

Fig. 61. Schéma de principe d'un gyroscope stabilisateur de navire.

des axes perpendiculaires. Le cadre lui-même est monté tournant autour d'un axe horizontal dans l'ossature du navire (fig. 61). L'axe du cadre se trouve parallèle à l'axe transversal du navire. Soit un navire effectuant un roulis par forte mer, c.à.d. exécutant des oscillations autour de l'axe longitudinal, le gyroscope oppose à ce mouvement une grande résistance (couple de précession), en ne cédant, en effet, pas directement au couple du roulis mais en cherchant à y échapper verticalement. Par conséquent, il en résulte que le mouvement de roulis devient plus faible que sur un navire non stabilisé par un gyroscope, et d'autre part que le gyroscope va commencer par suite des mouvements du roulis à osciller lui-même autour de l'axe du cadre. Ces oscillations sont réduites par des freins fixés sur le cadre, lesquels absorbent de l'énergie du système et amortissent ainsi le roulis.

Une expérience visualise le mode de fonctionnement du gyroscope à roulis. A cet effet, nous disposons le modèle de façon que l'axe du cadre extérieur devienne horizontal (fig. 62). Nous apposons sur un côté de l'axe du gyroscope et sur le cadre intérieur un petit poids additionnel (N°1). Le gyroscope à roulis reçoit par là un couple de gravité de sorte que le cadre intérieur se met en position d'équilibre verticale. Ce cadre remplace, dans ce cas, le cadre gyroscopique de la figure 61 tandis que le cadre extérieur représente le navire. Pour rendre la visualisation encore plus claire, nous fixons sur les deux points de suspension de l'axe intérieur à Cardan du cadre extérieur, les deux aiguilles indicatrices 7 et 8 dont les traits blancs indiquent, à ce moment, la position du pont du navire. Les forces transmises sur le navire par la houle sont produites dans l'expérience sur le modèle par des ressorts, qui sont accrochés entre les tiges montantes du châssis et le cadre extérieur. Nous utilisons, dans ce but, la plus faible des paires de ressorts (N°4). La figure 62 montre l'appareil prêt pour l'expérience.

Nous allons maintenant montrer par une expérience préliminaire comment le navire peut être attisé, le gyroscope étant à l'arrêt, par des oscillations de roulis d'amplitude importante lors d'une houle. Pour cette expérience l'appareil est pris en main et on exécute les mouvements de basculement de part et de l'axe du cadre extérieur

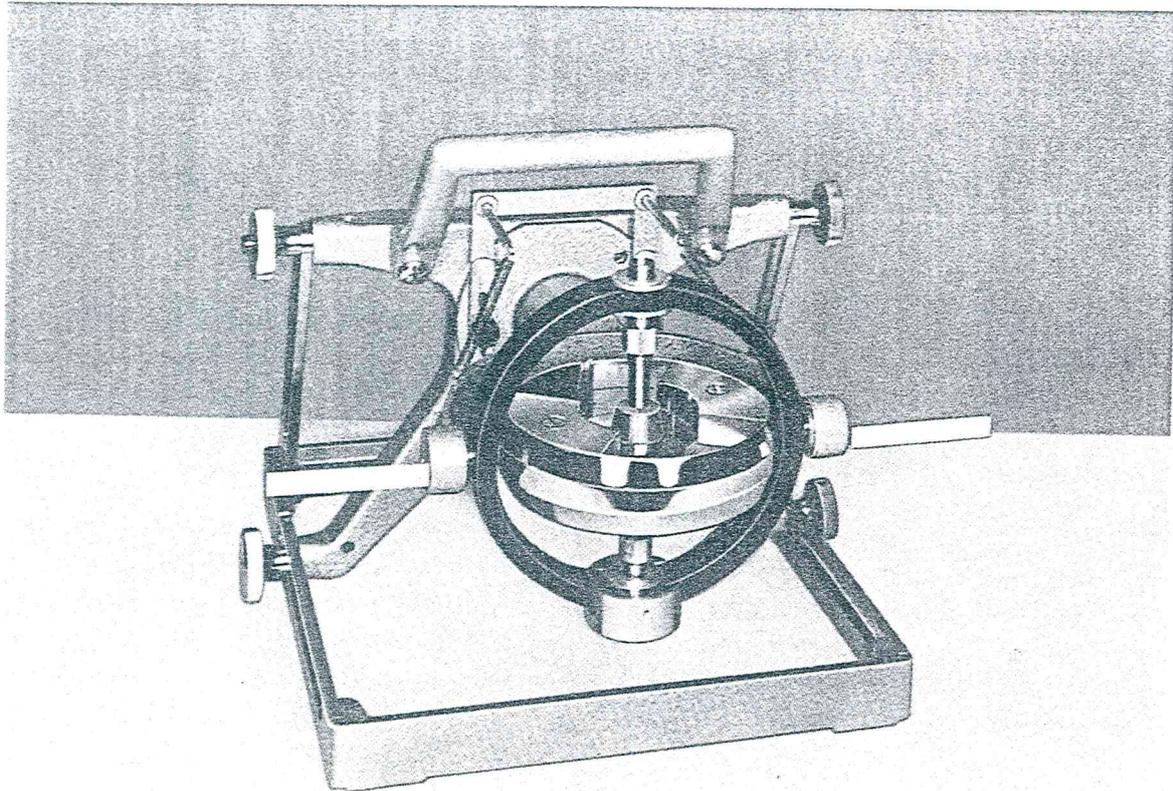


Fig. 62. Modèle de démonstration simulant le gyroscope de navire.

(qui dans ce cas est en position verticale!). Le socle représente à ce moment d'une certaine manière l'eau agitée par la houle. Les forces, respectivement les couples, transmis par les vagues sur le navire sont simulées dans notre cas par les forces exercées par les ressorts. Suivant la fréquence de la houle (donc des oscillations du socle) on obtient des oscillations plus ou moins grandes du navire. Pour des fréquences très élevées (mer scintillante) le navire ne subit, en pratique aucune influence. Pour de très petites fréquences (houle longue) le navire accompagne essentiellement les positions inclinées du système d'eau. Entre ces deux, il existe, toutefois, une plage de fréquence pour laquelle le navire entre en résonance. A cause de la concordance de la fréquence propre du navire et de la fréquence de la houle, il y a formation d'oscillations particulièrement grandes. Malgré que le socle n'effectue que des mouvements très faibles, à peine visible, le navire (le cadre extérieur) tangue avec de fortes amplitudes.

Pour montrer le mode de fonctionnement du gyroscope, nous exécutons le même expérience avec le gyroscope en marche. Pour ce faire on lance d'abord le gyroscope. On reprend ensuite l'appareil en main et on fait osciller le socle comme dans l'expérience précédente. On constate que le navire (le cadre extérieur) reste pratiquement immobile pour toute fréquence de la houle, même pour celle où dans

le cas précédent il y avait résonance. En exécutant cette expérience, il faut veiller à exécuter des mouvements réguliers du socle. Il faut avant tout que l'amplitude des mouvements du socle soit identique de part et d'autre, car autrement il se produirait peu à peu des déviations du cadre extérieur, surtout en basse fréquence, qui risquent de perturber l'expérience. Si le cadre extérieur a déjà dévié, on peut compenser cette erreur en faisant agir un couple approprié (inclinaison unilatérale pendant un court instant du châssis).

