Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 35 (1909)
Heft: 2

Artikel: Stabilité des bateaux à vapeur
Autor: Cornaz, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-27549

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

35me Année. 25 janvier 1909. N° 2.

Bulletin technique de la Suisse romande

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES. — Paraissant deux fois par mois.

RÉDACTION : Lausanne, 2, rue du Valentin, P. MANUEL, ingénieur, et Dr H. DEMIERRE, ingénieur.

SOMMAIRE : *Stabilité des bateaux à vapeur*, par M. Cornaz, ingénieur. — *Application de la statique graphique aux systèmes de l'espace* (suite), par M. B. Mayor, professeur. — La nouvelle gare de Chexbres-Puidoux. — Concours pour l'Hôtel des postes et télégraphes d'Aarau. — Concours pour constructions nouvelles et transformation de l'Ecole Polytechnique fédérale. — Principaux travaux d'extension et de parachèvement à exécuter en 1909 sur le 1er arrondissement des C. F. F. (suite).— Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Séance du mardi 29 décembre 1908. — Bibliographie. — Tunnel du Lötschberg.

Stabilité des bateaux à vapeur.

Note lue à la 25me conférence des entreprises suisses de navigation, le 15 septembre 1908, à Bâle.

Par M. CORNAZ, ingénieur,
directeur technique de la Compagnie générale de navigation
sur le lac Léman.

MESSIEURS,

Ce n'est pas sans une certaine hésitation que j'ai choisi pour sujet du travail que j'ai l'honneur de vous présenter aujourd'hui « La stabilité des bateaux », dont le caractère technique paraissait, au premier abord, ne pas convenir à un auditoire composé en majorité de non techniciens.

Je m'y suis arrêté quand même, parce que vous vous intéressez tous à cette question et que j'ai l'intention de la traiter au point de vue pratique en la limitant aux types de bateaux en usage dans nos entreprises de navigation suisses. Malgré mon désir d'éviter formules et démonstrations, j'ai dû en admettre quelques-unes, c'était inévitable, mais j'ai cherché à les réduire au minimum.

Jusqu'ici les constructeurs et propriétaires de bateaux suisses n'ont pas jugé nécessaire de déterminer exactement, *à l'avance*, les conditions de stabilité des bateaux qu'ils construisaient. Le chargement prévu, voyageurs ou marchandises, est fixé en tenant compte seulement de la place disponible et le constructeur garantit la stabilité en se basant uniquement sur son expérience.

Cette manière de faire a donné lieu à des mécomptes que plusieurs entreprises de navigation ne connaissent que trop bien et qui ont conduit à plus de prudence en cette matière. Cependant constructeurs et propriétaires se contentent encore de simples appréciations basées sur leur expérience personnelle.

Il m'a paru intéressant de voir si on ne pourrait pas procéder d'une façon plus sûre, fixer d'avance au constructeur les conditions de stabilité que le bateau devra remplir et déterminer les règles à suivre pour atteindre le but proposé.

Vous verrez que la solution pratique de ce problème n'offre pas de difficulté. Il n'est pas nécessaire, pour y arriver, d'aborder l'étude générale de la stabilité des navires ; il suffira d'examiner les conditions de la stabilité initiale statique, dans le sens transversal, et d'en tirer quelques conclusions.

I. Conditions d'équilibre des corps flottants et métacentre.

Avant de continuer je me permettrai de vous rappeler en quelques mots quelles sont les conditions d'équilibre des corps flottants et comment il est possible à un constructeur d'obtenir telles de ces conditions qu'on lui aura fixées d'avance.

Un corps flotte quand le poids du volume d'eau qu'il déplace est égal à son propre poids.

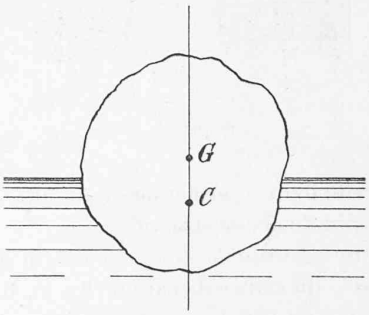

Fig. 1.

Ce corps peut être en équilibre stable, indifférent ou instable, suivant sa forme et la position qu'il occupe.

La force qui fait équilibre au poids d'un corps flottant est la *poussée* de l'eau, égale à ce poids et de sens contraire.

Cette poussée a son point d'application au centre de gravité du volume d'eau déplacé par le corps flottant. On appelle ce point *centre de carène*, quand il s'agit d'un bateau.

Il y a équilibre quand le centre de gravité du corps flottant et le centre de gravité du volume d'eau déplacé se trouvent sur une même verticale (fig. 1). (On désigne généralement le centre de gravité d'un bateau par la lettre G et le centre de carène par la lettre C.)

L'équilibre d'un corps flottant est *indifférent* quand la position relative de G et de C ne change pas quelle que

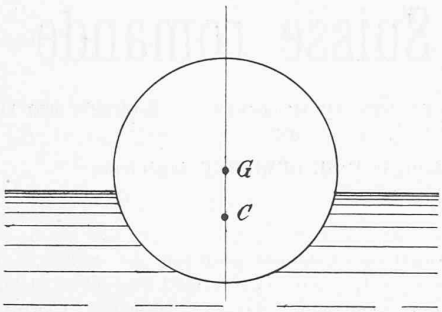

Fig. 2.

soit la position du corps. C'est le cas, par exemple, d'une sphère homogène (fig. 2).

