le moment tend à accélérer la rotation; mais le mouvement angulaire donne naissance à un couple résistant dont le moment peut surpasser le précédent, lui être égal, ou même lui être inférieur, suivant que la vitesse angulaire est plus ou moins intense, relativement à la vitesse de translation.

La combinaison du couple et de la résistance oblique donnera, comme nous venons de l'établir autrement, une force parallèle à la résistance oblique et passant suivant le cas sur l'avant ou sur l'arrière du point G.

Conclusions. — Pour achever l'étude complète des résistances pendant les girations, il faudrait encore examiner les cas où le centre instantané est sur l'arrière de la transversale milieu, et enfin où les mouvements, au lieu de se produire dans le sens de l'arrière à l'avant, se produiraient de l'avant à l'arrière; mais ces derniers cas offrent peu d'intérêt pour la pratique où ils ne se rencontrent que très rarement; en outre, nous pouvons considérer comme suffisamment établi que, dans la mesure de précision dont ces études sont susceptibles, on peut admettre que :

Dans les girations, les résistances de la carène sont sensiblement les résultantes de celles qu'offriraient les deux mouvements simultanés de translation et de rotation en lesquels le mouvement élémentaire peut être décomposé à chaque instant, à la condition toutefois de prendre pour vitesse de translation la vitesse dont est animé le milieu du navire à l'instant considéré.

C'est en nous basant sur ce principe, que nous déterminerons désormais les résistances correspondantes à des mouvements quelconques du navire.

§ 3. — Notions théoriques sur les girations.

Principes fondamentaux de mécanique. — Pour que la position d'un corps solide en mouvement soit déterminée, il suffit que l'on connaisse à tout instant la position de son

centre de gravité et la manière dont le corps est tourné dans l'espace.

Or, il résulte d'un théorème connu de mécanique que le centre de gravité d'un corps se meut comme si toute la masse y était concentrée, et que toutes les forces qui le sollicitent fussent transportées parallèlement à elles-mêmes en ce point. Il nous suffira donc, pour connaître le mouvement du centre de gravité du navire, de connaître la résultante de toutes les forces qui le sollicitent pendant le mouvement.

En second lieu, on sait que le corps tourne dans l'espace comme il tournerait sous l'influence des mêmes forces, si son centre de gravité était fixe ; toutes les forces qui sollicitent le navire pouvant être considérées comme horizontales, il nous suffira d'étudier le mouvement de rotation que prendrait le navire sous l'influence d'un couple ayant pour moment la somme des moments des forces par rapport au centre de gravité.

Nous rappellerons aussi que la force qui produit le mouvement d'un point matériel est toujours dirigée vers la concavité de la trajectoire; il est clair, en effet, que si on supprimait la force, le point continuerait à se mouvoir suivant la tangente au dernier élément parcouru, et que c'est précisément elle qui fait infléchir la trajectoire.

Lorsque la force, décomposée suivant la normale et la tangente, donnera une composante tangentielle de sens contraire à la vitesse, elle tendra à réduire celle-ci; lorsqu'elle donnera une composante dans le même sens, elle tendra à l'accélérer, et lorsque la composante tangentielle sera nulle, la vitesse sur la trajectoire sera constante.

Enfin, un couple appliqué au navire tendra à accélérer le mouvement angulaire ou à le diminuer suivant qu'il sera de même sens que ce mouvement ou de sens contraire, et lorsque le moment deviendra nul, le navire tournera uniformément.

Ces principes élémentaires de mécanique vont nous permettre d'expliquer, sans formules, les différentes circonstances des mouvements de giration des navires.

Résistances de la carène. — Nous avons montré au paragraphe précédent, que le mouvement élémentaire du navire peut être décomposé en une translation de vitesse égale et parallèle à la vitesse du centre de gravité, et en une rotation autour de ce point, et qu'on peut admettre que les résistances de la carène se composent de la résistance oblique due à cette translation et du couple résistant dû à la rotation.

Étude du mouvement de giration des navires. — Supposons que, le navire AB (fig. 112) étant en route directe, on mette la barre à tribord; les forces auxquelles il sera soumis à cet instant sont : la force de propulsion de l'hélice P, la résistance R de la carène et la résistance P_g du gouvernail ; les deux premières forces se font équilibre, il n'y a donc que la force P_g qui à ce premier instant puisse modifier le mouvement du navire.

