CHAPITRE III

DES EFFETS DU MOUVEMENT DU NAVIRE SUR LE PERSONNEL ET LE MATÉRIEL EMBARQUÉS

% 1. — De la pesanteur apparente sur les véhicules en mouvement.

Nous commencerons, dans ce paragraphe, par analyser à un point de vue général les effets du mouvement d'un véhicule quelconque sur les corps qu'il entraîne, et plus particulièrement sur les corps suspendus et sur les liquides. Les positions affectées par ces corps pendant le mouvement offrent une telle analogie avec celles qu'ils affectent pendant le repos, que l'observateur, entraîné par le véhicule, est instinctivement porté à admettre que les pendules entraînés restent verticaux et les niveaux líquides horizontaux, et à prendre les indications d'instruments de cette nature comme repères pour apprécier les inclinaisons pendant le mouvement; il est d'autant plus indispensable de prévenir cette illusion, que, ainsi qu'on va le voir, les écarts entre la verticale vraie et la direction commune des pendules et des niveaux liquides peuvent être considérables, même pour des mouvements relativement doux du véhicule.

Nous supposerons dans tout ce qui suit que les masses des objets entraînés sont assez faibles pour que les mouvements du véhicule ne soient pas influencés par leurs changements de position et par leurs mouvements. Définitions. — Nous appellerons Accélération apparente de la pesanteur en un point A (fig. 132) d'un véhicule en mouve-

ment la résultante γ de l'accélération vraie g de la pesanteur et d'une accélération — w égale et contraire à celle dont le point considéré est animé ; la Verticale apparente sera la direction de cette résultante, et le Poids apparent d'un point matériel entraîné par le véhicule sera une force π dirigée suivant l'accélération apparente de la pesanteur au point du véhicule où se trouve le point matériel, et égale au produit de cette accélération par la masse.

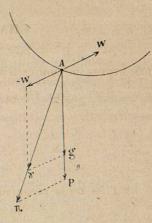


Fig 132.

Théorème. — Lorsqu'un point matériel est entrainé dans l'espace par des liens ou des appuis, la résultante des réactions qu'il

exerce sur les liens ou appuis, à un instant quelconque, est une force dirigée suivant la résultante de l'accélération de la pesanteur et d'une accélération égale et contraire à celle dont il est animé à cet instant, et égale au produit de cette résultante par sa masse.

Soient en effet (fig. 133) M le point matériel de masse m, w son accélération totale, P son poids et L la résultante de l'action des liens ou des appuis sur le corps; le point M ayant pour accélération w, la résultante des forces qui le sollicitent



Fig. 133.

sera une force F, dirigée suivant w, et égale à mw; les forces

P et L ont donc F pour résultante, et, par conséquent, la force — F égale et contraire à F fait équilibre aux deux autres.

Mais les forces L, P, — F se faisant équilibre, deux quelconques d'entre elles ont pour résultante une force égale et contraire à la troisième; donc les forces P et — F ont pour résultante une force π égale et contraire à l'action des liens, c'est-à-dire égale à la réaction du point matériel sur ses liens; et, comme l'on a d'ailleurs F = mw, et P = mg, on aura en désignant par γ la résultante de g et de — w:

 $\pi = m\gamma$.

Conséquence I. — Lorsqu'un point matériel est fixé d'une manière invariable en un point du véhicule, la réaction qu'il exerce sur ses liens, ou sur son appui, est égale à son Poids apparent, puisqu'alors l'accélération du point matériel est la même que celle du point du véhicule auquel il est fixé.