L'équilibre est *stable* lorsque le corps flottant tend à reprendre sa position primitive quand il en a été dérangé par une force extérieure et que cette force a cessé d'agir. C'est le cas de tout corps dont le centre de gravité G est plus bas que le centre de carène C (fig. 3). Une simple ins-

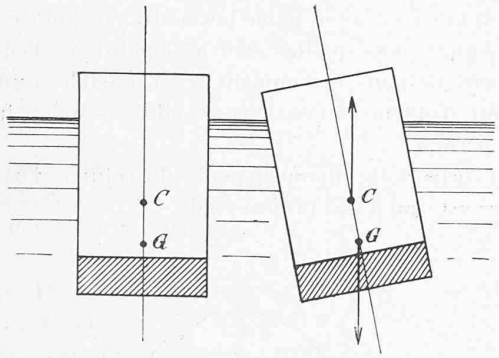

Fig. 3.

pection de cette figure permet de s'en rendre compte sans qu'il soit besoin de démonstration.

L'équilibre est *instable* quand le centre de gravité est placé au-dessus du centre de carène (fig. 4). Ici encore une démonstration n'est pas nécessaire.

Cependant cette instabilité n'est qu'apparente quand le corps flottant a des formes appropriées.

C'est le cas pour nos bateaux dont le centre de gravité est toujours au-dessus du centre de carène (fig. 5). Dans ces conditions la stabilité est due au fait que le centre de carène change de place quand le bateau s'incline et passe, par exemple, de C en C_1 (fig. 6).

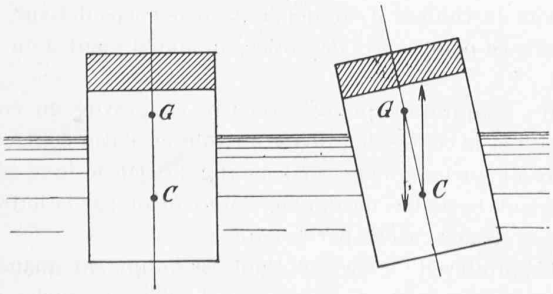

Fig. 4.

Il n'est pas besoin de démonstration pour voir que le bateau tend à reprendre sa position première lorsque la force qui a produit l'inclinaison cesse d'agir. Le poids du bateau et la poussée de l'eau agissent comme dans le cas de l'équilibre stable, dans le sens du redressement, ce que l'on constate facilement en comparant les figures 3 et 6.

La verticale du point C_1 rencontre la ligne CG prolongée en M. On appelle ce point, qui joue un rôle essentiel dans l'étude de la stabilité, *le métacentre*.

Le moment de redressement qui tend à relever le bateau a pour valeur le poids P du bateau multiplié par son bras de levier GL.

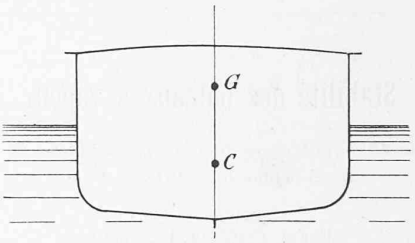

Fig. 5.

$GL = MG \sin \alpha$, α étant l'angle d'inclinaison LMG. On peut donc écrire :

$$\text{Moment de redressement} = P.MG.\sin\alpha \qquad 1)$$

La distance MG porte le nom de hauteur métacentrique ; nous la désignerons par la lettre H.

La position du métacentre dépend uniquement de la forme de la carène et peut être déterminée dès qu'on connaît celle-ci.

Pour chaque inclinaison il y a une position du point C_1 ; celui-ci s'éloigne du plan de symétrie du bateau à mesure que l'inclinaison augmente.

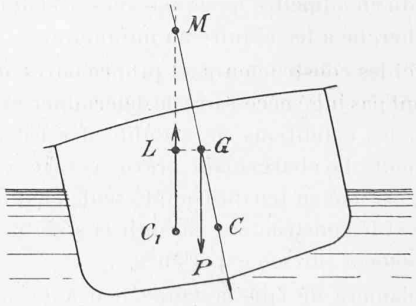

Fig. 6.

Il n'en est pas de même du point M qui occupe toujours la même place, pour une charge donnée, quelle que soit l'inclinaison, pourvu que la valeur de celle-ci ne dépasse pas ce que l'on admet en pratique.

La position du métacentre dépend des formes de la partie immergée du bateau et elle est d'autant plus élevée que la largeur de la carène est grande par rapport au tirant d'eau. Cette proportion entre la largeur et le tirant d'eau varie avec le chargement, il y aura donc *une position différente de M pour chaque valeur du chargement.*

Dans la figure 7 on a représenté les positions respectives que prennent, pour un même bateau, le centre de gravité G et le métacentre M pour des valeurs croissantes du chargement, l'indice o s'appliquant au bateau lège et l'indice n au maximum de chargement prévu. On voit que le centre de gravité s'élève et que le métacentre s'abaisse à mesure que le chargement s'accroît.

Le moment de redressement est proportionnel à la hauteur H et au sinus de l'angle d'inclinaison. Pour lui donner une valeur égale à celle des moments de renversement qui peuvent se produire et auxquels il doit résister, il faudra donner à la hauteur métacentrique H une valeur suffisante, car on ne peut pas admettre des inclinaisons dépassant certaines limites.