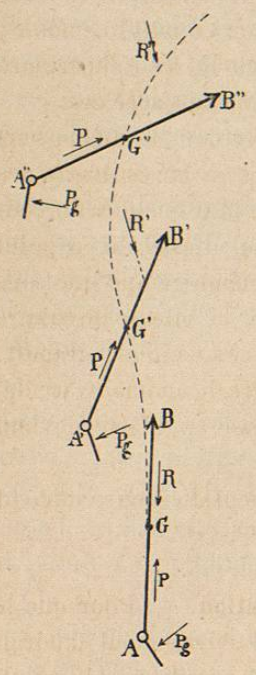

Fig. 112.

Sous l'influence de cette force, le centre de gravité tendra à se porter sur bâbord de la route, la trajectoire de ce point sera donc infléchie en dehors du sens de la giration ; *cette particularité se remarque sur presque toutes les courbes de girations relevées expérimentalement.*

En même temps, sous l'influence du moment de la force P_g relativement au point G, le navire tourne sur tribord; de sorte que, dès le début du mouvement, la trajectoire du centre de gravité est oblique au plan longitudinal, et la dérive est dirigée du bord opposé à celui où le navire effectue son abatée.

Après un court intervalle de temps, le navire a pris la position A'B' ; à cet instant, la vitesse du point G' étant oblique au plan longitudinal, la résistance de la carène est dirigée suivant R'. Avant l'abatée, la résistance était égale à la propulsion et lui faisait équilibre, de manière que la résultante des trois forces P, R, P_g était égale et parallèle à P_g; actuellement, la force R ayant tourné, la *résultante* tourne dans le même sens, de sorte que, dirigée au début sur bâbord, il arrive bientôt un instant où elle est dirigée sur tribord de la trajectoire du point G ; alors cette trajectoire commence à s'infléchir sur tribord.

En même temps, la vitesse angulaire augmente, car le moment d'évolution de la force R s'ajoute à celui de la force P_g ; mais le moment résistant à la rotation grandit lui-même ; tant que la somme des moments de R et de P_g reste supérieure au moment résistant, le mouvement d'abatée s'accélère.

Enfin, la force R continuant à tourner dans le même sens par rapport à l'axe, il arrive un moment où la résultante des trois forces P, P_g, R devient normale à la trajectoire du centre de gravité ; à partir de cet instant la vitesse de ce point reste constante ; d'un autre côté, en même temps que sous l'influence des moments de P_g et de R la vitesse angulaire s'accélère, le moment résistant dû à cette vitesse grandit, et bientôt l'équilibre s'établissant entre le moment accélérateur et le moment résistant, la vitesse angulaire devient constante.

A partir de cet instant, le mouvement du navire devient circulaire et uniforme.

Assiette du navire pendant la giration. — Pour que le navire conservât son assiette pendant la giration, il faudrait que la résultante des forces P, P_g, R fît équilibre à la résultante des forces d'inertie provenant du mouvement. Si cette dernière, qui est dirigée de dedans en dehors dans le mouvement circulaire, passe au-dessus de la précédente, le navire s'incline en dehors ; si au contraire elle passe au-dessous, le navire s'incline en dedans. On admet généralement que

la résultante des forces d'inertie est appliquée au centre de gravité, et que la résultante des résistances de la carène et de la force de propulsion passe par le centre de l'aire immergée du plan longitudinal; la première de ces hypothèses est sensiblement exacte, car l'axe vertical passant par le centre de gravité est sensiblement un axe principal d'inertie; mais la deuxième, ainsi que nous l'avons dit plus haut, ne repose sur aucune base; nous nous bornerons donc à signaler ce résultat de l'expérience que, sur la plupart des navires, la résultante des résistances de la carène pendant la giration a son point d'application situé au-dessous du centre de gravité, de sorte qu'il se produit un couple qui couche le navire du bord opposé à celui sur lequel il abat.

Toutefois, cet effet ne se produit que lorsque le navire a accentué son mouvement de giration; au début au contraire, sous l'impulsion de la force P_g, dont le point d'application est situé au-dessous du centre de gravité, le navire se met immédiatement à la bande du bord où l'on vient; ce n'est que quelques instants après qu'il se redresse et se couche en dehors.

Sur les torpilleurs dont le centre de gravité est relativement plus bas, le premier effet ne se produit pas, le couple tend au contraire à coucher le navire en dedans du cercle; pour corriger cet effet, il a suffi d'élargir la surface du safran à la partie supérieure; on a élevé ainsi le point d'application d'une résistance latérale dirigée de dedans en dehors et, par conséquent, produit un moment tendant à coucher le navire en dehors de sa trajectoire, c'est-à-dire un moment contraire à celui qui incline ces petits navires.

