

DE L'OSCILLOGRAPHE DOUBLE ET DE SON
EMPLOI POUR L'ÉTUDE DU ROULIS
ET DU TANGAGE.

Par L. E. BERTIN.

[Read, May 31st, 1889.]

I.

Dans les premières tentatives faites pour étudier le roulis et le tangage, l'emploi de la théorie pure a devancé de beaucoup les procédés expérimentaux. Le premier travail un peu complet est le Mémoire de Daniel Bernoulli, couronné en 1757 par l'Académie des Sciences de Paris, qui servit longtemps de base aux leçons professées à l'École française du Génie Maritime. Le cours de M. Reech, de 1840 à 1870 était très supérieur à la théorie de Bernoulli ; les calculs algébriques étaient plus exacts et plus complets, et l'équation intégrée du mouvement semblait donner une solution satisfaisante du problème ; ce cours est resté inédit sauf une insertion tardive dans le *Mémorial du Génie Maritime*, mais, par une coïncidence singulière, toute sa partie mathématique se trouva identiquement donnée dans le Mémoire de M. Froude sur le roulis des navires ; seulement M. Froude rectifiait une erreur importante de D. Bernoulli sur la direction de la poussée, que M. Reech avait laissé subsister.

M. Reech, et après lui M. Froude, n'avaient pu intégrer l'équation du roulis qu'en supposant à la houle un profil sinusoïdal et en négligeant les résistances passives qui agissent sur le navire. L'étude théorique de la houle, en conduisant à une équation différentielle du roulis très différente de celle qu'ils ont intégrée, a permis de constater que les résultats obtenus en supposant la houle sinusoïdale ne peuvent avoir de valeur pratique. Il devenait dès lors indispensable de recourir aux procédés expérimentaux qui seuls, du reste, permettaient d'aborder l'étude très importante du rôle des résistances passives.

Les premiers appareils employés n'étaient pas munis d'enregistreurs. C'était en général de simples viseurs, que l'observateur tenait braqués sur l'horizon en notant leur mouvement angulaire par rapport au navire ; on fit un grand usage de ces viseurs en 1863, dans la première campagne d'essai accompli par une escadre cuirassée. A la même époque j'avais construit un oscillomètre à pendule compensé, espérant que, par une compensation convenable, on parviendrait à éviter les mouvements propres, bien connus, des pendules à bord des navires, et à rester dans la direction de la verticale absolue. Cet appareil fût essayé en escadre concurremment avec les viseurs.

Vers 1867 les appareils enregistreurs firent leur apparition. M. l'Amiral Pâris mit en service son oscillographe à toupie qui fonctionna parfaitement. De mon côté j'adoptais un enregistreur à mon pendule compensé, et l'appareil assez primitif, que j'obtins ainsi, me servit pendant deux ans à bord du *Magenta* et de la *Savoie* ; j'ai publié en 1869 des spécimens des courbes relevées. J'avais pu constater que le principe de la compensation du pendule, dans les limites que je réalisais, ne conduisait à rien de bon ; je m'étais résigné par suite à l'emploi du pendule ordinaire animé d'un mouvement propre ; mais, en étudiant ce mouvement propre, j'avais remarqué qu'il peut être très intéressant d'en obtenir le relevé au point de vue

de l'étude de la houle ; il faut alors combiner les relevés du pendule et ceux d'un instrument donnant la verticale absolue ; tel est le principe de l'oscillographe double, dont l'exposé termine ma première étude de 1869.

Dans les années qui suivirent, j'essayai, de concert avec M. Armand Pâris, fils de l'Amiral, de combiner le pendule et l'appareil à toupie déjà existant pour constituer sans grande dépense, un oscillographe double. Je pensais aussi introduire un pendule dans l'oscillographe à viseur, dont je fis usage en 1872-73 pour l'observation des roulis factices en eau calme et l'étude des résistances passives.

