conservent une vitesse générale dans le sens de la propagation des lames.

Nous avons signalé, à propos des gouvernails compensés, l'importance attribuée par M. le contre-amiral Mottez aux effets de ces vitesses propres des molécules liquides sur le gouvernail du navire qui fuit devant le temps.

---

# CHAPITRE II

## DU ROULIS ET DU TANGAGE

---

**Direction de la poussée dans les liquides en mouvement.** — Nous avons montré que, dans la houle, la poussée subie par les molécules superficielles était normale à la surface libre ; cette propriété n'est pas particulière au phénomène de la houle, elle s'applique aux liquides animés de mouvements quelconques.

Si l'on considère en effet, dans le liquide agité (fig. 122), une molécule comprise entre deux surfaces de niveau infiniment voisines, on voit que les pressions exercées sur les parois comprises entre ces surfaces se font équilibre, et que la poussée est la résultante des pressions que supportent les parois qui coïncident avec elles ; ces pressions étant normales à ces surfaces, il en est de même de leur résultante ; on voit ainsi que, dans les liquides en mouvement comme dans les liquides en repos, la poussée en tous les points est normale aux surfaces de niveau.

La surface libre étant une surface de niveau, la poussée des molécules superficielles est dirigée suivant sa normale.

**Du moment de roulis.** — Admettons que les dimensions transversales du navire soient négligeables relativement à celles des lames, et que celles-ci prennent le navire en travers ; la poussée exercée par le liquide sur la carène sera sensiblement égale à celle qu'il exercerait sur le liquide déplacé, elle sera donc normale à la lame ; en outre, les molé-

cules liquides dont le navire occupe la place ayant des vitesses sensiblement égales et parallèles, on pourra, dans la même hypothèse, admettre que cette force est appliquée au centre de la carène actuellement immergée, c'est-à-dire en $C_1$; on voit que, sauf les variations d'intensité de la poussée dont nous parlerons plus loin, les forces seront celles qui agiraient sur le navire en repos, si la verticale était dirigée suivant $C_1m$.

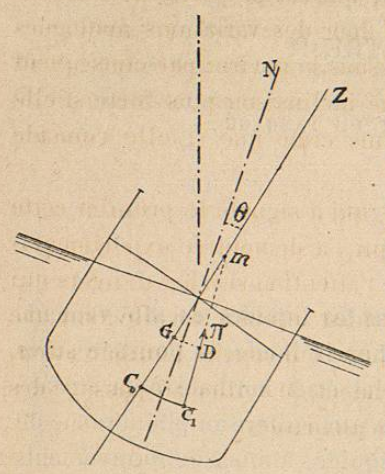

Fig. 129.

Le moment de la force $\pi$, relativement au point G, tendra à faire tourner le navire de manière à rapprocher son axe $C_0Z$ de la normale $C_1N$ à la lame, et son intensité sera à tout instant :

$$\pi(\rho - a)\sin\theta$$

Il est clair que ce moment tendra tantôt à redresser le navire relativement à la verticale vraie, tantôt à l'incliner davantage suivant que la verticale et la normale CN seront d'un même côté de l'axe $C_0Z$ ou de côtés opposés. Il résulte de ces changements de sens, relativement à la verticale vraie, que, pour les navires à voiles, le couple de stabilité qui est un couple de redressement lorsque l'eau est calme, vient parfois s'ajouter au couple de voilure pour accroître l'inclinaison; mais on conçoit aisément que la sécurité du navire dépend plutôt de sa position relativement à la surface de la lame que de sa position relativement à la verticale vraie ; de sorte que le moment de roulis est encore un moment de sécurité.

*Diminution de la stabilité sur la crête des lames.* — On a vu



au chapitre précédent que, sur la houle, la poussée du liquide était moindre sur les crêtes des lames que dans les creux ; le moment de stabilité, qui est proportionnel à l'intensité de la poussée, subira donc des variations analogues pendant le passage des ondes sous le navire; par conséquent une même rafale produira une inclinaison plus forte si elle coïncide avec le passage d'une crête que si elle coïncide avec le passage d'un creux.