L'expérience nous permet de constater que le gyroscope a rempli complètement sa mission de stabilisation du navire par rapport aux forces transmises par les vagues par l'intermédiaire d'oscillations.

b) Le défaut du gyroscope, stabilisateur de navire

A l'effet d'atténuation des oscillations du gyroscope stabilisateur de navire, lequel agit dans le sens favorable, s'ajoute toute une série de propriétés néfastes qui finalement on conduit à l'abandon de cet appareil.

En premier lieu, le comportement du gyroscope stabilisateur de navire, en présence de couples unilatéraux et de longue durée, n'est pas toujours souhaitable. De tels couples unilatéraux peuvent se produire lors d'une modification de chargement du navire pendant son parcours. Le navire ne cède pas immédiatement à ces couples extérieurs, par contre le gyroscope dérive d'abord autour de l'axe du cadre, c'est seulement lorsque par suite de la dérive du gyroscope il existe un couple de gravité autour de l'axe du cadre, que le navire commence à donner de la bande, exprimé autrement: le gyroscope se met en position inclinée telle que son couple de gravité maintient l'équilibre avec le couple de précession produit par la vitesse de prise de bande du navire. Lorsque, maintenant, les couples extérieurs, agissant sur le navire, disparaissent avant que le gyroscope soit revenu par ses oscillations à la position zéro, celui-ci amorce un cône de précession et fomente dans ce cas des oscillations du navire, même s'il n'existe pas de houle.

L'expérience est très facile à réaliser. Nous prenons l'appareil en main comme précédemment et faisons subir au châssis une rotation dans son plan d'une certaine valeur pas trop grande (fig. 63). Les ressorts produisent à ce moment un couple qui fait dériver le gyroscope. Après quelques secondes, on ramène le châssis dans sa position correcte. Le gyroscope qui a dérivé commence alors à décrire son cône de précession et engendre ainsi des oscillations au niveau du navire (cadre extérieur).

La proposition a été faite en son temps (par Sperry) d'utiliser judicieusement cette capacité de provoquer des oscillations par le gyroscope dans le but de libérer des navires emprisonnés par la glace ou d'empêcher la prise dans les glaces par des oscillations continues autoexcitatrices de roulis. Pour ce faire, on produit par un

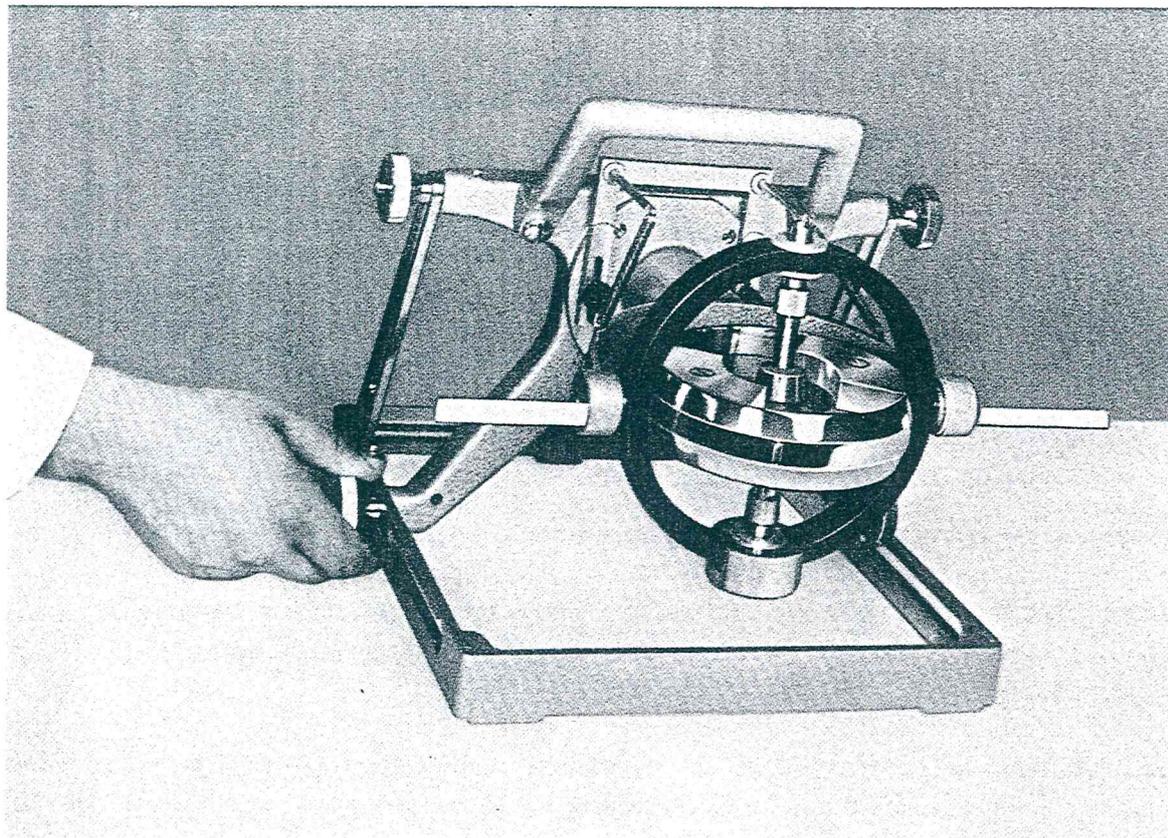


Fig. 63. Démonstration de l'effet d'un gyroscope stabilisateur de navire.

mécanisme de fortes oscillations sur le cadre du gyroscope, lesquelles transmettent alors de forts couples de précession à l'ossature du navire et provoquent ainsi des mouvements de roulis.

Toutefois, aussi néfaste que puisse être un couple unilatéral dû à la bande, c'est le comportement du gyroscope stabilisateur de navire qui est encore plus néfaste par changement de cap respectivement de parcours du navire. Comme le gyroscope ne possède, par suite de sa suspension au cadre, que deux degrés de liberté par rapport au navire, il est forcé d'accompagner des mouvements de rotation du navire autour de certains axes. Ceci engendre des forces gyroscopiques qui peuvent amener une défaillance complète du fonctionnement du gyroscope stabilisateur de navire. Ces défauts ne se présentent, toutefois, que si le parcours circulaire est effectué dans le sens opposé à la rotation du gyroscope. Pour des parcours circulaires dans le même sens que celui de la rotation du gyroscope, les forces gyroscopiques provoquées par le changement de cap agissent comme un assujettissement complet et n'engendrent pas de défauts.

L'expérience se déroule d'une manière semblable que lors de la démonstration faite pour l'erreur du vol en virage avec l'horizon gyroscopique. Le modèle, lancé avec

une force modérée, est pris en main. L'expérimentateur parcourt alors, lentement et régulièrement, un cercle sans incliner ou sans basculer le châssis de l'appareil (ceci est important car autrement des couples unilatéraux engendreraient des dérives). La vitesse avec laquelle le cercle doit être parcourue est à rechercher par des essais pour que le défaut devienne bien visible. Comme pour l'expérience avec l'horizon gyroscopique là aussi la plus grande erreur a lieu lorsque le cercle est parcouru dans le sens de rotation contraire à celui du gyroscope et lorsque la vitesse de marche est égale à la vitesse de précession que le gyroscope possède par suite de son couple de gravité. A ce moment nous nous retrouvons en présence d'une résonance. Pour toutes les vitesses de marche se trouvant en dehors des résonances, et en particulier, pour des parcours circulaires dans le sens de rotation du gyroscope, les erreurs sont tellement petites qu'elles échappent dans la démonstration avec notre modèle. Dans la plage de résonance même le gyroscope risque d'exécuter une culbute complète. Dans ce cas, les forces gyroscopiques agissent en provoquant des mouvements de roulis et des prises de bandes trop fortes pour le navire et qui peuvent, dans certains cas très importants conduire au capotage du navire.