Conséquence II. — Lorsqu'un corps très petit, une balle de plomb par exemple, est suspendu par un fil à un clou d'un véhicule, le fil est évidemment orienté à chaque instant suivant la direction de la réaction que la balle exerce sur le clou; or, si le fil est suffisamment court, on remarque qu'en général, sauf aux moments de troubles passagers résultant d'une secousse du véhicule, la balle prend un mouvement relatif très faible; il est clair que, dans ces instants, l'accélération de la balle diffère très peu de celle du clou de suspension, par conséquent la réaction du corps sur le fil sera sensiblement égale au Poids apparent qu'il aurait s'il était fixé directement au clou. Donc, dans les moments de tranquillité relative, les fils de suspension des courts pendules entraînés par un véhicule indiquent sensiblement la direction de la verticale apparente.

Conséquence III. — Lorsque, en un point du véhicule, on place un petit vase plein d'eau, on remarque que, sauf aux moments de troubles passagers dont nous avons déjà parlé,

la surface libre du liquide reste sensiblement plane et se meut avec une très grande lenteur dans le vase; par conséquent, à ces instants de tranquillité relative, l'accélération des molécules de la surface libre diffère très peu de l'accélération du point du véhicule auquel est placé le vase, la réaction d'une molécule de la surface libre sur les molécules qui l'entourent est donc sensiblement égale à son Poids apparent. Or la réaction d'une molécule sur celles qui l'entourent est égale et contraire à la poussée, et l'on sait que, sur les molécules superficielles la poussée est normale à la surface libre; donc la surface libre d'un liquide enfermé dans un petit vase est sensiblement normale à la Verticale apparente.

Conséquence IV. — Quel que soit le mouvement dont le véhicule est animé, les accélérations de ses différents points au même instant varient d'une manière continue en passant d'un point à un autre; par conséquent on peut toujours tracer autour d'un point donné une région suffisamment petite pour que ces accélérations diffèrent d'une quantité négligeable; il est clair que, pour tous les points compris dans cette région, l'accélération de la pesanteur apparente sera sensiblement constante. Par conséquent, si l'on place dans cette région plusieurs petits pendules et plusieurs niveaux à liquide, ces objets indiqueront constamment une direction commune pendant le mouvement comme au repos, mais cette direction sera celle de la Verticale apparente.

Si, sur les fils de suspension des pendules, on interposait des dynamomètres, ces instruments marqueraient les Poids apparents ; ces poids seraient encore proportionnels aux masses au même instant, puisque l'accélération γ de la pesanteur apparente serait la même pour chacun d'eux.

Conséquence V. — Si, en un point du véhicule, on suspend un baromètre à mercure, la colonne barométrique oscillera sans cesse avec les variations du poids apparent; car la pression de la colonne mercurielle, sur une tranche prise à la hauteur du niveau dans la cuvette, doit faire équilibre à la pression atmosphérique qui reste constante; mais le baromètre suspendu se range suivant la verticale apparente et la pression de la colonne de mercure sur sa base est égale au poids apparent du liquide, c'est-à-dire au produit $m\gamma$ de la masse par l'accélération apparente de la pesanteur; lors donc que γ sera plus petit que g, la masse de mercure devra être plus grande que celle qui indiquerait la pression atmosphérique au repos et inversement; par conséquent la hauteur barométrique sera trop grande quand l'accélération sera descendante, et sera trop petite lorsque l'accélération sera ascendante.

Conséquence VI. — Si un point matériel repose sur un plan fixé au véhicule, il s'échappera en glissant lorsque la projection du poids apparent sur le plan d'appui sera plus grande que le frottement au départ; cette composante ne dépend que de l'angle formé par le plan avec la verticale apparente et non de la pente vraie du plan qui peut être inverse, comme on le verra dans certains exemples cités plus loin; il pourra donc arriver que le corps glisse en remontant la pente vraie du plan, mais le mouvement aura toujours lieu dans le sens de la pente apparente qui serait révélée par les niveaux et les pendules.

Conséquence VII. — On remarquera enfin que, si, à un clou du véhicule, on suspend un plateau par une courte suspension et de telle manière qu'au repos sa surface soit horizontale, cette surface sera à tout instant perpendiculaire à la verticale apparente; par conséquent, sauf dans les moments de trouble, un corps posé sur ce plateau s'y maintiendra sans glisser et le liquide contenu dans un verre reposant sur lui aura sa surface libre parallèle au plateau et restera ainsi relativement aussi tranquille qu'au repos.