M. le contre-amiral Mottez, qui a signalé le premier cette particularité importante, et qui l'a démontrée expérimentalement sur la Loire, a appelé l'attention sur les dangers qui peuvent en résulter pour les embarcations à la voile ; sur une houle un peu forte avec une brise qui couche l'embarcation, le fargue dans l'eau, il est prudent de veiller au passage des crêtes des lames aussi bien qu'aux risées.

**Influence de la période d'oscillation du navire sur les mouvements de roulis.** — L'accélération angulaire que prend un solide autour d'un de ses axes principaux d'inertie, sous l'influence d'un couple perpendiculaire à cet axe, est égale au quotient du moment du couple par le moment d'inertie, du solide. Les navires obéissent donc d'autant plus rapidement au couple de roulis que ce couple est plus intense et que le moment d'inertie autour d'un axe longitudinal passant par le centre de gravité sera plus faible; or, on a vu que la période d'oscillation du navire en eau calme avait pour expression :

$$T = \varpi\sqrt{\frac{I}{P(\rho - a)}}.$$

On voit que la facilité avec laquelle les navires obéissent au couple qui tend à les ranger normalement à la lame varie en sens inverse de la période d'oscillation.

*Navires à courte période.* — Ces navires, obéissant immédiatement au couple de roulis, se maintiennent perpendiculaires à la lame; l'amplitude des roulis reste ainsi égale à l'amplitude des oscillations de la normale à la mer. Sur la

houle bien régulière, la déclivité des lames étant assez faible, l'amplitude des roulis sera faible ; mais on sait que les profils des ondes très allongés dans les creux présentent de fortes courbures aux crêtes, de sorte que, dans les creux des lames, les navires dont nous parlons restent à peu près droits, tandis qu'au passage de chaque crête ils subissent un coup de roulis de peu d'amplitude mais très dur. Ce phénomène est facile à constater pour les embarcations qui flottent sur la houle.

Mais lorsque la mer est grosse, les pentes des lames sont très accentuées, et par conséquent les oscillations de leur normale sont très amples et très rapides aux crêtes, les roulis deviennent à la fois très amples et très durs ; un navire ne pourrait pas naviguer dans ces conditions, il se délierait très rapidement et pourrait perdre sa mâture.

*Navires à longue période.* — Lorsque le rapport $\frac{I}{P(\rho - a)}$ est grand, l'accélération que prend le navire à chaque instant est faible, et avant qu'elle n'ait pu produire une vitesse sensible, le couple change de sens et vient la combattre ; les navires sur lesquels cette condition est réalisée roulent à peine. Sur le « *Suffren* » dont la période d'oscillation était de $10^s$, les roulis ne dépassaient pas $3^o$.

*Navires ordinaires.* — Il ne faudrait pas conclure de ce qui précède que les navires ordinaires, pour lesquels la période d'oscillation est comprise entre les limites extrêmes que nous venons de citer, prendront des mouvements dont les caractères seront intermédiaires à ceux des mouvements correspondants à ces limites. Ces bâtiments en effet, cédant aux impulsions imprimées par le couple de roulis, prendront des balancements tantôt accélérés, tantôt retardés par ce couple ; lorsqu'il y a synchronisme entre la période de la lame et celle du navire, les mouvements présenteront des caractères que nous allons essayer d'analyser.

**Influence du synchronisme du navire avec la lame.** — Nous avons désigné par 2T l'intervalle nécessaire à une onde



pour parcourir sa longueur, c'est-à-dire pour qu'elle vienne offrir la même phase au navire sous lequel elle passe ; désignant par T′ la période d'oscillation simple du navire en eau calme, il faudra à ce dernier un intervalle 2T′ pour revenir à la même inclinaison avec la même vitesse angulaire ; on dit que le navire et la lame sont synchrones lorsque T=T′.