Sur ces entrefaites, M. Froude construisit de toutes pièces un oscillographe double réellement pratique, en revenant, pour marquer la verticale absolue, à un simple pendule compensé, mais en poussant la compensation bien au-delà de ce que j'avais imaginé d'abord et en formant son pendule d'un grand et lourd volant ayant son centre de gravité très près de l'axe de suspension.

En 1872 je fis exécuter, aux frais de la Marine française, l'oscillographe à deux pendules, dont le grand pendule est analogue à celui de Froude, qui a été doté par M. Brequet d'un enregistreur très perfectionné et qui a servi à toutes mes études ultérieures sur les roulis factices en eau calme aussi bien que sur les mouvements des navires à la mer.

I.—DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT.

Les deux organes essentiels sont les deux pendules, dont les périodes sont entre elles dans le rapport de 1 à 320, qui tracent sur les deux feuilles d'une bande de papier les courbes que l'on a ensuite à superposer convenablement pour les analyser en détail. La bande de papier passe devant les traceurs, entraînée par un tambour mu par un ressort spiral, et entraînant à son tour un tambour retenu par un régulateur Foucault qui assure la parfaite uniformité du mouvement. Un électro-aimant combiné avec un chronomètre à contract

4 DE L'OSCILLOGRAPHE DOUBLE ET DE SON EMPLOI

électrique inscrit constamment les demi-secondes sur le papier en regard du tracé des pendules.

Le grand pendule atteint 80s. de période totale d'oscillation, ce qui le rend indifférent à l'effet du roulis, comme on le reconnaît facilement, dans les expériences de roulis factice en eau calme, en comparant ses tracés à ceux obtenus à l'aide d'un viseur. Dans certaines circonstances, il pourrait subir l'action des vagues, car la période relative de celles-ci peut aller jusqu'à l'infini quand elles viennent de l'arrière avec une vitesse peu différente de celle du navire ; mais c'est là un cas fort rare, et à peu près dénué d'intérêt. Accidentellement, le grand pendule prend parfois un mouvement propre, se distinguant toujours en raison de sa période et ne donnant lieu qu'à une correction facile. On peut donc considérer le grand pendule comme toujours vertical et fournissant le tracé exact du roulis absolu.

Un rapprochement s'impose naturellement ici, entre le grand pendule de l'oscillographe et le pendule des séismographes. L'un et l'autre doivent avoir une très longue période afin de ne prendre aucun mouvement propre quand leurs axes de suspension entrent en oscillation ; là s'arrête leur analogie. L'essence du pendule de l'oscillographe est d'être un moment d'inertie, tandis que, celle du pendule du séismographe est d'être une masse ; le centre de gravité du premier se transporte toujours parallèlement à l'axe de suspension, tandis que le centre de gravité du second doit rester immobile. Si le grand pendule de l'oscillographe était un pendule simple, devant à une longueur de un kilomètre et demi sa durée de période de 80s, il serait propre à servir comme séismographe ; composé, comme il l'est, d'un disque équilibré, il ne pourrait absolument mesurer à terre que l'inclinaison du sol si elle se produit. D'un autre part, le séismographe, à bord, ne pourrait rendre de services qu'à la condition d'être amplifié d'une manière colossale, l'amplitude des simples mouvements de translation sur les vagues atteignant plusieurs mètres.

Considérons maintenant le petit pendule dont l'étude est bien autrement compliquée que celle du grand pendule. D'une durée de période totale de 0s.25 ce pendule ne prend jamais aucun mouvement propre présentant sa période particulière, on trouve, seulement, sur sa courbe la trace des trépidations de la machine ; il suit constamment la direction de la résultante de la pesanteur et de la force d'inertie dans le mouvement de translation de son axe de suspension ; c'est la direction de cette résultante par rapport à l'axe du navire qui est enregistrée par son traceur.