J'ai admis que la limite d'inclinaison qu'il est désirable de ne pas dépasser correspond, pour le côté où le bateau s'incline, à une diminution de moitié du franc-bord mini-

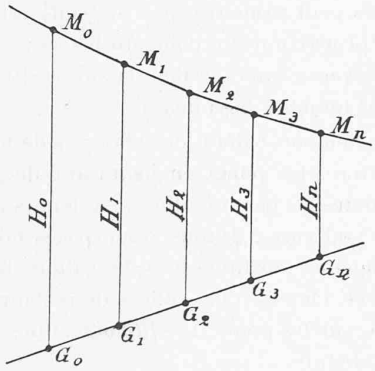

Fig. 7.

mum de $0^m,40$ prescrit par l'ordonnance fédérale. (On désigne par franc-bord la hauteur qui sépare la ligne de flottaison à pleine charge de l'ouverture la plus basse pratiquée dans la coque.)

II. Détermination expérimentale de la hauteur métacentrique d'un bateau existant.

Le problème que je me suis posé peut être résumé en ces termes :

Quelle doit être la hauteur métacentrique H d'un bateau à construire pour que sa stabilité soit suffisante?

La valeur de $H = MG$ dépend des positions de M et de G. Le constructeur peut calculer celle de M en étudiant son projet et l'élever suffisamment en modifiant les lignes de la carène. La position de M est d'autant plus haute que la largeur de la carène est grande par rapport au tirant d'eau. Il faut donc que le constructeur soit libre d'augmenter cette largeur si on veut lui imposer une valeur déterminée de H.

Au contraire on ne peut guère faire varier la position de G, celle-ci résultant du type de bateau que l'on construit et de son chargement. Elle ne peut être modifiée au gré du constructeur comme c'est le cas pour les lignes de la carène.

La position de G peut, à la rigueur, être calculée d'avance, mais le calcul serait si long que, en pratique, il faut y renoncer.

Il est, au contraire, très simple de déterminer expérimentalement la position du centre de gravité d'un bateau existant, en procédant de la façon suivante :

On place sur le pont, dans l'axe du bateau, au point e, un poids p. Si le centre de gravité du bateau lège était en g, le centre de gravité du bateau chargé par le poids p remontera et viendra en G par exemple, voir fig. 8. Ensuite on déplace le poids p et on l'éloigne du plan de symétrie d'une distance d jusqu'au point e_1. Le centre de gravité du bateau chargé passe alors de G en G_1, sur la ligne ge_1. Si nous appelons P le poids du bateau lège augmenté de la charge mobile p, le moment pd sera égal au moment $P.\,GG_1$. La distance $GG_1 = MG.\,tg.\,\alpha$, donc $P.\,MG.\,tg.\,\alpha = pd$ et

$$MG = H = \frac{pd}{P.\,tg.\,\alpha} \qquad 2)$$

Il suffit donc de mesurer l'angle α et de remplacer pd et $tg.\,\alpha$ par leur valeur dans la formule 2) pour obtenir la valeur de MG et, comme on connaît la position exacte de M, qui a été déterminée sûrement à l'avance, on est également fixé sur la position de G.

On a déterminé de cette manière la position du centre de gravité d'un assez grand nombre de nos bateaux suisses et les résultats obtenus ont permis de constater que, pour des bateaux d'un même type, la hauteur de G au-dessus de la quille varie peu d'un bateau à l'autre, quelle que soit la longeur et la largeur de ces bateaux ; elle ne varie qu'avec leur hauteur qui, elle-même, est sensiblement constante. Ainsi on pourra fixer d'avance, par analogie, dans chaque cas, avec une approximation suffisante, la position de G et le problème ne consistera plus qu'à déterminer celle de M qui correspond à la valeur de H que l'on désire obtenir.

Dans le cas où on construirait un bateau d'un type s'écartant des types usuels, il sera toujours possible de voir quelle influence les modifications adoptées auront sur la position de G. Ainsi j'admets que celle-ci pourra toujours être fixée d'avance avec une exactitude suffisante.

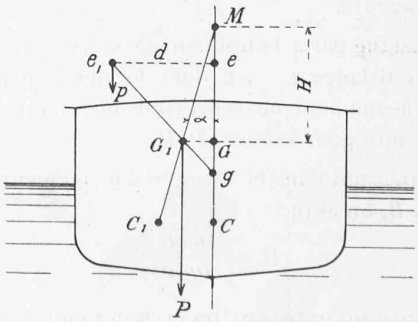

Fig. 8.

Les causes de renversement d'un bateau sont au nombre de 4, savoir :

1° Le déplacement latéral de la charge;

2° L'effet de la force centrifuge quand le bateau décrit une courbe;

3° Le moment de giration des roues, qui s'ajoute à celui de la force centrifuge;

4° L'effet du vent et des vagues.

Je ne me suis pas occupé de cette dernière cause parce que l'expérience montre que les bateaux qui résistent convenablement aux autres n'ont rien à craindre de celle-ci. Du reste une manœuvre convenable du bateau pourra le soustraire à leur influence.