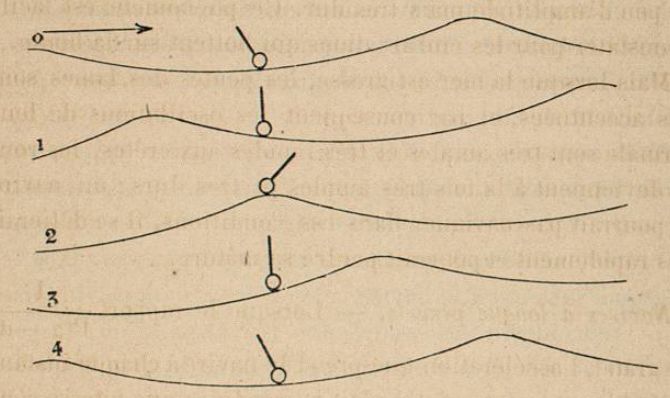


Fig. 130.

Aux instants 0, $\frac{T}{2}$, T, $\frac{3T}{2}$, 2T, la lame animée d'un mouvement de translation dans le sens de la flèche (fig. 130) occupera successivement les positions 0, 1, 2, 3, 4 ; supposons actuellement que, à l'instant 0, le navire soit rencontré par le creux de la houle dans la position d'inclinaison extrême sur bâbord ; le creux de la houle présentant en général une faible courbure, le navire oscillera comme en eau calme, il sera atteint par la position 1 de la lame au moment où il sera droit et abattant sur tribord, et à cet instant la crête de la lame approchant par dessous lui imprimera une accélération sur tribord ; au moment où la crête l'atteindra, ce navire sera à son inclinaison extrême sur tribord ; le redressement sera accéléré par le revers de la lame, de sorte que dans la position 3 le navire droit sera animé d'une vitesse angulaire sur bâbord plus grande que dans la position 1 ; son inclinaison maximum sur bâbord, au moment où le creux suivant passera

(position 4), sera donc plus grande que dans la position 0. Le mouvement angulaire continuera ainsi à s'accélérer à chaque lame jusqu'à ce qu'il ait atteint une amplitude telle que les résistances passives de la carène fassent équilibre au couple accélérateur.

On voit ainsi que l'on peut admettre que, dans le creux de la lame, le navire oscille comme en eau calme, mais que le passage de chaque crête lui imprime un couple accélérateur qui tend à augmenter la vitesse angulaire et par conséquent l'amplitude des oscillations.

Nous avons supposé, il est vrai, que le navire était atteint par la lame dans une phase favorable à cette accélération ; si le navire était dans une phase différente, les effets du couple de roulis tendraient à troubler le mouvement, mais, dans les positions variées où le navire pourra être atteint par la lame, il se rencontrera nécessairement un instant où l'accord pourra s'établir et à partir de cet instant le synchronisme se produira et ne cessera d'exister.

*Remarque.* — Sur la grosse mer, les effets du synchronisme sont moins saillants parce que les vagues sont loin d'offrir la régularité des ondes de la houle, les couples accélérateurs que subit le navire sont tantôt dans le même sens, tantôt en sens contraire de la vitesse angulaire, de sorte que les mouvements de roulis sont tantôt accélérés, tantôt arrêtés brusquement, et leurs périodes comme leurs amplitudes sont très irrégulières.

Aussi, bien que l'on dise habituellement que les oscillations du navire sur mer agitée ont la même période que celles en eau calme, il faut comprendre que l'isochronisme des oscillations ne peut exister que sur une houle régulière et à peu près synchrone, de sorte que toutes les fois qu'il existe une périodicité bien marquée, on retrouve la période d'eau calme. Sur la grosse mer, les durées des oscillations successives varient du simple au double.

**Conclusions pratiques relatives à la diminution des roulis.** — De ce qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes :



1° Lorsqu'à égalité de moment d'inertie un navire sera trop stable, c'est-à-dire lorsque sa période d'oscillation sera trop courte, les roulis sur la houle auront peu d'amplitude, mais ils seront un peu vifs au passage des crêtes ; ils deviendront durs et intolérables sur la grosse mer ;

2° Lorsque la période d'oscillation sera sensiblement égale à celle de la propagation des lames, les roulis seront très amples ;

3° Lorsqu'enfin la période d'oscillation sera très longue, relativement à la période de la lame, le navire roulera à peine.