On pourrait éviter cette erreur de modification de cap sur le gyroscope stabilisateur de navire, en installant à la place d'un seul gyroscope, deux gyroscopes tournant dans le sens contraire l'un par rapport à l'autre. Si l'on reliait les cadres des deux gyroscopes entre eux de sorte qu'ils effectueraient toujours des déviations de même grandeur mais opposées les unes aux autres, les forces gyroscopiques provoquées par les modifications de cap seraient des forces intérieures sans aucun effet sur le navire.

Un autre inconvénient du gyroscope stabilisateur de navire réside dans le fait qu'il conduit à des contraintes trop grandes sur la coque. Le couple du roulis est produit par les forces des vagues qui s'exercent sur la longueur totale du navire. Ce couple doit, à présent, être compensé par des couples contraires qui sont transmis des points de suspension du cadre du gyroscope sur la coque du navire. Ceci amène des contraintes trop importantes qui sur plusieurs installations réalisées (sur le navire de Danzig "Hela", par exemple) ont conduit à arrêter l'installation par forte mer.

6. ANNEXE

6.1 Explication de quelques notions de mécanique et de technique gyroscopique

Bien que les gyroscopes utilisés en technique soient considérés, souvent, comme des éléments de construction électriques (certainement à cause de leur entraînement électrique), la science du gyroscope fait partie intégrante de la mécanique. Les notions de base de la mécanique sont donc importantes pour la compréhension de la technique gyroscopique. Les lecteurs qui ne sont pas habitués aux notions et aux termes spécialisés cités dans le texte, trouveront ci-après les explications nécessaires des notions les plus importantes, dans la mesure où ceci est nécessaire pour la compréhension de l'exposé. Des explications plus étendues devront être recherchées dans les livres d'enseignement de la physique, de la mécanique et de la technique gyroscopique.

a) Vecteur force et vecteur moment (couple)

Une force ne peut pas être caractérisée uniquement par l'indication de sa grandeur scalaire. On doit, en plus, indiquer la direction vers laquelle elle agit. Des grandeurs qui peuvent être caractérisées en intensité et en direction s'appellent des **vecteurs**. Leur symbole est une flèche.

Une force peut donc être représentée par une flèche-vecteur dans la direction d'action de la force, où la longueur de la flèche est une mesure de la valeur de la force. Nous nommons cette flèche le **vecteur force**.

Lorsque plusieurs forces concourent en un point P, les vecteurs correspondants peuvent s'ajouter géométriquement suivant la **loi du parallélogramme**. La figure 64 montre ce cas pour deux forces. Mathématiquement ceci peut s'exprimer par l'équation:

$$K_1 + K_2 = K \quad (10)$$

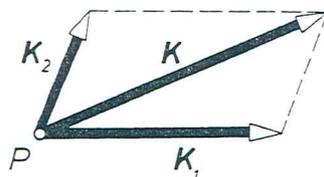


Fig. 64. L'addition de vecteurs-forces.

On représente, en général, les vecteurs par des caractères gras, pour les distinguer d'autre genre de grandeurs. La formule (10) peut aussi être lue de droite à gauche. Elle exprime alors le fait qu'une force donnée \mathbf{K} peut toujours être décomposée en ses composantes \mathbf{K}_1 et \mathbf{K}_2 , lorsque leur direction d'action est donnée. On fait souvent usage de cette possibilité.

A partir de la notion de force on déduit la notion **moment** (aussi couple ou force de rotation; dans le texte, nous avons adopté le mot couple et réservé le mot moment aux notions d'inertie et de cinématique). Si une force agit d'une façon appropriée sur un solide monté sur un palier tournant, elle essaye, en général, à faire tourner ce solide. Mais la grandeur seule de la force n'est pas, dans ce cas, une mesure de l'intensité de la tendance à faire tourner le solide. C'est plutôt le point d'application qui importe. Si la direction de la force passe par l'axe de rotation, la force reste sans effet. Plus la direction d'action de la force (droite d'action) est écartée de l'axe de rotation, plus facilement le solide peut effectuer une rotation. La composante K_T de la force orthogonale à l'axe de rotation, multipliée par la plus petite distance "a" de la droite d'action de la force à l'axe de rotation du solide est désignée par le moment (couple) M de la force par rapport à l'axe de rotation. On obtient donc:

$$M = aK_T .$$

Le moment (couple) est, lui aussi, un vecteur et peut donc être représenté par une flèche. La figure 65 visualise ceci. Soit un parallélépipède, pouvant tourner autour de l'axe A-A et soit une force \mathbf{K} s'appliquant suivant la direction d'action B-B, si les axes A-A et B-B sont perpendiculaires entre eux et si leur plus petit écarte-

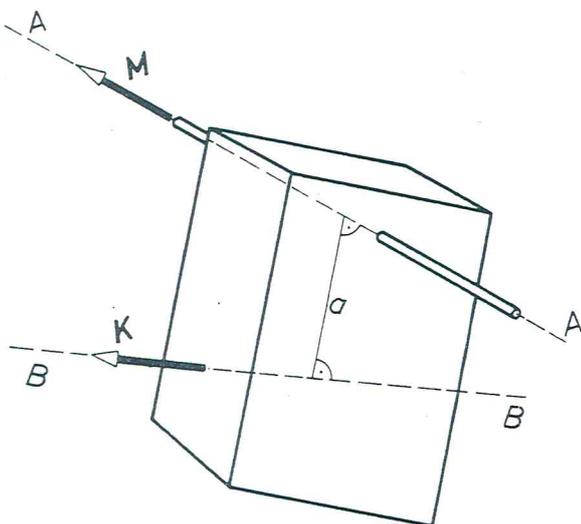


Fig. 65. Explication du moment (couple) \mathbf{M} d'une force \mathbf{K} .

ment est "a", la grandeur du moment (couple) engendré par rapport à l'axe de rotation est égale à $M = aK$. La direction et le sens de l'effet de rotation dus à la force peuvent être représentés par une flèche orientée dans la direction de l'axe de rotation. Pour déterminer le sens il faut appliquer la **règle du tire-bouchon**: Si on applique un tire-bouchon dans l'axe A-A et si on le tourne dans le même sens que la force **K** cherche à tourner le parallélépipède, il se déplace dans la direction du **vecteur moment** (couple) **M**. La longueur de la flèche est choisie égale au produit aK . La règle du parallélogramme s'applique également aux vecteurs-moments (couples).