III. Hauteur métacentrique nécessaire pour parer au déplacement des voyageurs.

La possibilité de déplacement des voyageurs est variable suivant la place disponible, c'est-à-dire suivant la densité du chargement. Elle est généralement très réduite quand celui-ci est complet. Le moment de renversement qui résulte de ce déplacement est proportionnel au carré de la largeur du ou des ponts qui sont mis à la disposition des voyageurs, parce que le nombre de voyageurs qui peuvent y avoir accès est proportionnel à cette largeur, ainsi que la distance d dont ils peuvent se déplacer. J'ai admis que cette largeur des ponts était égale à celle du bateau considéré et je remarque à ce sujet que, si l'on construit un bateau-salon avec un pont supérieur plus étroit que le bateau, on aura réduit en même temps le nombre de voyageurs qui peuvent y trouver place et la distance d dont ils peuvent se déplacer. Ainsi sa stabilité sera meilleure, toutes choses égales d'ailleurs, que celle d'un bateau avec pont supérieur de même largeur que le bateau lui-même.

Cette réduction de la largeur des ponts supérieurs a permis de transformer en bateaux-salons d'anciens bateaux assez étroits et dont la stabilité ne paraissait pas, au premier abord, devoir permettre cette opération.

Le poids du chargement est une fraction du poids total P. Si je désigne cette fraction par u, (coefficient d'utilisation), le poids du chargement sera uP. Sur le lac Léman le coefficient u est approximativement 0.2, en sorte qu'un bateau déplaçant en pleine charge 400 tonnes porte 80 tonnes de voyageurs.

Si je désigne par x la fraction de la largeur B qui représente la distance $d = xB$ dont le chargement peut se déplacer, le moment de renversement produit par ce déplacement aura pour valeur $uPxB$.

En remplaçant dans la formule 2 le moment pd par sa valeur $uPxB$, on aura:

$$H = \frac{uxB}{tg.\ a} \qquad 3)$$

En comparant entre eux un certain nombre de bateaux présentant une stabilité satisfaisante j'ai constaté que la valeur du coefficient x correspondant à l'inclinaison de $\frac{0.4}{B}$ ne dépasse pas 0.025.

La hauteur métacentrique nécessaire et suffisante pour obtenir une stabilité convenable contre les effets du déplacement de la charge a donc pour valeur

$$H = \frac{0.005\ B^2}{0.4} \qquad 4)$$

qu'on obtient en remplaçant dans la formule 3:

le coefficient d'utilisation u par sa valeur habituelle 0.2.

le coefficient de déplacement de la charge x, par la valeur 0.025 et enfin $tg.\ a$ par la valeur $\frac{0.4}{B}$ que comporte l'inclinaison limitée à la moitié du franc-bord de l'ordonnance fédérale.

En réalité le nombre de voyageurs que l'on peut admettre sur un bateau est proportionnel à la surface des ponts plutôt qu'au poids du bateau. Cependant cette surface et ce poids étant eux-mêmes sensiblement proportionnels entre eux, on peut admettre que le poids du chargement soit fixé en proportion du poids du bateau. On évite ainsi de faire intervenir dans le calcul la surface libre des ponts, qui n'est pas toujours bien définie.

Au Département fédéral des chemins de fer on calcule la surface libre des ponts en déduisant de leur surface réelle: 1° toutes les parties situées en dehors du périmètre de la coque (galeries); 2° tous les espaces non utilisables par les voyageurs, tels que cages d'escaliers, tables, capots de chaudières, claires-voies, offices de restaurateur; 3° les *salons* situés sur les ponts. Les *fumoirs* situés sur les ponts ne sont pas déduits.

Si l'on détermine ainsi la surface utile des ponts, le chargement qui a pour valeur 0.2 P correspond approximativement à 2.3 à 2.7 voyageurs par m² pour les bateaux salons et les demi-salons avec pont sur les tambours et à 2.8 à 3.0 voyageurs par m² pour les autres types de bateaux.

On a aussi proposé de fixer le chargement en fonction de la surface du plan d'eau à la ligne de flottaison. Cette surface étant proportionnelle au déplacement P, cela revient au même que d'attribuer au chargement une valeur proportionnelle à P.

Il est facile, dans chaque cas, de déterminer la valeur réelle du coefficient d'utilisation u. Si on trouve une valeur inférieure à 0.2, il ne faut pas calculer H d'après la formule 3) dans laquelle on introduirait cette valeur réelle de u, mais s'en tenir à la formule 4).

En effet, on sait par expérience que, si le chargement est incomplet (u plus petit que 0.2) la stabilité est généralement moins bonne et pourtant la valeur de la hauteur métacentrique H est plus grande que celle qui correspond au chargement complet (voir fig. 7), tandis que la formule 3) indiquerait qu'on peut se contenter d'une valeur plus petite. Cela tient à ce que u et x sont des valeurs solidaires l'une de l'autre, comme je l'ai dit plus haut et que dans le cas de u plus petit que 0.2 x est plus grand que 0.025, parce que la possibilité de déplacement des voyageurs augmente à mesure que la densité du chargement diminue et qu'elle

augmente plus rapidement que la hauteur métacentrique.

Si un bateau présente pour le cas du chargement complet une hauteur métacentrique H trop faible pour assurer une stabilité suffisante, la hauteur H_3 correspondant à un chargement incomplet (par exemple $u = 0.15$) sera alors à plus forte raison trop faible puisque nous avons vu que la stabilité est généralement moins bonne dans le cas de chargement incomplet.