Il faut donc autant que possible se rapprocher de ce dernier cas, c'est-à-dire augmenter le rapport $\frac{I}{P(\rho - a)}$ ; on peut arriver à ce résultat de deux manières, soit en augmentant le moment d'inertie I, soit en diminuant le moment de stabilité initiale par l'abaissement du métacentre. Malheureusement ce dernier procédé offre le grave inconvénient de diminuer la stabilité statique, et la sécurité du navire devient compromise sous l'influence de couples d'inclinaison relativement modérés ; c'est ainsi que, lors des premiers essais du *Tonnerre*, le navire prit une bande inquiétante sous l'influence du couple qui naît pendant les girations ; de même le *Suffren* et *l'Océan*, qui avaient $10^s$ pour période d'oscillation, ne roulaient pas à la mer, mais ils prenaient, sous l'effet du couple de voilure par la moindre brise, une inclinaison qui parut compromettante ; et on dut augmenter, par l'allégement des hauts, la valeur de $\rho - a$ qui n'était que de $0^m,60$.

La nécessité de diminuer la stabilité statique pour obtenir la tranquillité à la mer avait été révélée par l'expérience à une époque déjà ancienne ; l'amiral Krantz, dans une note publiée par la *Revue maritime* (1867, tome XX, page 302), cite l'exemple suivant : « La frégate la *Boudeuse* sur laquelle « Bougainville fit son voyage autour du monde, essuya à son

« premier départ de Brest un coup de vent violent et fit de « graves avaries ; ses roulis excessifs furent attribués à ce « que l'on avait placé près de la carlingue une partie des « canons de la batterie. Les pièces furent remises à leur « place et l'on n'eut plus à se plaindre des roulis de la fré- « gate. » Longtemps perdu de vue, ce principe fut remis en lumière dans la campagne d'expériences de l'escadre en 1863. (*R. M.*, tome XX, page 304.)

Certaines expériences semblent montrer cependant que ce principe n'est pas absolument général ; le *Renard* qui pour sa grandeur avait une période relativement longue $5^s,7$ (800 tonneaux, $\rho - a = 0,30$) roulait beaucoup. M. Bertin a émis l'avis que « sur les petits navires la tranquillité à la mer de- « manderait plutôt une augmentation de stabilité, mais qu'il « faut que la vivacité des roulis ne soit pas trop augmentée ; « on ne doit pas reculer devant l'adjonction de quilles laté- « rales énergiques. » (*Les vagues et le roulis*, p. 157.) Nous craignons cependant qu'en agissant ainsi on ne sacrifie complètement la vitesse.

Il ne faut pas perdre de vue d'ailleurs que, *sur la houle régulière*, le rapport de la période du navire à celle de la lame offre une grande importance, et que telle modification qui augmenterait les qualités du navire pour un état donné de la mer pourrait les diminuer pour un autre état ; on a vu à plusieurs reprises des bâtiments naviguant de conserve faire preuve de qualités relatives inverses par des temps différents ou sous différentes allures. On conçoit aisément que la période de la lame relativement au navire qui se meut varie avec l'allure, puisque les crêtes atteignent la coque à des intervalles qui diffèrent avec la vitesse et avec l'obliquité de la route relativement à la direction des lames.

Nous donnons ci-après les durées d'oscillation de divers types de navires.