b) Poids, centre de gravité, couple de gravité

Le poids d'un solide est la force avec laquelle il est attiré par la terre. La force-poids peut donc être représentée par un vecteur **G**. La ligne d'action de **G** passe par le centre d'attraction (centre de la terre) et en outre par le **centre de gravité** du solide. Le centre de gravité peut être considéré comme le centre de poids du solide. Si on suspend ou soutient le solide en ce point, il se trouve en équilibre indifférent. Ceci signifie qu'il reste immobile dans n'importe quelle position angulaire et qu'il ne cherche pas à atteindre une position préférentielle déterminée. Si le centre de gravité et le point de soutien (ou le point de suspension) ne coïncident pas, le solide cherchera toujours à pivoter vers la position pour laquelle le centre de gravité se trouve sous le point de soutien. Cette position est une position d'équilibre stable. En écartant le solide de cette position et en l'abandonnant de nouveau à lui-même, il cherchera à rejoindre la position d'équilibre. L'intensité de cette tendance peut être caractérisée par un moment que la force-poids produit par rapport à l'axe de rotation: c'est le **couple de gravité**. Le couple de gravité peut être calculé à partir de la distance du point de soutien au centre de gravité et du déplacement angulaire du solide en dehors de sa position d'équilibre. Soit sur la figure 66 le point de suspension A et le centre de gravité S d'un solide. Soit

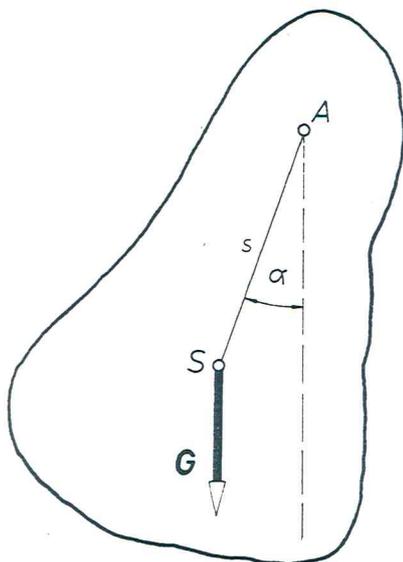


Fig. 66. Explication du couple de gravité d'un solide suspendu ayant un mouvement pendulaire.

s la distance entre ces deux points. Si la droite reliant A à S forme un angle avec la verticale, le couple de gravité de rappel est

$$M_s = Ga = Gs \sin \alpha . \quad (11)$$

Le couple de gravité cherche dans le cas présent à ramener le solide vers sa position d'équilibre. On parle d'un **couple de rappel** ou d'un **assujettissement par gravité** du solide dans sa position d'équilibre.

Si un corps est ramené dans sa position d'équilibre non pas par la pesanteur, mais par des ressorts élastiques on parlera selon le vrai sens du mot d'**assujettissement élastique**. On peut aussi rencontrer des assujettissements de types différents tels que les assujettissements électriques ou magnétiques ainsi que des combinaisons de différents types d'assujettissements.

c) Axe de rotation, vitesse de rotation et vitesse angulaire

Si un corps rigide effectue une rotation, il existe toujours des points qui, à un instant donné, ont une vitesse nulle. Tous ces points se trouvent sur une droite: c'est **l'axe de rotation**.

L'axe de rotation, lui-même, peut aussi se déplacer dans le temps, ainsi n'est-il pas absolument indispensable qu'il se confonde, par exemple, sur le volant d'inertie, avec l'axe de l'essieu de la roue, les paliers de l'axe de l'essieu pouvant eux-mêmes effectuer un mouvement.

Le nombre de révolutions qu'un solide effectue en une minute autour de son axe de rotation est appelé: le **nombre de tours** correspondant à cet axe. Parfois, on indique aussi le nombre de tours par seconde. Pour simplifier la représentation mathématique, on utilise à la place du nombre de tours, la **vitesse angulaire**. Cette expression représente le nombre de rotation exprimé en $2\pi = 6,28$ secondes. Avec une vitesse angulaire $\omega = 1/\text{seconde}$, le solide parcourt en une seconde exactement un angle d'une longueur d'arc 1 (correspondant à un angle de $57,3^\circ$). Pour la vitesse angulaire, on utilise parfois l'expression **fréquence angulaire** (ou **fréquence de rotation**).

d) Le vecteur vitesse de rotation

La vitesse angulaire, elle aussi, peut être représentée par un vecteur que nous désignerons par la lettre de l'alphabet grec ω (voir figure 67). La longueur de la flèche correspond à la valeur de la vitesse angulaire; la direction est obtenue à

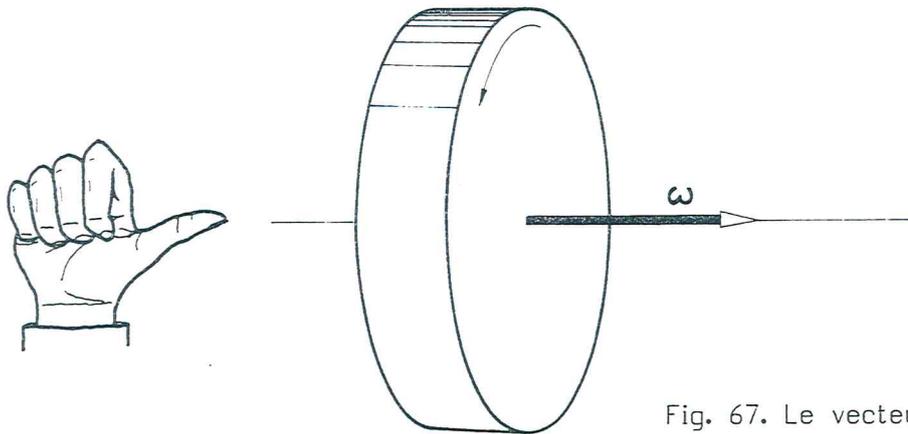


Fig. 67. Le vecteur vitesse angulaire ω .

partir de l'axe de rotation et du sens de rotation. Le sens de la direction de ω peut être déterminé simplement à l'aide de la **règle de la main droite**: On replie les quatre doigts de la main droite dans le sens du mouvement de la rotation du solide; à ce moment le pouce en extension montre la direction du vecteur vitesse angulaire ω . La règle du tire-bouchon peut d'ailleurs aussi être utilisée dans ce cas.

La règle du parallélogramme pour l'addition et la décomposition des forces s'applique, également, sur les vecteurs vitesse de rotation. Si un solide tourne en même temps autour d'un axe OA avec une vitesse angulaire ω_1 et autour d'un autre axe OB avec une vitesse angulaire ω_2 , on peut additionner géométriquement ces deux vecteurs pour obtenir la vitesse angulaire résultante $\omega = \omega_1 + \omega_2$ (fig. 68), ce qui correspond à une rotation autour de l'axe OC.

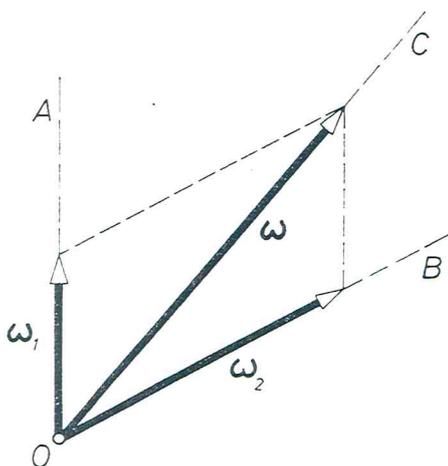


Fig. 68. L'addition des vecteurs de vitesse angulaire.

e) Masse et moment d'inertie

Le comportement d'un corps en mouvement est essentiellement déterminé par son inertie. Pour caractériser les effets d'inertie, on utilise deux grandeurs: **la masse** et le **moment d'inertie**. En décomposant le mouvement global d'un corps rigide en un mouvement de son centre de gravité le long d'une certaine trajectoire et en un autre mouvement de rotation autour de l'un des axes passant par le centre de gravité, on peut dire que la masse est une mesure caractéristique de l'inertie pour le mouvement le long de la trajectoire, et le moment d'inertie une mesure correspondante du mouvement de rotation.