Rapport de la surface du safran à la surface immergée du plan longitudinal $\frac{G^2}{A^2}$. — Il est évident qu'au point de vue des qualités giratoires, il y a avantage à accroître le plus possible la surface du safran; mais, d'un autre côté, le gouvernail constitue un organe extrêmement délicat à cause de

sa mobilité, et il ne faut pas dépasser certaines limites indiquées par l'expérience et au delà desquelles la solidité serait compromise.

On admet d'un autre côté que, pour que les diamètres de giration de deux navires analogues soient proportionnels aux longueurs, il faut qu'ils aient des gouvernails tels que les rapports $\frac{G^2}{A^2}$ de la surface du safran à celle du plan de dérive soient égaux.

D'après M. Godron, les valeurs convenables pour ce rapport seraient (*Mémorial du génie maritime*, 1884):

Pour les bâtiments à voiles et à roues	0,022
— à hélice ordinaires	0,020
— — cuirassés.	0,025

Dans la pratique, ce rapport varie dans de larges limites: ainsi sur le cuirassé anglais le *Bellerophon*, on lui a donné la valeur 0,035, tandis que sur le troopship l'*Himalaya*, il n'était que de 0,016, et l'expérience a montré que le gouvernail de ce navire était très suffisant.

Stabilité de route. — Lorsqu'un navire, après avoir fait usage du gouvernail pour produire une abatée, vient à redresser la barre, le mouvement angulaire doit cesser spontanément au bout de quelques instants; mais, sur certains navires, il arrive que, lorsque la barre est droite, une embardée commencée continue à se produire, et si l'on fait usage du gouvernail pour arrêter le mouvement, le navire, au lieu de gouverner droit est lancé sur l'autre bord; de sorte qu'il embarde sans cesse d'un bord ou de l'autre au point que le commandant n'est plus maître de la route; on dit alors que le navire n'a pas de *stabilité de route*.

Pour se rendre compte des causes de ce grave défaut, il suffit d'analyser le mouvement du navire qui embarde et les résistances de carène qui résultent de ce mouvement. Lors-

que le navire AB (fig. 113) embarde sur tribord, son centre de gravité continue son mouvement rectiligne et vient en G′ au bout d'un court intervalle, en même temps le navire abat et vient se placer suivant A′B′. D'après ce que nous avons vu au paragraphe précédent, les mouvements composants du navire sont une translation directe qui donne lieu à une résistance directe, et une rotation autour du centre de gravité qui donne lieu à un moment résistant; la première force n'a aucune influence sur la rotation, il en est de même de la force de propulsion, il reste donc le moment résistant; si ce moment est faible, l'abatée commencée continuera assez longtemps; s'il est puissant, l'abatée cessera rapidement; en réalité, entre les navires stables et les navires instables en route, il n'y a pas de propriété distincte, mais bien une simple différence dans l'intensité du moment résistant, et le navire ne serait à proprement parler instable que si le moment était nul, c'est-dire si sa carène affectait la forme d'une calotte sphérique.

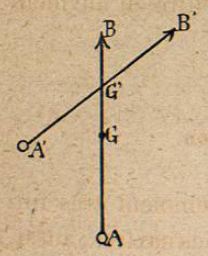

Fig. 113.

On voit ainsi qu'un navire qui n'a pas de stabilité de route doit ce défaut à des formes de carène trop arrondies, et qu'indépendamment des conditions de vitesse, il est encore nécessaire, à ce nouveau point de vue, que les formes de l'avant et de l'arrière soient affinées de manière à offrir des surfaces plates très résistantes au mouvement giratoire.

Nous avons admis, dans ce qui précède, que la translation du centre de gravité s'effectuait suivant l'axe, c'est en effet ce qui se passe au début de l'embardée; mais bientôt cette translation devient légèrement oblique en dehors, de manière que la résistance qui en résulte est elle-même légèrement inclinée sur l'axe; cette force étant appliquée sur l'avant, donne un mouvement qui tend à accéler l'abatée et qui diminue par conséquent le moment résistant; ce moment accélérateur diminue quand on rapproche de l'arrière le centre

de résistance; on peut donc corriger l'instabilité de route d'un navire par les procédés à l'aide desquels on fait culer le centre des résistances obliques, c'est-à-dire en augmentant la différence de tirant d'eau.

§ 4. — Expériences de giration.

Expériences de giration. — Il est évidemment très important de connaître les qualités giratoires des navires; aussi, à l'époque des essais, on les fait tourner à différentes vitesses, sous différents angles de barre, et on mesure pendant la giration les éléments nécessaires au tracé d'une épure représentant les positions du navire aux différents instants. Cette opération est en général très délicate, parce que la rapidité des mouvements du bâtiment ne permet pas d'obtenir des mesures suffisamment précises.