Si le petit pendule était simplement entraîné dans le mouvement orbitaire moyen commun au navire et à l'eau soulevée sous forme de vagues, il se tiendrait normal au profil de l'eau ; tel serait le cas d'un pendule fixé sur un bouchon de liège flottant sur la mer. A bord d'un navire, le petit pendule se trouve influencé par le roulis, d'une manière qui dépend à la fois de la *distance* de son point de suspension à l'axe du roulis et de l'accélération angulaire dans le roulis.

L'axe du roulis n'est qu'un axe instantané, dont la position change à chaque instant de l'oscillation. Dans une expérience faite en eau calme sur le transport *le Mytho*, l'oscillographe double a indiqué que l'amplitude du mouvement de cet axe pouvait être évaluée à 1m. 70 ; la position la plus basse correspondant aux points morts.

L'accélération angulaire est produite, en premier lieu, par le couple de stabilité qui est maximum aux points morts du roulis relatif, et en second lieu par le couple des résistances passives qui est nul, en ce qui concerne l'eau, à ces mêmes points morts. De là deux déviations du petit pendule, l'une ψ_1 , nulle à la position d'équilibre et maximum aux points morts du roulis relatif ψ_0 ,* la seconde ψ_2 nulle vers les points morts et maximum aux environs de la position d'équilibre.

* J'appelle roulis relatif le roulis mesuré par rapport à la position d'équilibre hydrostatique du navire sur la houle. Pour un petit navire cette position est située normalement à la houle.

6 DE L'OSCILLOGRAPHE DOUBLE ET DE SON EMPLOI

L'effet, sur les tracés, des déviations ψ_1 et ψ_2 considérées isolément serait le suivant :

- - - - - tracé obtenu
 ——— tracé corrigé des angles ψ_1 .

Fig. 1.

pendule au-dessus de l'axe du roulis aux points morts.

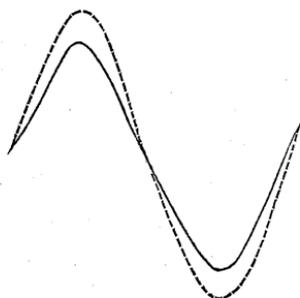
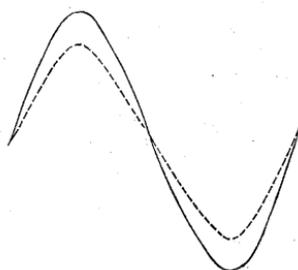


Fig. 2.

pendule au-dessous de l'axe du roulis aux points morts.



- - - - - tracé obtenu
 ——— tracé corrigé des angles ψ_2 .

Fig. 3.

pendule au-dessus de l'axe du roulis au moment de la plus grande vitesse angulaire.

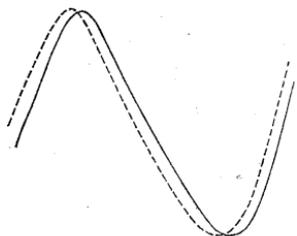
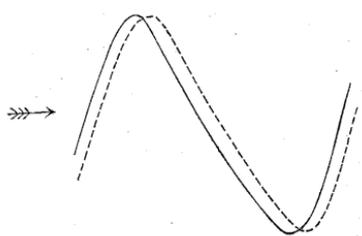


Fig. 4.

pendule au-dessous de l'axe du roulis au moment de la plus grande vitesse angulaire.



En combinant les deux corrections ensemble, on a quatre nouvelles figures.

----- tracé obtenu
 ——— tracé corrigé des angles ψ_1 et ψ_2 .

Fig. 5.

Fig. 6.

Pendule au-dessus de toutes les positions de l'axe du roulis.

Pendule au-dessus de l'axe au point mort, au-dessous au moment de la grande vitesse.