Ainsi, *lorsqu'un bateau est trop peu stable pour porter son chargement complet, il le sera généralement aussi pour toute fraction de ce chargement.* Une réduction de celui-ci ne constitue donc pas un remède au défaut de stabilité. Comme d'autre part l'abaissement du centre de gravité par le moyen du lestage a aussi pour effet l'abaissement du métacentre, il n'en résulte qu'une amélioration bien minime de la stabilité, on voit qu'il n'existe pas de moyen simple de corriger un bateau insuffisamment stable.

Dans des cas pareils, il faut ou diminuer la largeur des espaces réservés aux voyageurs, ou élever le métacentre en modifiant la carène. Cette modification consistera en un rélargissement ou un allongement, ou les deux à la fois.

Chacun de nous connaît, sans doute, des cas de bateaux peu stables qui sont restés tels malgré lestage ou diminution de charge. Il est inutile d'insister!

IV. Hauteur métacentrique nécessaire pour parer à l'effet de la force centrifuge.

Voyons maintenant quel est l'effet de la *force centrifuge*, conséquence du chemin curviligne suivi par un bateau.

Si l'on désigne par P le poids du bateau chargé, par V sa vitesse en mètres par seconde, par R le rayon de la courbe suivie par le bateau et par g la gravité $= 9.81$, la force centrifuge a pour valeur

$$F = \frac{PV^2}{gR}$$

Pour calculer la valeur de F il faut donc connaître V et R. Il n'est pas facile de reconnaître quelles seront exactement ces valeurs de V et R, cependant connaissant la vitesse en ligne droite pour un nombre de tours donné des roues, on peut en déduire la vitesse en courbe pour le nombre de tours correspondant, en appréciant l'augmentation du recul.

En procédant ainsi j'ai trouvé que la vitesse maxima que peut atteindre un de nos bateaux en courbe, quand le

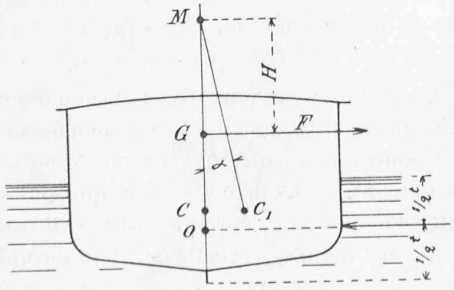

Fig. 9.

gouvernail est forcé à fond, varie de 4 m. par seconde (14.4 km. à l'heure) pour petits bateaux, à $6^m,25$ (23.5 km. à l'heure) pour grands bateaux. Du temps employé pour parcourir une circonférence de cercle complète, et de cette vitesse on déduit les rayons correspondants et on trouve 109 m. et 250 m.

La valeur de $\frac{V^2}{gR}$ pour $V = 4$ m. et $R = 100$ m. est de 0.0163 ; pour $V = 6^m,25$ et $R = 250$ m., on trouve 0.01592. Ces chiffres sont très peu différents l'un de l'autre et l'on commet une erreur insignifiante en posant pour tous les bateaux

$$\frac{V^2}{gR} = 0.016$$

J'ai donc admis que la force centrifuge avait pour valeur

$$F = 0.016\ P$$

La force F a son point d'application en G (fig. 9). La réaction de l'eau qui lui fait équilibre est une force égale et de sens contraire, horizontale et située à une profondeur en-dessous de la ligne de flottaison égale à la moitié du tirant d'eau. Si l'on prolonge la direction de cette force jusqu'à sa rencontre avec la ligne CG, on détermine le point O.

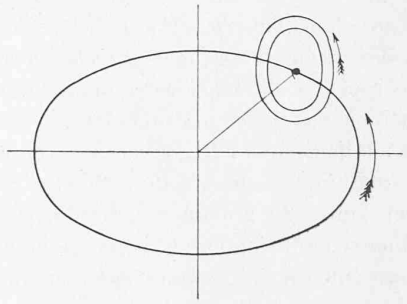

Fig. 10.

GO est le bras de levier à l'extrémité duquel agit la force centrifuge F ; le moment de cette force a donc pour valeur $0.016\ P.\ GO$.

Le moment de redressement ayant pour valeur $PH \sin.\ \alpha$, il faut pour qu'il y ait équilibre que

$$0.016\ P.\ GO = PH \sin.\ \alpha$$

Si nous attribuons à $\sin.\ \alpha$ la même valeur que celle que nous avons admise pour $tg.\ \alpha$ soit $\frac{0.4}{B}$, ce que nous pouvons nous permettre étant donné la faible valeur des angles d'inclinaison qui se produisent, on aura

$$H = \frac{0.016\ GO.\ B}{0.4} = 0.04\ GO.\ B \qquad 5)$$

V. Effet de giration des roues.

Chacun connaît la toupie giroscope tournant à l'extrémité d'un levier et dont l'équilibre est dû à un couple de redressement provenant du double mouvement de rotation dont la toupie est animée (fig. 10). Quand un bateau décrit

une courbe, ses roues constituent un giroscope double qui donne naissance à un couple agissant dans le sens du renversement du bateau.