Si une force agit le long d'un corps, celui-ci se met en mouvement avec une vitesse croissante, c.à.d. qu'il accélère. Le rapport de la grandeur de la force à l'accélération provoquée par celle-ci est pour le corps considéré une constante caractéristique: la masse. Elle est simultanément une mesure de quantité de matière et une mesure quantitative du poids en cas de chute avec accélération supposée constante. L'accélération sur la trajectoire qu'une force donnée peut conférer un centre de gravité du corps sera d'autant plus petite que la masse de celui-ci est plus grande. Ces mêmes lois sont applicables au mouvement de rotation. Toutefois, à la place de la force il faut faire intervenir le moment (couple), à la place de l'accélération du centre de gravité sur la trajectoire, l'accélération angulaire (augmentation dans le temps de la vitesse angulaire) et à la place de la masse, le moment d'inertie correspondant (appelé aussi "masse rotative"). L'accélération angulaire qu'un couple donné peut conférer au corps sera d'autant plus petite que le moment d'inertie de celui-ci est plus grand.

Le moment d'inertie peut se calculer à partir de la forme géométrique ainsi que de la distribution des masses du corps. Parmi deux corps de masse identique, celui au plus grand moment d'inertie est celui dont la masse est la plus éloignée de l'axe de rotation. L'influence de l'éloignement d'une masse partielle de l'axe de rotation croît avec le carré de la distance: si la distance d'une masse partielle double elle intervient dans le moment d'inertie par son quadruple. Si on désigne par Δm une masse partielle du corps et par r la plus courte distance à l'axe de rotation, cette masse partielle participe au moment d'inertie total J du corps pour $\Delta J = r^2 \Delta m$. Si on s'imagine le corps composé d'une infinité de masses partielles, le moment d'inertie du corps entier est obtenu par addition des différents moments d'inertie partiels ΔJ

$$J = \sum \Delta J = \sum r^2 \Delta m . \quad (12)$$

Si on choisit une décomposition du corps en très petites masses partielles et à la limite en une infinité de masses extrêmement petites (points matériels), l'addition

se transforme en une intégration. Pour indiquer ce soi-disant passage à la limite, on remplace Δm par dm et la sommation par une intégrale. On aura:

$$J = \int r^2 dm \quad (13)$$

L'intégration est dans ce cas à étendre à l'ensemble des points matériels du corps.

f) Le rayon d'inertie

Une notion auxiliaire très utile pour caractériser un moment d'inertie est le **rayon d'inertie** (ou **demi-diamètre d'inertie**). On désigne par rayon d'inertie par rapport à un axe déterminé la valeur moyenne quadratique de la distance de toutes les masses partielles de ce corps à cet axe.

$$k^2 = \frac{1}{m} \int r^2 dm = \frac{J}{m} \quad (14)$$

Si un anneau mince (toron) possède la masse m et le rayon R , on obtient pour le moment d'inertie J par rapport à l'axe de symétrie (perpendiculaire au plan de l'anneau et passant par le centre de celui-ci) $J = mR^2$. Dans ce cas toutes les masses partielles sont à la même distance R de l'axe de rotation de sorte que $R = k$. Avec un corps de constitution quelconque, le rayon d'inertie peut être comparé à un rayon d'un cercle qui supporte la masse du corps répartie sur sa circonférence (pas nécessairement régulièrement), de telle sorte que l'on obtienne l'équivalent du moment d'inertie effectivement existant.

L'utilisation du rayon d'inertie est surtout commode si on veut estimer les moments d'inertie de corps de conception compliquée.

g) Ellipsoïde d'inertie

Le moment d'inertie d'un corps dépend de sa définition par rapport à l'axe à partir duquel on a mesuré les distances aux particules massiques. Pour différentes directions d'axes, on obtient donc, en général, des moments d'inertie distincts, qui sont, toutefois, reliés entre eux par une relation générale: Soit différents axes OA , OB ... passant par un point quelconque du corps (par exemple par le centre de gravité), si on porte maintenant le long de ces axes, à partir de O , de part et d'autre, des segments équivalents aux valeurs réciproques $1/k$ des rayons d'inertie correspondants

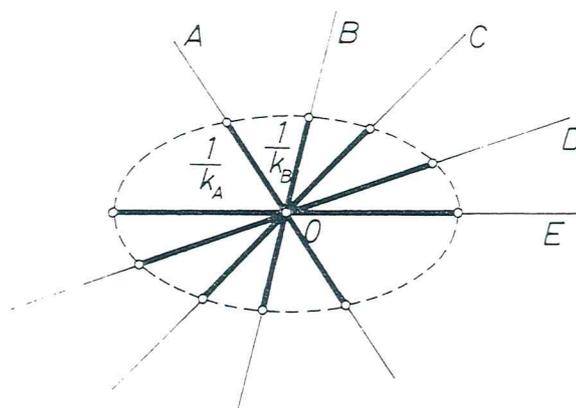


Fig. 69. Explication de l'ellipsoïde d'inertie.

à ces axes, on remarque que toutes les extrémités de ces segments se trouvent sur l'enveloppe d'un ellipsoïde. Celui-ci est désigné par **ellipsoïde d'inertie** du corps pour le point O. La longueur de rayon vecteur du centre O vers un point de la surface de l'ellipsoïde d'inertie est donc définie comme la mesure de la réciproque du rayon d'inertie par rapport à l'axe défini par l'origine du rayon vecteur. Au plus grand rayon vecteur correspond donc le plus petit rayon d'inertie et par conséquent le plus petit moment d'inertie du corps et inversement.

L'ellipsoïde d'inertie d'un corps est à concevoir comme une structure faisant partie intégrante du corps. La forme et la position de cet ellipsoïde déterminent dans une large mesure les lois des mouvements de rotation du corps.

h) Les axes d'inertie principaux et les moments d'inertie principaux

Chaque ellipsoïde possède trois **axes principaux** orthogonaux entre eux. Les axes principaux de l'ellipsoïde d'inertie sont désignés par **axes d'inertie principaux**. Les moments d'inertie valables pour ces axes d'inertie principaux sont les **moments d'inertie principaux**. La forme géométrique de l'ellipsoïde permet de calculer le moment d'inertie d'une direction d'axe quelconque, dans la mesure où les axes d'inertie principaux et les moments d'inertie principaux sont connus.