**Durées en secondes d'une oscillation simple d'un bord sur l'autre[1].**

| NOMS des bâtiments. | DURÉE d'une oscillation. | NOMS des bâtiments. | DURÉE d'une oscillation. |
|---|---|---|---|
| | secondes. | | secondes. |
| *Napoléon* | 5.8 | *Jeanne d'Arc* | 5.4 |
| *Impérial* | 6.1 | *Atalante* | 5.3 |
| *Normandie* | 4.8 et 5.4[1] | *Aveyron* | 5.5 |
| *Invincible* | 4.9 | *La Clocheterie* | 5.4 |
| *Couronne* | 4.9 | *Volta, d'Estrées* | 4.4 |
| *Magenta* | 5.7 et 7.2[1] | *Lamothe Piquet* | 3.3 |
| *Solférino* | 6.04 et 7.5[1] | *Crocodile* | 3.6 |
| *Savoie* | 5.7 | *Tactique* | 2.8 |
| *Flandre* | 6 | *Rochambeau* | 3.8 |
| *Suffren* | 10 | *Onondaga* | 2.7 |
| *Junon* | 5.3 | *Renard* | 5.7 |
| *Magicienne* | 4.7 | *Château-Renaud* | 4.4 |

1. Le 2e nombre indique la durée obtenue à la suite de modifications apportées dans l'armement ou l'arrimage.

**Des moyens de faire varier la période d'oscillation d'un navire.** — Il est clair tout d'abord que si, sans rien changer à la position du centre de gravité, on éloigne symétriquement les poids vers les flancs du navire, on augmentera le moment d'inertie total ; on sait en effet que le moment d'inertie du système formé par les deux poids $a$ et $b$ relativement au point G (fig. 131) est égal au moment d'inertie relatif à leur centre de gravité, augmenté du produit de la masse totale par le carré de la distance $g_1G$ ; si on augmente le moment d'inertie relatif au point $g_1$, en éloignant les poids vers les murailles, on augmentera le moment d'inertie relatif au

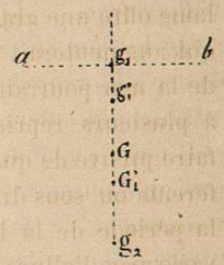

Fig. 131.

1. Ces durées sont extraites de l'ouvrage de M. Bertin, *les Vagues et le Roulis*.

point G, et, comme d'ailleurs la position du centre de gravité ne change pas, le dénominateur du rapport $\frac{I}{P(\rho - a)}$ conserve sa valeur, donc la période augmente.

Considérons actuellement un poids $g_1$ sur l'axe, soit $g_2$ le centre de gravité des autres poids du navire ; on sait que ces deux points sont situés de part et d'autre du centre de gravité G du système. Supposons que l'on abaisse le poids $g_1$ en $g'_1$, le centre de gravité vient en G′ et l'on sait que GG′ est plus petit que $gg_1$ ; $g'_1$G′ est donc plus petit que $g_1$G ; la distance $g_2$G a également diminué, par conséquent le moment d'inertie total a diminué, et, comme d'ailleurs le moment de stabilité a augmenté, le rapport $\frac{I}{P(\rho - a)}$ et par conséquent la période d'oscillation a diminué.

On démontrerait de la même manière que si l'on élevait le point $g_1$ on augmenterait la période.

Si au contraire on élevait ou l'on abaissait le poids $g_2$, les deux termes du rapport varieraient dans le même sens, par conséquent, quel que soit le sens des variations du rapport, ces variations seront moindres que dans le cas précédent.

*Remarque.* — Les additions de poids augmentent la période lorsque le poids ajouté est placé au-dessus du métacentre différentiel, car le moment d'inertie augmente et la stabilité diminue.

Il n'est, en effet, presque aucun marin qui n'ait eu l'occasion de constater que, lorsque l'on embarque un approvisionnement de charbon sur le pont, les mouvements du navire à la mer deviennent plus doux ; ce résultat est dû à la cause que nous venons d'indiquer.

**De l'axe d'oscillation du navire à la mer.** — L'analogie du mouvement d'oscillation du navire avec le mouvement pendulaire a fait croire à l'existence d'un *axe d'oscillation* ou d'une *région tranquille dans l'espace absolu* et autour de laquelle s'effectueraient les mouvements de roulis à la mer.



La recherche de cette région a fait l'objet d'études théoriques et expérimentales qui n'ont donné que des résultats négatifs ; les considérations qui suivent montreront qu'en effet cette région n'existe pas ou que, du moins, si, pour certaines allures et par certaines mers, il y a une région du navire dont les mouvements sont peu sensibles, cette région n'a rien de fixe et varie avec les circonstances.