La valeur de ce couple est

$$C = 2\,\omega\,\omega_1\,I$$

Dans cette formule ω est la vitesse angulaire des roues $= \frac{2\,\pi\,n}{60}$ ($n =$ nombre de tours des roues par minute), ω_1 est la vitesse angulaire du bateau $= \frac{2\,\pi\,n_1}{60}$ ($n_1 =$ nombre de tours du bateau en une minute) et $I = mR^2$, le moment d'inertie de la masse d'une roue par rapport à son axe.

La valeur de ce moment n'est pas très grande. Ainsi pour un bateau déplaçant 374 tonnes en pleine charge, le moment maximum de la force centrifuge atteint 14 mètres-tonnes tandis que celui de la giration des roues est de 0.38 mètre-tonne seulement, soit moins de 3 % du premier,

Etant donnée cette valeur minime on peut la négliger dans les calculs préalables de stabilité, cela d'autant plus qu'elle est équilibrée et au delà, par l'effet de la réaction de l'eau sur le gouvernail, quand le bateau décrit une courbe.

La résultante de la pression de l'eau sur le gouvernail passe en-dessous du centre de carène C ; le moment de cette force agit donc dans le sens du redressement et sa valeur absolue est au moins égale à celle du moment de giration des roues. L'existence de ce moment de redressement est facile à démontrer pratiquement.

La pression de l'eau sur le gouvernail produit un mouvement de rotation du bateau autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité et l'inertie de la masse à mettre en mouvement s'oppose à ce que ce mouvement de rotation naisse ou cesse instantanément en même temps que la force qui le produit.

Le chemin curviligne suivi par le bateau étant le résultat de la combinaison de ce mouvement de rotation avec le mouvement de propulsion, il en est de même de la force centrifuge dont l'action apparaîtra seulement un instant après que le gouvernail aura été forcé vivement et qui persistera encore un instant après que l'on aura abandonné subitement la roue du gouvernail.

Dans le premier cas le bateau prend d'abord une inclinaison de sens contraire à celle que la force centrifuge amènera dès qu'elle aura pris naissance, dans le second cas l'inclinaison augmentera d'une façon très sensible au moment où l'on abandonne la roue du gouvernail.

Si nous éliminons le moment de giration des roues, nous restons en présence des deux principales causes de perturbation de l'équilibre, le déplacement de la charge et la force centrifuge.

VI. Hauteur métacentrique nécessaire pour rendre un bateau suffisamment stable.

Il est évident que les deux causes ci-dessus indiquées peuvent agir simultanément et il semble, au premier abord, qu'il faille simplement les additionner. Il n'en est heureusement rien, car il en résulterait des hauteurs métacentriques irréalisables.

Nous avons vu que la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse et inversément proportionnelle au rayon des courbes décrites par un bateau. Ainsi le conducteur du bateau peut à son gré diminuer la valeur de la force centrifuge dans une très forte mesure. Par exemple une diminution de moitié de la vitesse aura pour conséquence une réduction des trois quarts de cette force. Si en même temps le rayon de la courbe est augmenté, la réduction sera encore plus forte.

Il n'est pas aussi facile d'agir sur le déplacement de la charge, cependant le personnel d'un bateau peut encore le faire dans une certaine mesure, principalement en faisant usage des chaînes qui empêchent l'accès de certaines parties des ponts.

En outre la limite d'inclinaison que j'ai admise est plutôt faible et l'on peut bien admettre momentanément qu'elle soit dépassée, lorsqu'il faut que la stabilité fasse équilibre en même temps aux deux causes d'inclinaison.

On peut donc calculer H par les formules 4 et 5, et adopter simplement la valeur la plus élevée des deux.

Je pense cependant qu'il vaudrait mieux tenir compte des deux formules en même temps et attribuer une importance plus grande à la force centrifuge pour les bateaux ayant un centre de gravité relativement élevé, ceci à cause de certains effets dynamiques plus accentués à mesure que le centre de gravité est placé plus haut. On serait ainsi conduit à donner à H des valeurs un peu supérieures à celles trouvées par les formules 4 et 5 pour les bateaux-salons et, dans une plus faible mesure, pour les demi-salons avec pont sur les tambours.

Quand il s'agira de bateaux de 7 mètres et plus de largeur, on pourra obtenir ces valeurs, mais ce ne sera pas le cas pour des largeurs inférieures à 7 mètres. Il faudra alors avoir recours au rétrécissement des ponts supérieurs si on veut avoir une stabilité convenable.

Nous avons vu que la position du centre de gravité au-dessus du centre de carène ne varie pas beaucoup pour les bateaux d'un même type. Les valeurs de GO sont aussi à peu près constantes pour ces bateaux. Pour la détermination préalable de H on peut admettre les valeurs suivantes de GO :

I. Bateaux-salons	$2^m,10$
II. Bateaux demi-salons avec pont sur les tambours	$1^m,80$
III. Bateaux demi-salons simples	$1^m,50$
IV. Bateaux à un seul pont	$1^m,30$

En introduisant ces valeurs dans la formule 5 on trouve les valeurs de H correspondantes. Dans le tableau des hauteurs métacentriques qu'on trouvera plus loin j'ai indiqué, en les soulignant, celles de ces valeurs qui sont supérieures à celles données par la formule 4. Les chiffres non soulignés sont ceux donnés par cette dernière formule.