Dans beaucoup de cas, la forme géométrique du corps permet de reconnaître immédiatement la position des axes principaux. Ils coïncident pour des corps à masse régulièrement répartie (corps homogène) avec les axes de symétrie de celui-ci. Ainsi pour un cylindre, l'axe du cylindre est axe principal. Pour un parallélépipède rectangle ce sont des axes parallèles aux arêtes. Les propriétés symétriques du dé permettent, immédiatement, de dire que les moments d'inertie des axes passant par le centre de dé, et parallèles aux arêtes, doivent toujours être identiques. Par conséquent, l'ellipsoïde d'inertie devient une sphère. On peut en conclure, immédiatement, que les moments d'inertie, aussi, doivent être identiques pour toutes les direc-

tions d'axes passant par le centre du dé. Dans la technique gyroscopique un tel corps à ellipsoïde d'inertie de forme sphérique est désigné par **gyroscope sphérique**. L'expression "sphère" ne se réfère donc pas à la forme géométrique du corps, mais à la forme de son ellipsoïde d'inertie.

i) Le moment cinétique

Le **moment cinétique**, appelé aussi **quantité de mouvement angulaire** ou **moment d'impulsion** est une grandeur importante et décisive. Il se calcule à partir des moments d'inertie d'un corps et de sa vitesse angulaire. Dans beaucoup de cas (toujours lorsque, par exemple, un corps tourne autour de son axe normal), le moment cinétique D est obtenu simplement par le produit du moment d'inertie J suivant l'axe de rotation par la vitesse angulaire ω

$$D = J \omega . \quad (15)$$

Le moment cinétique est également une grandeur à caractère vectoriel. Dans le cas simple de la rotation autour de l'axe normal, la direction du vecteur moment cinétique D est identique à celle du vecteur ω de la vitesse angulaire. Sa grandeur est déduite de la formule (15). Toutefois, dans le cas général, les directions du vecteur moment cinétique et du vecteur vitesse angulaire n'ont pas besoin de coïncider. Ceci apparaît clairement sur la fig. 70. Soient OA et OB les axes principaux du corps par rapport au point O . Si la rotation ne s'effectue pas autour d'un des axes principaux, ω peut être décomposé en ses composantes ω_A et ω_B . On obtient

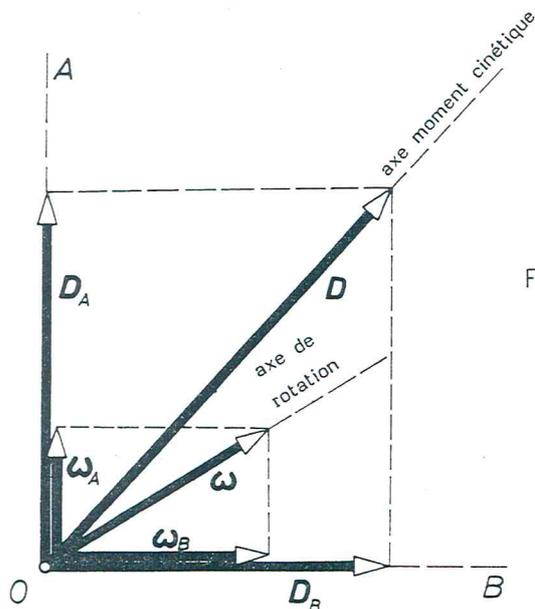


Fig. 70. Construction du vecteur moment cinétique D à partir de la vitesse angulaire ω .

avec ces deux composantes en les multipliant avec les moments d'inertie principaux correspondants J_A et J_B suivant la formule (15), les composantes du moment cinétique D_A et D_B à partir desquelles on peut déterminer le vecteur moment cinétique D .

A partir du schéma de la fig. 70 valable dans un plan bidimensionnel, on peut facilement reconnaître que les directions de D et ω ne coïncident que lorsque les moments d'inertie principaux sont identiques (cas du gyroscope sphérique) ou bien lorsque la rotation s'effectue autour de l'un des axes principaux. La direction du vecteur moment cinétique D est désignée par **axe cinétique**.

j) Le théorème du moment cinétique

La loi fondamentale la plus importante de la mécanique pour l'étude du gyroscope, le **théorème du moment cinétique**, dit que la modification dans le temps du vecteur moment cinétique D est égale au vecteur du couple M qui agit sur le gyroscope. La formule donne:

$$\frac{dD}{dt} = M . \quad (16)$$

Le quotient différentiel situé à gauche peut être considéré comme provenant d'un quotient de différences. Si D_1 et D_2 sont les vecteurs moment cinétique aux temps t_1 et t_2 , on peut écrire à la place de (16)

$$\frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \approx M \quad (17)$$

Si dans le cas limite, la différence de temps Δt est rendue infiniment petite, l'expression (17) redevient identique à celle de (16). En écrivant l'équation (17) sous forme $\Delta D = D_2 - D_1 \approx M \Delta t$, celle-ci permet de déduire et de montrer les cas possibles. Quelques uns sont représentés sur la fig. 71. Le vecteur D_2 est obtenu

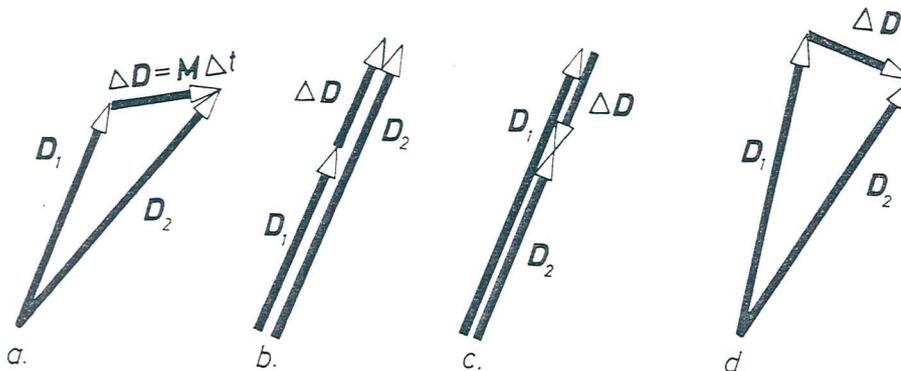


Fig. 71. Différents cas particuliers de modification du moment cinétique.

par addition des vecteurs \mathbf{D}_1 et $\Delta\mathbf{D}$. La figure a) représente le cas général dans lequel le vecteur moment cinétique varie aussi bien en grandeur qu'en direction pendant le temps Δt . Dans la cas b) \mathbf{D}_1 et $\Delta\mathbf{D}$ ont la même direction, par conséquent la valeur du moment cinétique croît tandis que la direction reste inchangée. Comme la vitesse angulaire croît aussi avec le moment cinétique ceci correspond au lancement d'un gyroscope. Si on freine un gyroscope, la direction du moment cinétique reste également inchangée, mais la valeur du moment cinétique diminue (cas c). Le cas particulier d) est important dans de nombreuses applications. Dans ce cas $\Delta\mathbf{D}$ est orthogonal à \mathbf{D} . En effet, le vecteur moment cinétique modifie bien sa direction, mais pas sa valeur. Ce cas de mouvement spécifique d'un gyroscope est appelé **précession**.

Le théorème général du moment cinétique (16) comprend le cas particulier important: $\mathbf{M} = 0$. Dans ce cas, la modification du moment cinétique est nulle et par conséquent, le vecteur moment cinétique reste constant en grandeur et en direction.

Le théorème du moment cinétique (16) n'est pas seulement utilisé pour calculer le moment cinétique \mathbf{D} à partir d'un couple donné \mathbf{M} , mais inversement il permet aussi de calculer le couple à partir d'une variation du moment cinétique observée ou imposée à un gyroscope, et par là le couple que l'on doit appliquer pour la modification du moment cinétique. Ce couple provoque un couple de réaction dans le système. En effet, c'est le couple gyroscopique utilisé dans beaucoup d'applications techniques. Nous l'avons rencontré dans l'exemple du broyeur à meules (paragraphe 4.4) et lors de l'exposé sur le gyromètre (paragraphe 5.4).