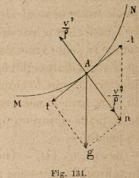
Résumé. — On voit en résume qu'un observateur entraîné par un véhicule en mouvement verra tous les objets qui l'entourent se comporter à tout instant relativement à la verticale apparente comme, pendant le repos, ils se comportent relativement à la verticale vraie; il sera donc naturellement induit à prendre cette verticale pour repère dans la mesure

des inclinaisons; il nous reste maintenant à donner une idée de l'importance des erreurs auxquelles on serait conduit en agissant ainsi, c'est-à-dire de la grandeur des écarts que peut prendre la verticale apparente relativement à la verticale vraie.

§ 2. — Applications à divers exemples.

Véhicule tombant de son propre poids le long d'une ligne courbe quelconque. — Si le véhicule A (fig. 134) est

abandonné le long d'une ligne courbe quelconque MN à l'action de la pesanteur, son accélération tangentielle à tout instant est égale à la composante tangentielle t de l'accélération g de la pesanteur; son accélération centripète est égale à $\frac{v^2}{\xi}$, v étant la vitesse et ξ le rayon de courbure de la trajectoire en A. Pour obtenir l'accélération apparente de la pesanteur, il faudra com-



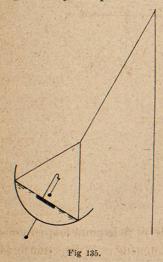
poser l'accélération g avec les deux accélérations — t et $-\frac{v^2}{\varrho}$; mais la résultante de g et de — t est évidemment la composante normale de g, par conséquent l'accélération apparente γ est la résultante de la composante normale n et de l'accélération centrifuge — $\frac{v^2}{\varrho}$; ces deux accélérations étant normales à la courbe, il en sera de même de leur résultante.

Le poids apparent d'un corps entraîné par le point A sera donc la résultante de la composante normale de son poids vrai et de la force centrifuge. Toutefois, si le glissement du véhicule engendrait un frottement, l'accélération tangentielle serait un peu moindre que la projection de g; par

conséquent, la direction de la pesanteur apparente en serait affectée.

Wagon glissant ou roulant sur une pente. — Il résulte de ce qui précède que, si l'on fait abstraction du frottement, la verticale apparente des pendules courts et des niveaux à liquides sera perpendiculaire à la pente sur laquelle glisse le wagon; toutefois, à cause du frottement, eile sera toujours située entre cette direction et la verticale vraie et d'autant plus près de celle-ci que le frottement sera plus intense. Si le frottement, pendant le mouvement, avait une intensité égale à la projection tangentielle du poids, le mouvement deviendrait uniforme et la verticale apparente coïnciderait avec la verticale vraie.

Lentille d'un pendule simple. — La lentille d'un pendule simple en mouvement se meut sur un cercle ou sur une sphère ayant pour centre le



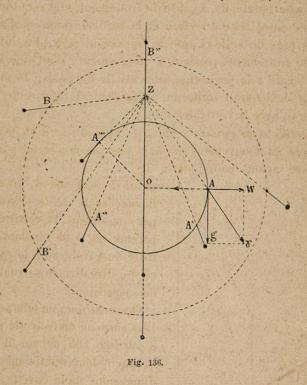
point de suspension, sous l'influence seule de la pesanteur; par conséquent, la verticale apparente est, à tout instant, normale au cercle ou à la sphère, c'est-à-dire dirigée suivant le fil de suspension.

On remarque, en effet, que si l'on suspend une cuvette pleine d'eau (fig. 135) par un fil suffisamment long relativement aux dimensions de la cuvette, l'eau reste dans les mêmes marques qu'au repos lorsqu'ou laisse osciller le système librement, et

cela, quelle que soit l'amplitude des oscillations.