On doit considérer ce tableau comme donnant des indications approximatives et s'astreindre, dans chaque cas, à

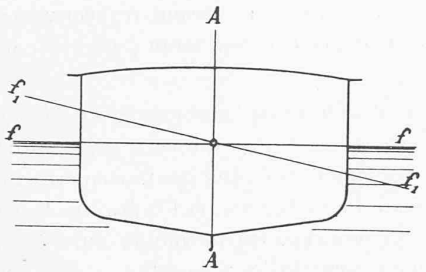

Fig. 11.

déterminer exactement la grandeur de GO pour rectifier, s'il y a lieu, la valeur de H.

Il faut aussi voir si la densité du chargement ne s'écarte pas trop de celle que j'ai admise pour établir la formule 4, soit en moyenne 2.7 voyageurs par mètre carré de surface libre des ponts. Si cette densité est moindre, il faut augmenter H d'après les indications du diagramme, fig. 7.

Réduction possible de la valeur de H. J'ai admis jusqu'ici que le franc-bord était de $0^m,40$. Ce chiffre est un minimum exigé par l'ordonnance fédérale ; en réalité on trouve souvent un franc-bord plus élevé ; si l'on continue à admettre que ce franc-bord puisse diminuer de moitié quand

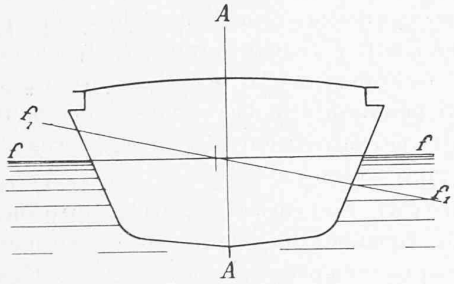

Fig. 12.

le bateau s'incline, il en résultera des valeurs de H plus petites.

La convention internationale qui régit la navigation sur le lac Léman exige un franc-bord de $0^m,50$. Les inclinaisons ayant pour valeur $\frac{0.5}{B}$ n'ont rien d'exagéré pour des bateaux d'une largeur de 6 m. 50 et au-dessus. Dans ces conditions les valeurs de H seraient les $^8/_{10}$ de celles qui correspondent à l'inclinaison de $\frac{0.4}{B}$. Je ne crois pas

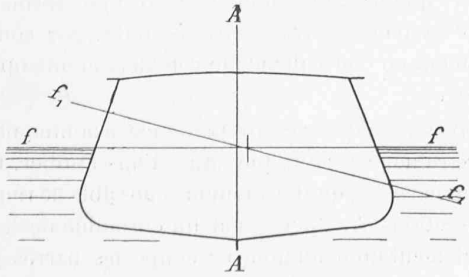

Fig. 13.

que l'on puisse rien opposer à cette réduction de H, mais il va sans dire que, dans ces conditions, la stabilité sera moins bonne.

VII. Stabilité de formes.

J'ai admis jusqu'ici que la hauteur de M ne variait pas avec l'inclinaison du bateau. Cela est exact pour une section immergée de forme rectangulaire (fig. 11). En cas d'inclinaison les plans d'eau ff, $f_1 f_1$ se coupent sur l'axe du navire AA. La section immergée augmente d'un côté de cet axe de la même quantité dont elle diminue de l'autre, par conséquent les moments de redressement augmentent proportionnellement à l'inclinaison et la hauteur de M ne varie pas.

Si la section immergée a une forme trapézoïdale (fig. 12) il n'en est plus de même. Les plans d'eau ff et $f_1 f_1$ se coupent en dehors de l'axe du navire, il n'y a donc plus égalité entre l'augmentation et la diminution de la section immergée de part et d'autre de cet axe. Dans ce cas la hauteur de M augmente avec l'inclinaison. Ces formes évasées sont donc avantageuses à la stabilité, à condition que la largeur des ponts mesurée au maître-couple ne dépasse pas la largeur de la carène mesurée au même couple, à la hauteur du plan d'eau.

Si les formes de la carène sont *rentrantes* (fig. 13), la hauteur de M diminue quand l'inclinaison augmente.

La stabilité de formes ne joue pas un rôle appréciable pour nos bateaux, soit parce que leurs carènes sont verticales dans les parties les plus larges, c'est-à-dire celles qui jouent le rôle principal dans la stabilité, soit parce que les inclinaisons admises ne sont pas assez grandes pour que l'influence des formes se fasse sentir.

La stabilité initiale, dont j'ai parlé au début, est celle qui résulte d'inclinaisons assez faibles pour que la stabilité de formes n'entre pas en ligne de compte. Pratiquement c'est la seule qu'il faille prendre en considération.

VIII. Conclusions.

I. Il est nécessaire de déterminer d'avance les conditions de stabilité qu'un bateau doit remplir.

II. Le constructeur peut remplir ces conditions si on lui laisse la liberté nécessaire, principalement en ce qui concerne la largeur de la carène et celle du pont supérieur quand il s'agit d'un bateau-salon.

III. La diminution du tirant d'eau étant favorable à la stabilité, il peut être avantageux d'augmenter la longueur d'un bateau pour obtenir cette diminution.

Valeurs minima de la hauteur métacentrique H proposées pour obtenir une stabilité suffisante des bateaux à vapeur sur les lacs suisses.