Sans donner à cette étude plus de précision qu'elle n'en peut comporter, on peut admettre que l'immersion du navire reste sensiblement constante pendant le mouvement, et que le centre de la flottaison est animé dans l'espace d'un mouvement analogue à celui des molécules superficielles, c'est-à-dire qu'il s'élève et s'abaisse au passage des ondes et qu'il est animé en même temps d'un mouvement latéral périodique dont l'amplitude est sensiblement égale à l'amplitude du mouvement vertical.

De sorte que, sur la mer agitée, le centre de la flottaison décrit une courbe analogue à un cercle ayant pour diamètre la hauteur de la houle de crête en creux, c'est-à-dire 2, 3, 4 mètres, etc., sur des houles de 2, 3, 4 mètres, etc., de hauteur. Le mouvement du navire consiste donc en des oscillations périodiques autour d'un axe passant par ce point mobile. On voit aisément que, dans un mouvement de ce genre, il n'est aucun point qui puisse être *tranquille,* et que si, dans des circonstances données, il y a une région dans laquelle les accélérations restent faibles, cette région variera lorsque l'amplitude du mouvement circulaire du centre de la flottaison variera.

Quant à l'axe instantané de rotation, on verrait aisément que, quelle que soit la nature du mouvement oscillatoire, il passe de l'infini d'un bord à l'infini sur l'autre bord dans une seule oscillation.

**Du tangage.** — Au point de vue théorique, les mouvements de tangage offrent une analogie complète avec les mouvements de roulis ; au point de vue pratique, la période

d'oscillation dans le sens longitudinal étant très courte, le bâtiment se maintient sensiblement parallèle à la direction moyenne de la lame sur laquelle il flotte. Lorsque le navire fait route vent arrière, et qu'il est plus court que la lame, son arrière et son avant sont soulevés alternativement, mais les mouvements sont encore relativement doux, parce que leur période est la période relative des lames notablement allongée par la fuite du navire devant elles. Si le navire marche debout à la mer, la période des lames est raccourcie, les oscillations deviennent très brusques et très dures, et la fatigue du matériel et du personnel est encore accrue par les chocs des lames qui attaquent les joues du navire avec une vitesse égale à la somme de leur vitesse propre et de celle du navire.

Lorsque le navire a même longueur que la lame ou une longueur plus grande, ses tangages vent arrière sont insensibles, mais, vent debout, l'influence des chocs de l'eau sur l'avant subsiste. Si l'on veut éviter les effets de ces chocs, il faut dérober les formes de l'avant aux coups de mer, c'est ce résultat qu'on a obtenu en adoptant les étraves renversées.

Enfin, il faut éviter de placer à l'avant de gros poids, de manière que le navire se lève facilement à la lame debout; on évite également de cette manière des fatigues considérables à la charpente.

Nous reviendrons au chapitre suivant sur la nature des mouvements du navire à la mer.

**Remarque sur la théorie du roulis.** — Quelque restreints que puissent sembler les développements qui précèdent, ils nous paraissent contenir tout ce qui est actuellement acquis sur les propriétés du roulis et du tangage sur mer agitée. Pour poser l'équation du roulis, il nous aurait suffi, d'ailleurs, de traduire en formule les principes énoncés au début de ce chapitre, et il est évident que, de l'équation ainsi établie, on ne saurait tirer des conclusions différentes de celles auxquelles nous a conduit l'analyse des principes dont elle



serait la traduction. Le seul avantage qu'offrirait la discussion de l'équation elle-même serait de fournir des résultats plus précis, tandis que celle des principes ne peut conduire qu'à des appréciations générales; mais, si l'on considère que l'équation du roulis suppose le navire *infiniment petit* relativement aux ondes, on conçoit aisément que cette précision serait illusoire.

Les savantes recherches qui ont été faites dans cette voie ne sont pas, sans doute, sans offrir un grand intérêt au point de vue spéculatif, mais nous ne pourrions les analyser ici sans sortir des limites que nous nous sommes imposées pour cet ouvrage.

---