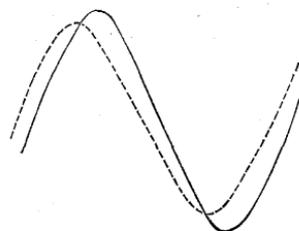
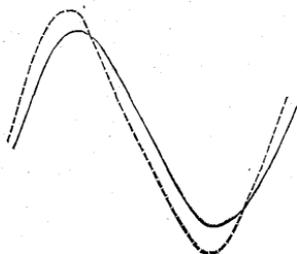
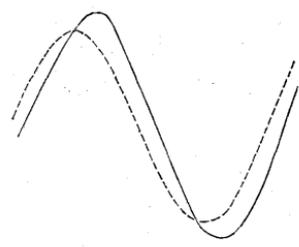
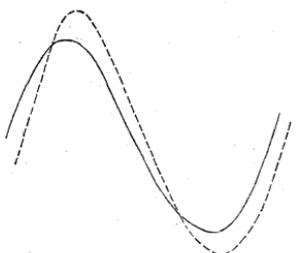


Fig. 7.

Fig. 8.

Pendule au-dessous de l'axe aux points morts, au-dessus au moment de la grande vitesse.

Pendule au-dessous de toutes les positions de l'axe du roulis.



Le cas de la figure 7 peut être laissé de côté, très vraisemblablement; en tous cas, il ne se présentera pas sur les navires auxquels celui de la figure 6 est applicable.

Il ne faut jamais perdre de vue, quand on examine les tracés à la mer, ces quatre dernières figures, sur lesquelles, si l'on considérait le roulis factice en eau calme, le trait pointillé représenterait le tracé du petit pendule et le trait plein celui du grand pendule.

On est loin, comme on le voit, de la simplicité des tracés rêvée en 1869. Cependant il est rare que l'on ne parvienne assez facilement, par le rapprochement du tracé des deux

8 DE L'OSCILLOGRAPHE DOUBLE ET DE SON EMPLOI

pendules, à distinguer dans leurs écarts une période qui est la période des vagues. Cette période apparaît nettement aux instants où l'amplitude ψ_0 du roulis relatif est faible et où, par conséquent, les déviations ψ_1 et ψ_2 du petit pendule s'annulent. Dans le cas d'un navire marchant à la voile, bien appuyé par sa voilure et ne roulant pas, la courbe du grand pendule est à peu près une ligne droite, autour de laquelle la courbe du petit pendule dessine la succession des vagues. En mesurant, sur les courbes relevées à la mer, leurs écarts aux points morts et aux positions d'équilibre dans le roulis relatif, et en ayant soin de prendre les moyennes sur un très grand nombre de roulis, afin d'écarter l'effet des vagues, on peut obtenir une valeur approchée des angles ψ_1 et ψ_2 , et étudier la loi suivant laquelle ils dépendent de ψ_0 , étude qui a son intérêt propre.

II.—ÉTUDE DU ROULIS.

Si on examine simplement les deux courbes tracées prises isolément, on y trouve la représentation du roulis lui-même, et on voit, tout d'abord, comment, dans les circonstances habituelles, avec une période relative des vagues $2T_r$, différente de la période du roulis $2T_n'$, les roulis se succèdent, en conservant une durée assez constante mais en formant des séries d'oscillations à amplitude successivement croissante et décroissante. Au point de vue de la régularité du mouvement pendulaire, deux circonstances sont à distinguer. Dans le cas, assez habituel, où la période des vagues est inférieure à celle du roulis, le navire ne peut pas suivre sa position d'équilibre hydrostatique et il entre en oscillation autour de la verticale; c'est alors le tracé du grand pendule qui présente des ondulations isochrones et régulières. Dans le cas, beaucoup plus rare, où la période des vagues dépasse celle du roulis, le bâtiment oscille autour de sa position d'équilibre hydrostatique; le tracé du petit pendule représente alors un mouvement simple et régulier, tandis que le grand pendule enregistre la superposition des deux mouvements du navire et de la lame; l'instru-

ment n'a rencontré qu'une seule fois ce dernier mouvement d'une manière nettement marquée ; c'était à bord de *l'Annamite* recevant la houle presque de l'arrière.