Si l'on attache un pendule très court au fond de la cuvette, on voit le fil de ce pendule rester rigoureusement parallèle au fil de suspension pendant tout le mouvement; enfin, si l'on fait flotter sur l'eau de la cuvette un petit plateau portant un court pendule, on voit ce pendule rester, comme la figure l'indique, normal à son plateau, c'est-à-dire à la surface libre du liquide.

Véhicule animé d'un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe horizontal. — Soit O (fig. 136) l'axe fixe



autour duquel tourne le véhicule et A le point auquel nous nous proposons de déterminer l'intensité et la direction de la pesanteur apparente; désignons par r la distance du point A à l'axe O et par ω la vitesse angulaire de rotation.

Le point A tournant d'un mouvement uniforme, son accélération est dirigée à tout instant suivant AO et a pour intensité $\omega^2 r$; l'accélération apparente de la pesanteur est donc dirigée suivant la résultante γ de g et d'une accélération cen-

trifuge w dont la valeur est $\omega^2 r$. Mais le triangle ZOA est semblable au triangle $Aw\gamma$, et l'on a :

$$0Z = 0A \cdot \frac{W\gamma}{AW} = r \cdot \frac{g}{\omega^2 z} = \frac{g}{\omega^2}.$$

Donc le point Z, où la verticale apparente coupe la verticale menée par l'axe de rotation, est fixe pendant le mouvement et indépendant de la position du point A sur le véhicule. Ce point est donc une sorte de zénith apparent vers lequel convergent les verticales apparentes en tous les points du véhicule, et à tous les instants. (Poncelet, Méc. appl., 2° vol., p. 177.)

Si l'on attache un petit pendule, ou un verre contenant une petite quantité de liquide, en un point A du véhicule, la lentille du pendule viendra se ranger suivant la direction AZ et à l'opposé du point Z, et le liquide présentera sa surface libre normalement à cette direction; si le verre était suspendu, le liquide y resterait relativement immobile, parce que le verre se placerait lui-même à tout instant dans la position d'équilibre correspondant à la verticale apparente (Conséquence VII).

Si la distance du point A considéré à l'axe O est plus petite que OZ, c'est-à-dire que $\frac{g}{\omega^2}$, la verticale apparente oscillera de chaque côté de la verticale vraie; les écarts maxima correspondront aux positions telles que A''', leurs valeurs ε seront données par la formule

$$\sin \varepsilon = \frac{\mathrm{OA'''}}{\mathrm{OZ}} = \frac{\omega^2 r}{g}$$

ou, en désignant par T la durée d'une révolution,

$$\sin \varepsilon = \frac{4r}{T^2} \cdot \frac{\pi^2}{g}.$$

On trouve, avec cette formule, pour une roue d'un mètre de

rayon et pour diverses valeurs de T les écarts maxima suivants:

on voit donc que, même pour des mouvements d'une extrême douceur, les écarts de la verticale apparente atteignent des valeurs sensibles.

Pour $T=2^s$ on trouverait $\sin\epsilon=1$; mais alors la circonférence passerait par le zénith apparent, et la direction de la verticale apparente changerait brusquement en ce point de 180° ; il y aurait donc discontinuité dans le mouvement, et par conséquent il se produirait des troubles passagers.

Pour des valeurs de T plus petites que 2^s, la trajectoire passerait au-dessus du zénith apparent, et la verticale apparente serait dirigée de bas en haut, au moment du passage au-dessus du centre O; à cet instant, un verre suspendu contenant du liquide se présenterait renversé l'ouverture en bas et le liquide n'en serait pas moins en équilibre dans les mêmes marques qu'au repos; toutefois, si l'on voulait vérifier expérimentalement cette propriété, il faudrait donner une rotation assez rapide, de manière que le point Z fût assez près du centre O pour qu'il n'y ait pas de changement trop rapide dans la direction de la verticale apparente.