6.2 Terminologie employée en technique des appareils gyroscopiques

Une commission du groupement "Technique de régulation" de la VDI/VDE a, en 1962, sous la direction de l'auteur, élaboré une directive qui essaye d'accorder entre elles et d'unifier les désignations et dénominations qui ont vu le jour dans les différents domaines des applications gyroscopiques. Avec l'autorisation aimable du VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, qui a fait paraître ladite directive sous le N° VDI/VDE 2171 "Dénomination dans le domaine de la technique des appareils gyroscopiques" (on peut se la procurer chez Beuth-Vertrieb, Berlin et Cologne), nous reproduisons, ci-après, pour les besoins du présent ouvrage, la partie qui nous intéresse. La directive complète contient à côté d'explications plus approfondies, un répertoire trilingue des expressions spécialisés de ce domaine.

1. Notions de base et éléments de construction

1.1 Dans la technique des appareils gyroscopiques on utilise le comportement physique

des gyroscopes essentiellement pour la mesure et l'indication de directions et de modifications de direction.

1.2 On comprend sous un **gyroscope**, un corps rigide, qui exécute une rotation, en général rapide et qui possède, en outre, le plus souvent d'autres **degrés de liberté** de rotation permettant des changements de position du gyroscope par rapport au **châssis**.

Remarque: Le nombre de degrés de liberté dépend du système de référence choisi qui, le cas échéant, doit être précisé. Dans la bibliographie de langue anglaise, le degré de liberté de rotation autour de l'axe de rotation (1.4) n'est pas, en général, compté.

1.3 En technique, on désigne aussi par gyroscope, l'ensemble de construction constitué du **rotor** et des éléments de construction nécessaires à son fonctionnement (par exemple l'entraînement).

1.4 Souvent l'axe du rotor fait partie intégrante du rotor, par exemple, un axe matériel reposant en deux points dans un cadre ou un boîtier (1.5 et 1.10) (**axe de rotation**), par contre, il existera toujours un axe de symétrie géométrique appelé **axe de la figure**.

1.5 Les degrés de liberté peuvent être réalisés techniquement en faisant reposer le **1er axe** (axe de rotation du rotor) dans un **1er cadre** (boîtier du gyroscope, 1.10). Le **2ème axe** est supporté soit par un **châssis** (carter) soit par un **2ème cadre**, qui, lui, est relié par un **3ème axe** avec le châssis (fig. 72).

Remarque 1: Sans le 2ème cadre, le gyroscope possède deux, avec celui-là 3 degrés de liberté. D'autres cadres et axes peuvent être utilisés. (Certains auteurs utilisent le mot "cardan" à la place de cadre!)

Remarque 2: En général, les deux axes de chaque cadre sont orthogonaux entre-eux et possèdent un point d'intersection commun (à une tolérance de fabrication près)

1.6 Comme les axes et les cadres, les **paliers** qui leur correspondent (paire de palier), ainsi que les angles relatifs et leur détecteur (1.17) peuvent être répertoriés de l'intérieur vers l'extérieur.

1.7 Pour des appareils à gyroscopes multiples (4.1.1, 4.2.2) les ensembles de construction des gyroscopes et leurs éléments de construction peuvent être différenciés par des lettres (par exemple cadre A1, axe B2).

1.8 Si une autre dénomination est employée, celle-ci ne doit pas prêter à confusion et doit correspondre soit à un emplacement géométrique (par exemple **cadre inté-**

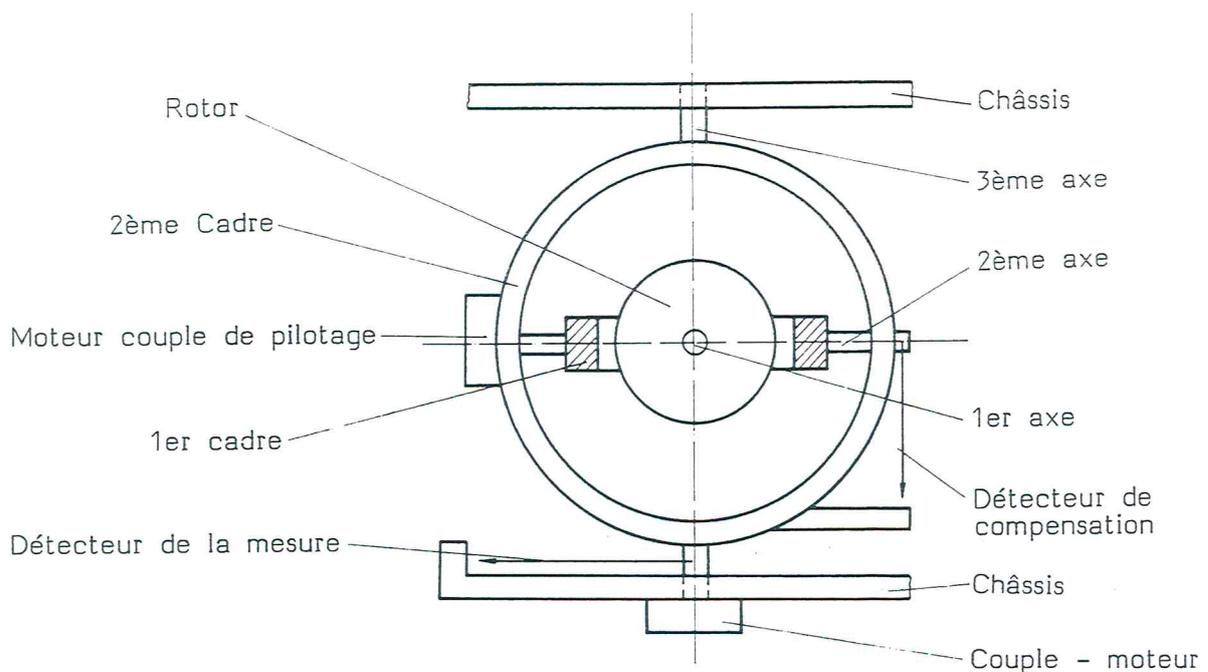


Fig. 72. Les désignations des éléments de construction d'un gyroscope à suspension à la Cardan.

rieur, cadre intermédiaire), soit à une fonction (par exemple **cadre à la Cardan, cadre azimut, cadre suiveur ou fantôme**) ou à la position de travail (par exemple **axe normal, axe transversal**). Néanmoins, le repérage suivant 1.5 doit être préféré.

1.9 On se trouve en présence d'une **suspension à la Cardan** lorsque le rotor repose dans deux cadres lui permettant d'avoir trois degrés de liberté. Le deuxième cadre est désigné dans ce cas par: cadre à la Cardan (anneau de Cardan).

1.10 Le rotor repose souvent avec son entraînement dans un **boîtier** (boîtier du gyroscope). Le boîtier remplace le premier cadre. On peut donc parler ici logiquement d'**axe de boîtier, palier de boîtier, angle de boîtier**.