Lorsque les deux mouvements de la houle et du roulis sont synchrones, le bâtiment doit s'arrêter à une amplitude constante qu'il conserve pendant des séries prolongées d'oscillations. Les tracés vérifient bien cette conclusion du raisonnement et du calcul ; ils vérifient également que l'amplitude constante d'une série de roulis est susceptible de présenter deux valeurs très-différentes selon que les points morts du roulis correspondent, soit aux sommets et au creux des vagues, soit aux points d'inflexion ; ils permettent enfin de reconnaître que l'amplitude maximum est sensiblement celle qui peut se calculer à l'aide du coefficient d'écclisité mesuré dans les roulis factices en eau calme.

Avec un oscillographe sur lequel la mesure des temps a été portée à une grande perfection, il était facile de bien approfondir tout ce qui est relatif à la durée des roulis. Tout d'abord, on a pu constater combien généralement est exacte, et dans quelles limites est exacte, la loi de l'isochronisme des roulis à la mer, sur laquelle il avait été beaucoup discuté. Cette loi n'est jamais applicable aux petits mouvements, et on pourrait prévoir d'avance que la période ne pouvait avoir de fixité quand l'amplitude ϕ_0 ne dépasse pas notablement l'accroissement $\Delta\phi_0$, synchrone avec la vague, qui est produit par le passage d'une seule vague. Sur une grosse mer, les roulis de *l'Annamite* n'ont été isochrones qu'au-dessus de 8° de demi-amplitude. De plus la période constante $2T_n$ n'est pas la même qu'en eau calme ; elle varie d'un jour à l'autre selon l'état du temps, et elle va en diminuant, en premier lieu, à mesure que l'intensité du vent augmente, et, en second lieu, par les jours de grand vent, à mesure que l'amplitude du roulis est plus forte ; cette observation a été faite à bord du transport *l'Annamite* bâtiment muni d'une assez forte mâture, sur lequel la demi-période, qui était de 6s. 88 en eau calme, est descen-

due à 5s. 88 par brise No. 5, pour les amplitudes totales de 25°. Sur un navire offrant moins de prise au vent, l'effet aurait naturellement été moins prononcé.

L'étude détaillée des tracés m'a montré autrefois cette diminution bien certaine que subit la période à la suite de tout accroissement d'intensité du vent ou d'amplitude du roulis, comme intimement connexe à une différence de durée qui s'établit en même temps entre le roulis simple contre le vent et le roulis simple dans le sens du vent; c'est sur le roulis contre le vent que porterait toute la diminution de durée, le roulis dans le sens du vent devenant au contraire un peu plus lent.

Il est assez vraisemblable que, le vent et l'amplitude diminuant tous deux de période, leur effet accumulé doit rendre surtout brefs les roulis contre le vent; toutefois je ne voudrais pas reproduire les chiffres que j'ai donnés à ce sujet sans avoir revu auparavant les tracés et les corrections qu'ils ont eu à subir pour être dégagés de l'effet de la bande. La moindre erreur dans les corrections est de nature, en effet, à fausser le rapport entre les durées apparentes des oscillations complètes exécutées, soit vers un bord, soit vers l'autre, quand le tracé se trouve reporté vers l'un des bords du papier et ses ondulations conclues d'une manière sensible par rapport à l'axe du papier.

III.—ÉTUDE DU TANGAGE.

L'étude du tangage des navires n'avait pas même été ébauchée, avant les observations faites avec l'oscillographe, de telle sorte que l'indication des données, sans doute encore incomplètes, obtenues avec cet instrument, constitue la totalité des connaissances actuelles sur les lois du tangage à la mer. Réciproquement, l'exposé de ce que l'on connaît sur le tangage sera en même temps l'exposé de ce que l'oscillographe a fait connaître; c'est cet exposé que je vais donner sommairement.

