence par la supériorité de vitesse des navires doublés en cuivre sur ceux qui ne le sont pas, et par l'accroissement de vitesse qu'acquiert, après le passage au bassin, un navire doublé dont la carène s'est recouverte de végétations marines et de coquilles. Mais on a admis pendant longtemps que cette influence était assez peu sensible dans le cas de carènes doublées et propres, pour que l'on puisse en tenir compte par une légère modification apportée au coefficient de résistance K.

Des expériences récentes sembleraient montrer, au contraire, que cette influence est prédominante sur les carènes de formes fines ; en se plaçant à ce nouveau point de vue, on admet que la résistance est proportionnelle au carré de la vitesse et à la surface mouillée; on a ainsi, en désignant cette surface par S :

$$R = KSV^2.$$

On ne peut évidemment pas négliger entièrement l'influence de la grandeur de la maîtresse section, mais on suppose alors cette influence assez faible, pour que l'on puisse en tenir compte à l'aide d'une légère modification de la constante K.

En résumé, suivant le point de vue auquel on se place, on admet comme forme de l'expression de la résistance, celle qui convient à l'influence prédominante, et l'on altère légèrement la constante pour tenir compte de l'influence que l'on considère comme secondaire.

M. Scott-Russel a proposé la formule suivante, assurément plus rationnelle, mais dont l'emploi est peu aisé :

$$(KS + K'B^2)V^2.$$

Vérification expérimentale de l'exactitude des formules usuelles. — Les expériences qui ont été faites dans le but de rechercher les lois des résistances des carènes sont trop nombreuses pour que nous puissions en faire ici l'analyse, nous nous bornerons à en signaler les résultats les plus remarquables.

Les procédés qu'on a employés dans ces expériences peuvent être classés en trois catégories principales :

1° Mesure directe de la traction par le halage ou le remorquage ;

2° Mesure à l'aide de dynamomètres de la poussée du propulseur sur le navire ;

3° Expériences sur des modèles à échelles réduites et application aux navires du théorème de Newton sur la similitude en mécanique dont nous donnons la démonstration à la fin de ce chapitre (§ 4).

Loi du carré de la vitesse. — Des expériences de traction faites par M. Dupuy de Lôme et par M. Bourgois, et dont les résultats ont été confirmés dans les expériences remarquables de M. Froude en 1871 (*Mémorial du génie maritime*, 1875), montrent que la résistance croît plus vite que le carré de la vitesse.

Ainsi dans le remorquage du *Greyhound*, M. Froude a trouvé, aux différentes vitesses, les résistances suivantes :

Vitesses en nœuds. . .	4	6	8	10	12	12.8
Résistance en tonneaux.	0.61	1.42	2.54	4.78	9.14	10.87

Les résistances proportionnelles au carré de la vitesse seraient :

0.61	1.40	2.44	3.81	5.49	6.25

On voit que jusqu'à 8 nœuds, la loi de la proportionnalité est sensiblement exacte ; mais qu'au delà, la résistance augmente beaucoup plus vite ; en partant de la valeur de la résistance pour 10 nœuds et appliquant la loi du carré, on trouverait :

Vitesses en nœuds. . . .	10	12	12.8
Résistances effectives . .	4.78	9.14	10.87
— calculées . .	4.78	6.88	7.84

C'est donc précisément aux vitesses actuellement les plus fréquentes que la loi adoptée cesse d'être exacte.

Les dimensions du *Greyhound* sont :

Long. : $52^m,78$. — Larg. : $10^m,11$. — Tirant d'eau moyen : $4^m,19$. — Dépl. : 1 179.

Proportionnalité à l'aire immergée du maître couple ou à la surface mouillée. — Pour un même navire, à égalité de vitesse, la résistance croît moins vite que l'aire immergée de la maîtresse section. Ce principe a été mis en évidence par les expériences de M. Le Boulleur de Courlon en 1852, puis par M. Bourgois, et enfin dans les expériences du *Greyhound*, que

nous venons de citer. Au contraire, la résistance croît plus vite que la surface mouillée.

M. Froude a trouvé, en effet, qu'une réduction de 19.25 p. 100 du déplacement, 16.25 de l'aire immergée du maître couple, et 8 p. 100 de la surface mouillée, donnait une réduction de 10 p. 100 de la résistance.

Recherches expérimentales sur les formes de moindre résistance. — *Influence de la forme du maître couple.* — Romme (*Art de la marine*, p. 41) fit, en 1776, des expériences sur des cylindres de même longueur et ayant pour sections des surfaces équivalentes et de contours divers ; il trouva que la résistance était indépendante des formes de ces contours ; le même principe fut de nouveau reconnu exact dans les expériences de Chapmann (1794). Il est vraisemblable qu'il n'est pas rigoureusement exact, cependant on est généralement disposé à attribuer une assez faible influence aux formes de la maîtresse section.