Pour marquer, à un instant donné, la position du navire, il suffit évidemment de connaître la position d'un de ses points et la direction de son axe, c'est-à-dire le cap; nous allons indiquer les principales méthodes qui ont été employées pour obtenir ces données.

Détermination du cap. — On ne peut pas se servir du compas pour obtenir le cap aux différents instants, car la rose est entraînée pendant le mouvement par le frottement du pivot sur la chape; on choisit un objet assez éloigné pour que l'on puisse considérer son relèvement comme fixe pendant l'évolution, et on mesure l'angle de l'axe du navire avec ce relèvement. Pour les bâtiments dont le cercle de giration serait considérable, il serait possible qu'il ne se trouvât pas en vue un point suffisamment éloigné; on pourrait alors faire usage du relèvement du soleil, à la condition que cet astre fût assez éloigné du méridien pour que son mouvement en azimut fût négligeable pendant la durée de l'évolution.

On opère de la manière suivante : on place sur la glace supérieure d'un compas de relèvement une rondelle de papier blanc, sur laquelle on marque la direction de la ligne de foi par un trait de crayon ; un observateur tient l'alidade dirigée constamment sur l'objet éloigné et marque, à l'aide d'un trait de crayon, la trace du bord de l'alidade sur la rondelle aussi souvent que possible ; chaque fois, il prévient par un top un timonier muni d'un compteur qui note les instants sur un carnet.

Il est facile de mesurer ensuite sur la rondelle les angles formés aux différents instants par la direction de la ligne de foi avec le relèvement fixe, et d'en déduire le cap du navire ; on trace alors une courbe ayant les heures pour abscisses et les caps pour ordonnées ; on pourra plus tard relever sur cette courbe les caps correspondants à des instants quelconques [1].

Il est indispensable que les tops soient donnés par l'observateur qui est placé à l'alidade, car il n'est pas très aisé de maintenir exactement la ligne de visée sur l'objet en vue, et il arriverait fréquemment que, au moment d'un top donné par le compteur, l'alidade ne fût pas en bonne position.

Détermination de la position d'un point du navire. — Cette opération est beaucoup plus délicate que la précédente ; on a employé avec assez de succès les méthodes suivantes :

Première méthode. — Cette première méthode consiste à faire tourner le navire autour d'un ponton au mouillage ; sur ce ponton, deux observateurs opérant isolément mesurent, l'un la hauteur d'un mât, l'autre le relèvement au compas du pied de ce mât. La hauteur angulaire donne la

1. Au lieu d'employer une rondelle de papier blanc, on peut lire de temps à autre la graduation indiquée par l'alidade sur le cercle fixe qui entoure la glace supérieure du compas ; le zéro de la graduation étant dans l'axe du navire, on obtient immédiatement l'angle formé par cet axe avec le relèvement ; l'emploi de la rondelle évite les erreurs de lecture ; à côté de chaque trait, on doit, dans ce cas, inscrire un numéro qui servira de repère pour retrouver sur le carnet du compteur l'instant de l'observation.

distance du mât au ponton, et à l'aide du relèvement on pourra placer ce point sur l'épure à tout instant.

Mais, outre qu'il n'est pas très facile de faire tourner un navire autour d'un point fixe sans risquer de l'aborder, il arrive que la distance du navire au ponton varie par moments avec une telle rapidité, que l'observateur de la hauteur a beaucoup de peine à prendre les angles et à les lire. Cette méthode a été mise en pratique par l'escadre d'évolutions en 1866.

Deuxième méthode. — On peut se dispenser de placer un observateur sur le ponton, à la condition d'employer un ponton mâté ; alors, à bord du navire lui-même, outre l'observateur qui détermine le cap comme on l'a vu plus haut, un autre observateur mesure la hauteur du mât du ponton, et un troisième, par un procédé analogue à celui qui a été employé pour le cap, détermine l'angle de la ligne de foi avec la direction du ponton ; en combinant cet angle avec le cap du navire, on obtiendra le relèvement du ponton.

Chacun de ces observateurs est aidé par un timonier compteur spécial et prend ses mesures sans se préoccuper des deux autres ; on trace ensuite les trois courbes qui représentent les valeurs des éléments aux différents instants, et on en déduit ensuite leurs valeurs simultanées pour des instants équidistants.

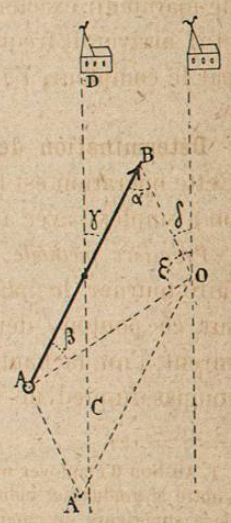

Fig. 114.