Largeurs B	I mm.	II mm.	III et IV mm.
$4^m,50$	378	324	270
$4^m,75$	399	342	285
$5^m,—$	420	360	312

5m,25	441	378	344
5m,50	462	396	378
5m,75	483	414	413
6m,—	504	450	450
6m,25	525	488	488
6m,50	546	528	528
6m,75	569	569	569
7m,—	612	612	612
7m,25	657	657	657
7m,50	703	703	703

Catégorie I. Bateaux-salons.

Catégorie II. Demi-salons avec pont sur les tambours.

Catégories III et IV. Demi-salons simples et bateaux à un pont.

Application de la statique graphique aux systèmes de l'espace.

Par M. B. Mayor, professeur.

(Suite [1]).

Systèmes plans.

122. La méthode des sections multiples subit, dans le cas des systèmes plans, des simplifications considérables qui méritent d'être signalées.

Conservons, dans ce but, les notations générales fixées au début de ce chapitre et remarquons, en tout premier lieu, que, puisque les conditions d'équilibre des systèmes plans sont au nombre de trois, l'équation fondamentale qui doit lier les nombres p, q_i et n prend la forme suivante

$$p + \sum_1^n q_i = 3\,n.$$

On démontre, d'autre part et comme dans le cas des systèmes à trois dimensions, qu'on peut supposer q_i inférieur ou égal à deux et p inférieur ou égal à trois.

Ces diverses conditions étant remplies, la relation fondamentale montre que n est au maximum égal à trois et la détermination géométrique ou analytique des tensions peut être opérée très simplement. Mais il convient, pour plus de clarté, d'examiner séparément les divers cas qui peuvent se présenter.

1er cas : $n = 3$. La relation fondamentale prend la forme

$$p + q_1 + q_2 + q_3 = 9,$$

et si l'on tient compte des inégalités qui doivent être vérifiées par les nombres p et q_i, on voit immédiatement qu'elle admet la seule solution

$$p = 3,\ q_1 = q_2 = q_3 = 2.$$

Convenons alors de désigner par M_1 le point d'intersection des deux barres auxiliaires du groupe Q_1, puis soient, de même, M_2 et M_3 les points analogues pour les deux autres groupes Q_2 et Q_3. Soient enfin, F_1, F_2, F_3 les résultantes des forces extérieures qui agissent respectivement sur les parties A_1, A_2, A_3 et T la résultante des trois tensions principales.

La partie A_1 devant demeurer en équilibre sous l'action des tensions des barres du groupe Q_1 et des forces T et F_1, la somme des moments de ces deux dernières forces s'annule nécessairement par rapport à M_1. De là résulte une première équation renfermant comme seules inconnues les trois tensions principales ; de plus, il est évident que deux équations analogues peuvent encore être obtenues en prenant les points M_2 et M_3 comme centres des moments, à condition d'introduire les forces F_2 et F_3 au lieu de la force F_1. La détermination analytique des tensions principales est donc immédiate ; en outre, un artifice analogue à celui que nous avons indiqué à propos des systèmes de l'espace conduit a une méthode géométrique très simple.

Décomposons, en effet, la force F_1 en deux composantes dont l'une passe par M_1 et dont l'autre admette la droite $M_2\,M_3$ pour ligne d'action. Cette décomposition est toujours possible losque les trois points M_1, M_2 et M_3 ne sont pas en ligne droite, ce que nous supposerons ici. En désignant alors par F'_1 la composante obtenue suivant la droite $M_2\,M_3$, il est bien évident que, dans l'équation des moments relative à M_1, on peut remplacer F_1 par F'_1. De même, en décomposant F_2 en deux composantes dont l'une passe par M_2 et dont l'autre F'_2 agisse suivant $M_1\,M_3$, on peut remplacer, dans l'équation relative à M_2, F_2 par F'_2. Enfin, il est encore permis de remplacer, dans l'équation relative à M_3, F_3 par une nouvelle force F'_3 qu'on détermine comme les deux précédentes.

D'autre part, il est encore bien évident qu'on ne modifie aucune des équations qui déterminent les tensions principales, lorsqu'on remplace ces nouvelles forces F'_1, F'_2 et F'_3 par leur résultante F'. Dans ces conditions, la somme des moments des deux forces F' et T s'annule par rapport à trois points non en ligne droite, ce qui ne peut avoir lieu que dans le cas où ces deux forces sont égales et directement opposées. Dès lors, pour obtenir les tensions principales, il suffit de décomposer F' suivant les barres principales et de changer les sens des composantes obtenues.

Dans le cas particulier où les trois forces F_1, F_2 et F_3 sont identiques, il suffit, pour déterminer les tensions principales, de décomposer l'une de ces forces suivant les barres principales.

On peut remarquer encore que les points M_1, M_2 et M_3 jouent le rôle des complexes (Γ_i) définis dans le cas de l'espace, alors que les trois sommets du triangle formé par les barres principales peuvent être assimilés aux complexes (G^i) et jouent en conséquence le rôle des nœuds opposés à ces barres.

Il convient d'ajouter enfin que le cas examiné peut toujours être ramené à celui que nous allons étudier. On voit facilement, en effet, qu'il est toujours possible de remplacer les trois sections S_1, S_2 et S_3 par un ensemble de deux sections seulement dont aucune ne coupe les barres principales.

[1] Voir No du 25 décembre 1908, page 287.