Influence de l'allongement des carènes. — Dubuat fit des expériences sur des parallélipipèdes à base carrée pour lesquels les rapports de la longueur à la largeur avaient pour valeurs : 0,03 (plan mince), 1 (cube), 3 (parallélipède) ; et il a constaté que la résistance diminuait rapidement du premier au deuxième et moins rapidement du deuxième au troisième ; il en résulte que, même avec des proues et des poupes planes (chalands), la résistance des carènes est beaucoup moindre que celle des plans minces.

En considérant, comme on le fait d'ordinaire, la résistance comme le résultat de la difficulté qu'éprouve le navire à dégager le sillon qu'il parcourt dans l'eau, on est disposé à admettre comme évident, que l'addition d'une tranche cylindrique dans la maîtresse partie n'augmente pas sensiblement la résistance ; c'est ainsi qu'on explique, en général, l'avantage qu'il y a à allonger les carènes pour augmenter ce déplacement, et, par suite, le poids de la machine et la puissance motrice, sans augmenter la résistance. On voit que

l'avantage résultant de l'allongement peut être beaucoup plus grand qu'on ne serait conduit à le supposer, puisque l'allongement peut donner une diminution absolue de la résistance. Cependant cet avantage est limité, et il existe pour chaque vitesse une longueur convenable, au delà de laquelle un allongement produirait un accroissement de résistance.

Cette propriété importante a été constatée par M. Froude dans des expériences sur des modèles de navires. (*Mémorial du génie maritime,* 7e liv., 1876.)

Influence de la forme des lignes d'eau. — Romme, dans un mémoire présenté en 1785 à l'Académie des sciences, expose les résultats d'expériences ayant pour objet l'étude de l'influence de l'acuité des lignes d'eau à l'avant. Les commissaires chargés de l'examen de ce mémoire, parmi lesquels figuraient Borda et Bossut, formulèrent les conclusions suivantes : « S'il n'est pas exactement vrai que la forme des « proues des vaisseaux n'influe pas beaucoup sur la résistance « qu'elles éprouvent par le choc de l'eau, du moins, il est très « probable que les proues peuvent beaucoup varier, les maî- « tres couples restant toujours les mêmes, sans que la résis- « tance éprouve des changements sensibles. »

Ce principe pouvait être vrai pour les anciens navires courts et par de faibles vitesses, mais il est tout à fait inexact pour les longs navires actuels et aux grandes vitesses ; l'acuité des proues et des poupes a une influence considérable.

Il paraît, en outre, bien démontré par l'expérience que les lignes d'eau doivent offrir une courbure continue depuis l'avant jusqu'à l'arrière, et ne pas se raccorder par une portion cylindrique formant la maîtresse partie. (Expériences de Froude, *Mémorial du génie maritime,* 7e liv., 1876.)

Influence de l'assiette sur la vitesse. — On a toujours attribué à l'assiette en différence une influence notable sur la vitesse des navires à voiles, et, par conséquent, sur la résistance directe. Romme, dans les expériences déjà citées, pensait avoir montré qu'une altération considérable de l'assiette n'avait pas d'influence sensible sur la résistance.

Ce résultat, contesté pendant longtemps, a été confirmé par M. Froude dans les expériences du *Greyhound,* pour les navires animés de vitesses moyennes ; il nous paraît cependant douteux qu'il en soit encore ainsi dans les cas de très grandes vitesses.

Pour les navires à voiles, l'influence de l'assiette est au contraire incontestable ; mais il résulte des expériences que nous venons de citer, que cette influence ne doit pas être attribuée au changement qui en résulte pour les lignes d'eau, mais simplement à ce que, le navire étant mieux équilibré à la voile dans l'assiette convenable pour l'allure, on n'a pas besoin, pour maintenir la route, de recourir à l'action du gouvernail, toujours nuisible à la marche.

Position du maître couple. — Sur les anciens navires à voiles, il était d'usage de placer le maître couple sur l'avant du milieu, on donnait ainsi aux carènes des proues courtes et renflées et des poupes allongées et fines. On alléguait, pour justifier cet usage, diverses raisons telles que la nécessité d'affiner les formes de l'arrière pour conduire les filets d'eau sur le gouvernail et la faible importance de l'acuité des proues, démontrée par les expériences de Romme. On alléguait aussi les formes ordinaires des poissons ; mais s'il est vrai que la nature nous offre, pour chacun des problèmes qu'elle a résolus, la solution la plus parfaite, il ne faut pas oublier que ces problèmes sont beaucoup plus complexes que ceux qui nous occupent, et qu'elle a dû souvent sacrifier des qualités de premier ordre à nos yeux, pour donner à ses créatures des qualités plus importantes aux siens ; par conséquent, tout en étudiant avec attention ses œuvres, il faut se garder de les imiter servilement.

Sur les navires modernes, on place en général le maître couple au milieu de la longueur.

Résistance en rivière, paradoxe de Dubuat. — On sait que, théoriquement, la résistance de la carène en mouvement dans un liquide en repos est égale à celle qu'elle subirait si elle était immobile dans un courant horizontal, de sorte que