Troisième méthode. — Les deux méthodes précédentes exigent que le navire ou le ponton soient munis d'un mât assez élevé pour servir de base à l'évaluation des distances ; on peut s'affranchir de cette nécessité en prenant une base sur le pont du navire lui-même. On mouille alors une bouée O (fig. 114) autour de laquelle tournera le navire, et, pendant qu'un observateur

déterminera le cap à l'aide du relèvement d'un objet éloigné, c'est-à-dire l'angle γ, deux observateurs placés en A et B, aux deux extrémités du navire, mesureront les angles α et β.

Les trois observateurs agiront encore indépendamment les uns des autres, et c'est à l'aide de courbes qu'on obtiendra les valeurs simultanées des éléments γ, α, β. On en déduira ensuite les angles δ et ε formés par les lignes OB et OA avec une parallèle à la ligne CD menée par le point O ; enfin, pour tracer l'épure, on mènera les lignes OB et OA puis OA′ parallèle à BA ; on prendra OA′ = BA, et par le point A′ on mènera la ligne A′A parallèle à OB ; on obtiendra ainsi le point A[1].

Effet du courant ou de la brise. — Ces méthodes ne peuvent donner des résultats satisfaisants que lorsqu'il n'y a ni brise ni courant ; il est clair, en effet, que la courbe obtenue sera la trajectoire vraie du navire au moment de l'opération, et qu'elle sera déformée et allongée par suite de la dérive ; il est impossible de corriger l'influence de la brise, aussi est-il bon de ne faire l'expérience de giration que par calme ou faible brise ; quant au courant, lorsqu'il est bien régulier et que sa direction et son intensité sont connues, on peut corriger la courbe de son influence en portant chacune des positions obtenues en amont et à une distance égale à celle que le courant aurait parcourue dans l'intervalle écoulé depuis l'origine de l'évolution jusqu'à l'instant correspondant à la position considérée.

On peut encore substituer aux pontons ou à la bouée, un objet flottant O que le courant entraînera comme le navire ; il est clair que, dans ce cas, la troisième méthode est de beaucoup la plus pratique ; cette méthode a été indiquée par M. Risbec (*Mémorial du génie maritime*, 1876), c'est celle que

1. Au lieu de compter les angles comme ils sont indiqués sur la figure, il sera préférable de les évaluer de 0 à 360° à partir de l'avant du navire et vers la droite ; de cette manière, les angles de OB, OA, OA′ avec la direction du relèvement fixe seront toujours donnés respectivement par les formules : $180° + \alpha - \gamma$, $180° + \beta - \gamma$, $180° - \gamma$; dans les cas où les résultats de ces formules seront négatifs, les angles seront portés à gauche.

les commissions d'expériences emploient de préférence ; la mire flottante doit être lestée de manière à avoir dans l'eau un pied suffisant pour qu'elle ne soit pas drossée par la brise, ou du moins qu'elle ne le soit pas plus que le bâtiment lui-même.

Il arrive quelquefois que les courants de surface ne sont pas les mêmes que ceux des fonds ; aussi, il serait préférable que la mire eût le même tirant d'eau que le navire, mais elle serait alors peu maniable ; en outre, il est douteux que, même dans ces conditions, elle se comporte comme le bâtiment. Aussi, on doit opérer autant que possible par faible brise, et dans des courants très faibles et bien réguliers ; dans toutes les autres circonstances, les épures obtenues seront très défectueuses.

Une autre cause d'imperfection de la méthode consiste en ce que les triangles AOB qui servent à déterminer la position de l'axe AB, ne conservent pendant la giration des formes satisfaisantes que lorsque l'on a réussi à placer la mire dans le voisinage du milieu du cercle, ce qui est très difficile à obtenir ; aussi, dans la plupart des expériences, les triangles affectent des formes très défectueuses, et les résultats sont d'autant moins parfaits que la base est plus courte, et que le cercle de giration est plus grand.

La courbe de giration de la *Tempête* (fig. 115), donnée plus loin, est un des résultats les plus précis que nous ayons pu trouver ; la précision en est due à la petitesse du cercle de giration relativement à la longueur du navire.

§ 5. — Caractères principaux des courbes de giration. — Considérations relatives à la pratique des évolutions.

Courbe de giration proprement dite, ses caractères. — C'est la trajectoire du centre de gravité du navire ou de son milieu que l'on prend en général pour courbe de giration ; les caractères de cette courbe sont les suivants :