Le tangage diffère profondément du roulis; au lieu de se composer principalement d'une oscillation propre du navire

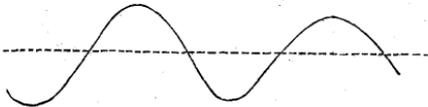
se déplaçant comme un pendule, soit autour de la verticale, soit autour de sa position d'équilibre, il est, en général, constitué simplement par le mouvement du navire à la poursuite de sa position d'équilibre.

Le tangage dépend donc de l'amplitude et de la période du mouvement angulaire de la position d'équilibre hydrostatique du navire sur la houle.

L'amplitude totale du mouvement de la position d'équilibre qui serait égale au double de l'inclinaison de la vague pour un petit flotteur, est réduite pour le tangage des navires, dans une beaucoup plus grande proportion que pour leur roulis, en raison de la portion beaucoup plus grande d'une vague occupée par le navire dans le sens longitudinal. Les dimensions absolues du bâtiment ont donc une grande influence sur le tangage. Tout accroissement de longueur du navire équivant à une diminution de l'inclinaison des vagues.

La période du mouvement de la position d'équilibre, qui n'est autre que la période relative des vagues par rapport au navire en marche, dépend de deux éléments, la période réelle et le mouvement propre du navire. Dans le tangage, mer debout, qui est toujours le plus important à considérer la période diminue rapidement à mesure que la vitesse du navire augmente.

Quand l'amplitude est suffisamment petite et la période suffisamment longue, le bâtiment suit très exactement sa position d'équilibre hydrostatique, ou, du moins, le léger écart nécessaire pour mettre en jeu la stabilité longitudinale et la résistance de l'eau qui combinent leur action aux effets du mouvement orbitaire de l'eau pour lui faire suivre cette direction variable, est assez faible pour échapper à l'enregistrement de l'oscillographe.

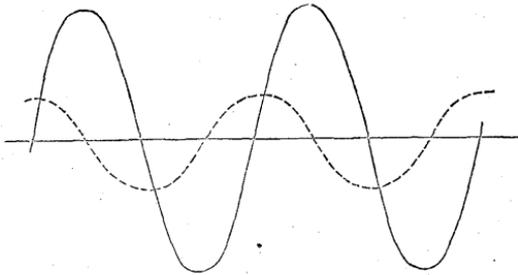


Le petit pendule trace alors sur la papier une ligne exacte-

ment droite, autour de laquelle le grand pendule dessine le mouvement absolu du navire. Il est à remarquer que, dans ce cas, les deux angles ψ_1 , et ψ_2 qui altèrent le tracé du petit pendule, dans le tangage comme dans le roulis, sont nuls l'un et l'autre ; c'est donc quand il trace une ligne droite que le petit pendule doit enregistrer le plus fidèlement le mouvement relatif du navire par rapport à sa position d'équilibre.

Lorsque, partant du cas précédent qui représente le minimum de tangage possible, on rencontre une augmentation soit dans l'amplitude soit dans la rapidité du mouvement de la position d'équilibre hydrostatique, la loi du tangage change ; le mouvement du navire reste synchrone avec celui de la position d'équilibre, mais il y a un angle de retard, du navire resté en arrière de cette position, qui constitue un véritable tangage relatif.

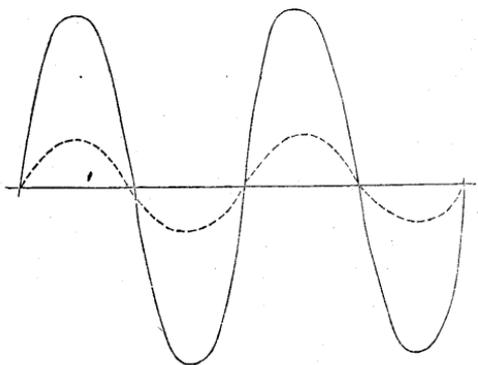
Tout d'abord le retard ne se manifeste qu'au moment où la vitesse angulaire de la position d'équilibre est la plus grande, c'est-à-dire sur les sommets et dans les creux des vagues ; le relevé obtenu présente alors la disposition ci-dessous.