La distance du point Z au-dessus de l'axe O est égale à :

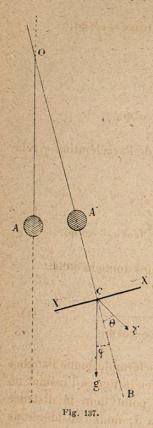
$$\frac{g}{\omega^2} = \frac{g T^2}{4\pi^5}.$$

On obtient ainsi, pour diverses valeurs de T,

T (en secondes) 1
$$\frac{1}{2}$$
 $\frac{1}{4}$ $0Z = \frac{g}{\omega^2}$ (en mètres). . . 0,250 0,063 0,016.

Le véhicule est la tige d'un pendule simple. — Nous avons déjà vu plus haut qu'à la lentille d'un pendule simple, oscil-

lant librement, la pesanteur apparente était parallèle à la tige; par conséquent, en ce point, l'écart de la verticale ap-



parente, relativement à la verticale vraie, est précisément égal à l'inclinaison de la tige elle-même. Supposons actuellement la tige rigide et prolongée au delà de la lentille, et cherchons quelle sera la direction de la verticale apparente en un point quelconque de sa longueur.

Notations. — $\varphi = AOA'$; l = OA, longueur du pendule; d = OC. $\Phi = maximum$ de φ , $\theta = BC\gamma$, angle de la verticale apparente avec la tige, compté positivement du côté opposé à la verticale vraie; t = accélération tangentielle du point C; n = accélération centripète du même point; $\gamma = accélération$ apparente de la pesanteur en C.

L'accélération γ est la résultante de l'accélération g dirigée suivant Cg et d'une accélération égale et contraire à celle au mouvement du point C; les composantes de γ suivant CX et CB sont donc égales

aux sommes des composantes de ces deux accélérations suivant ces axes.

Mais l'accélération tangentielle t est dirigée suivant $\mathbf{CX'}$ et a pour valeur, en prenant \mathbf{CX} pour direction positive :

$$t = +d \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

l'accélération centripète n est dirigée suivant CO et a pour valeur, en prenant CB comme direction positive :

$$n = -d \cdot \frac{d \varphi^2}{d t^2};$$

d'ailleurs, les équations différentielles du mouvement du pendule simple sont

$$\frac{d^3\varphi}{dt^2} = -\frac{g}{l}\sin\varphi, \qquad \frac{d\varphi^2}{dt^2} = \frac{2g}{l}(\cos\varphi - \cos\Phi);$$

on a donc:

$$t = -g \frac{d}{l} \sin \varphi$$

$$n = -2g \frac{d}{l} (\cos \varphi - \cos \Phi).$$

Par conséquent, les composantes de l'accélération γ relativement aux axes CX et CB sont

suivant CX ···
$$-g \sin \varphi + g \frac{d}{l} \sin \varphi$$

suivant CB ··· $+g \cos \varphi + 2g \frac{d}{l} (\cos \varphi - \cos \Phi)$.

Le quotient de ces deux composantes donnera enfin :

$$tg \theta = \frac{\frac{d-l}{l} \sin \varphi}{\cos \varphi + 2 \frac{d}{l} (\cos \varphi - \cos \Phi)}.$$
 (1)

Discussion de la formule (1).— Cette formule donne l'angle θ formé par la verticale apparente avec la tige, à l'instant où l'inclinaison est égale à φ , et au point dont la distance au point de suspension est égale à d; nous considérerons d'abord les points de la tige compris au-dessous de l'axe O, nous verrons plus loin ce qui se passera pour les points situés au-dessus sur le prolongement de la tige.

1° Si d>l, l'angle θ est positif, par conséquent la verticale apparente $C\gamma$ est dirigée en dehors de la tige, comme l'indique la figure.

 2° Si d=l, on a à tout instant $\theta=0$, c'est-à-dire que la direction de la verticale apparente coïncide avec celle de la tige pendant tout le mouvement, c'est ce que nous avons déjà trouvé plus haut.