Dans ce cas, l'amplitude totale du tangage n'est pas sensiblement accrue ; le moment où l'inclinaison maximum est atteinte se trouve seulement un peu retardé, et la dénivellation de l'eau le long du bord se trouve ainsi augmentée. Le fait que le navire n'atteint son inclinaison maximum qu'après avoir dépassé le point d'inflexion des vagues revient à dire qu'au moment de l'inclinaison maximum, le point d'inflexion des

vagues est sur l'arrière du milieu du navire ; il résulte de là que les dénivellations doivent être moins grandes à l'arrière qu'à l'avant ; d'autres causes se combinent sans doute à la précédente pour produire cette différence des dénivellations, qui existe en toutes circonstances, même quand le navire est plus long que la houle.

Si l'amplitude des oscillations de la houle ou leur rapidité continuent à s'accroître, le retard du navire sur sa position d'équilibre continue à augmenter, et on rencontre, sur les courbes, des circonstances où l'amplitude maximum du tan-



gage relatif correspond au maximum du tangage absolu, de telle sorte que l'amplitude du tangage relatif s'est ajoutée toute entière à celle de l'oscillation d'équilibre pour produire le tangage absolu. Dans ce cas, le maximum du tangage relatif étant atteint sur les sommets et dans les creux, on se trouve exposé, dans le creux des lames, à embarquer beaucoup d'eau à l'avant, ou, comme on dit, à entrer dans la lame.

Le tangage, mer de l'arrière, a lieu simplement suivant la position d'équilibre hydrostatique ; tel est du moins le mouvement principal. Sur les courbes relevées, on discerne quelquefois un mouvement très vif et de très petite amplitude qui semble être une sorte de tangage propre exécuté autour de la position d'équilibre.

IV.—ETUDE DES VAGUES.

La combinaison des deux pendules qui constitue l'oscillographe double a tout d'abord été imaginée en vue de la mesure des vagues. Nous avons rencontré tout à l'heure deux cas dans lesquels cette mesure limitée, bien entendu, à la période se trouve faite par les tracés d'une manière à la fois très claire et très exacte, savoir :

1°. Avec l'appareil orienté au roulis sur un navire appuyé par sa voilure. Le grand pendule trace alors une ligne droite et le petit pendule inscrit les vagues successives avec leurs périodes exactes et leurs inclinaisons relatives.

2°. Avec l'appareil orienté au tangage quand la mer vient de l'arrière ou qu'elle vient de l'avant assez lentement pour que le navire suive sa position d'équilibre sans aucun roulis relatif. C'est dans ces circonstances que l'instrument a fourni les plus longs relevés de la surface de la mer, et qu'il a permis d'étudier la manière dont les vagues se suivent tantôt d'une manière régulière, tantôt avec les variations de hauteur et de vitesse qui résultent de la superposition de mouvements simples de vitesse différentes. Dans les circonstances les plus ordinaires, c'est à dire quand l'appareil est employé à relever des roulis de grandes amplitudes, on ne peut, sur les tracés, reconnaître la période des vagues que dans les instants de repos qui séparent la fin d'une série décroissante de commencement d'une série croissante de roulis. Quand le roulis a une grande amplitude l'écart des deux courbes représente les deux deviations ψ_1 et ψ_2 , dont nous avons parlé, superposées à l'inclinaison de la houle, et on ne pourrait les en séparer que par une correction difficile, d'une précision douteuse.

On n'obtient avec l'instrument que la période de la houle relative au navire en marche ; si on veut en déduire la période réelle, il faut relever directement l'angle de la direction de la houle avec l'axe du navire, et la vitesse du bâtiment.

Du reste il importe d'ajouter toujours à la mesure de la

période donnée par l'appareil, la mesure directe qu'il est facile de faire de cette période et, de plus, une évaluation de la longueur des lames que l'on corrigera ensuite, à l'aide de la période, en appliquant une formule théorique, que l'expérience vérifie toujours.