Remarque 1: Pour un gyroscope à suspension à la Cardan, on trouve de l'intérieur vers l'extérieur les éléments de construction suivants: rotor, axe du rotor (1er axe), palier du rotor, boîtier (1er cadre), axe du boîtier (2ème axe), palier du boîtier, cadre du Cardan (2ème cadre), axe du Cardan (3ème axe), palier du Cardan, châssis.

Remarque 2: Pour des gyroscopes avec un autre dispositif de suspension (par exemple: appui par pointe centrale ou roulement à billes, suspension magnétique, suspension par l'air etc.) cette subdivision n'est, en partie, pas utilisable.

Remarque 3: Des appareils gyroscopiques dans lesquels le boîtier gyroscopique ou le système gyroscopique flotte dans un liquide sont appelés gyroscopes flottants. Il existe des systèmes flottants avec et sans axe mécanique.

1.11 En **position normale** utilisée le plus souvent comme **position de travail**, le 1er

axe est perpendiculaire au 3ème axe. Dans certains cas, on recherche une autre position de travail.

1.12 Si le 1er cadre (boîtier) d'un gyroscope à suspension à la Cardan est tourné de telle façon que le 1er axe rejoigne la direction du 3ème axe, le gyroscope perd un degré de liberté. Cet état s'appelle: **blocage de cadre** (ou **blocage de Cardan**).

1.13 Par le **verrouillage**, la mobilité d'éléments de l'appareil gyroscopique (par exemple d'un cadre) peut temporairement être supprimée.

1.14 Les **éléments de calage** servent à donner à l'axe du rotor (ou à d'autres axes) par exemple, manuellement, une position initiale désirée.

1.15 Le **calage** comprend le verrouillage, le calage proprement dit et la libération (déserrage).

1.16 La plage de rotation du boîtier ou du cadre peut être limitée par des **butées** (élastiques).

1.17 Si on utilise des appareils gyroscopiques comme **indicateur de mesure**, ils sont équipés de **détecteurs**, émetteurs de **signaux**. En général, il s'agit, dans ce cas, de détecteurs à position (**détecteur-P**) pour mesurer des angles; toutefois, on peut aussi trouver des détecteurs différentiels (**détecteur-D**) permettant de mesurer la vitesse de modification de la grandeur détectée.

1.18 Les appareils gyroscopiques sont souvent équipés de **moteur-couples** permettant d'exercer des couples autour de certains axes. (moteur-couple de pilotage 2.7.1; moteur-couple de compensation 2.7.3; fig. 72).

1.19 Si les appareils gyroscopiques sont construits pour remplir leur fonction même lorsque l'avion exécute des loopings et des tonneaux, on dit qu'ils sont **à liberté totale**. On empêche l'état de blocage du cadre par un moyen approprié.

1.20 Des appareils gyroscopiques qui peuvent fonctionner dans toute position dans l'espace ainsi que dans une succession quelconque de positions dans l'espace sont appelés **appareils gyroscopes à liberté angulaire totale**.

2. Gyro libre (gyro d'assiette)

2.1 Les **gyros libres** (ou **gyros d'assiette**) servent à la mesure et à l'indication d'angles, lesquels caractérisent la position du châssis ou de l'avion par rapport à une **direction de référence** ou un **plan de référence**.

Remarque: Avec le gyro libre, on utilise le fait qu'un gyroscope non soumis à des couples extérieurs et possédant 3 degrés de liberté conserve la direction de l'axe cinétique. Toutefois, une absence totale de couples extérieurs n'est pas réalisable avec un appareil gyroscopique, les couples parasites ne pouvant être complètement éliminés. Mais, d'autre part, il est souvent nécessaire de faire agir intentionnellement des couples sur des gyros libres, afin de modifier la direction de leur axe.

2.2 Chez les gyroscopes libres de tout couple extérieur, la direction de l'axe du moment cinétique est fixe par rapport à un **système inertiel** (système de référence stationnaire par rapport à une étoile fixe). A l'opposé, un système de référence fixe par rapport à la terre subit une modification de la direction par la rotation de la terre; cette modification de la direction est appelée **la dérive apparente**.

2.3 Des couples parasites inévitables provoquent, le plus souvent, une dérive lente (réelle) en dehors de la direction d'origine de l'axe cinétique.

2.4 Dans la mesure où la dérive est d'origine systématique, elle peut être compensée. La dérive résiduelle, statistiquement éparpillée et irrégulière, donc non compensable s'appelle la **dérive aléatoire**.

2.5 Avec des gyroscopes à suspension par cadres (par ex. à suspension à la Cardan) on cherche à obtenir l'exemption de couples, entre autres, par un **tarage** permettant de placer, pour chaque axe de cadre, le centre de gravité des masses participantes, dans une position déterminée.

2.6 Des **axes de mesure** sont pour des gyroscopes libres des axes sur lesquels on procède à un relèvement d'angle (voir 3.3. et 3.4). On mesure, en général, la rotation relative des cadres entre eux ou d'un cadre par rapport au châssis. Pour les gyros libres, l'axe de mesure est en même temps **axe détecteur**.

2.7 Pour que les gyros libres puissent remplir leur fonction, l'axe de la figure doit être positionné suivant une direction prédéterminée. Ceci peut être réalisé lors de la mise en route ou lors d'une mise à l'arrêt passagère par un calage (1.15), ou pendant le fonctionnement du gyroscope par une compensation (1.14), c.à.d. **orienter** ou **faire une érection**) (2.7.4). Pendant le fonctionnement, la direction de l'axe de la figure, peut, d'autre-part, être **contrôlée**. Si la direction s'écarte de la référence on peut le constater par un **détecteur de système de contrôle** et la concordance peut souvent être rétablie automatiquement.

2.7.1 Le **contrôle** de l'axe de référence prescrit à l'axe de la figure est effectué en faisant une **précession pilotée** et une **précession de soutien** (ou de **compensation**). Faire une précession pilotée ou de soutien caractérise l'opération elle-même, tandis que les éléments de construction nécessaires à cette opération sont caractérisés par leur complément, soit pilotage ou compensation; par exemple **moteur couple de pilotage, détecteur de compensation** etc. (fig. 72).

2.7.2 Le fait d'exécuter une précession pilotée modifie la direction de l'axe cinétique de telle sorte que la mesure est influencée. On peut utiliser ce fait, ou bien pour éliminer une dérive, ou bien pour ramener la direction de référence vers, par exemple, un système de référence tournant, fixe par rapport à la terre.

2.7.3 Les **couples de précession**, en général de faible ampleur, nécessaires à la précession pilotée sont ou pilotés en comparant la direction de consigne avec la direction existante à l'aide d'un détecteur de système de contrôle (par exemple compas pour la direction du cap, pendule de pesanteur pour la direction de la verticale), ou déduits de la grandeur pilote (modification de la valeur de consigne) en cas d'utilisation de boucle de régulation (boucle d'alignement).

2.7.4 On parle **d'orientation**, lorsque l'axe de la figure est obligé d'effectuer une précession dans le plan horizontal à l'aide de couples appropriés par exemple gyroscope directionnel); lors de **l'érection** l'axe de la figure précessionne vers la direction verticale (par exemple horizon gyroscopique). Pour éliminer, si possible rapidement, les dérives initiales souvent très fortes, on impose fréquemment des vitesses de précession plus grandes qu'en marche normale, en appliquant passagèrement des couples importants. On parle dans ces cas de **précession pilotée rapide (orientation rapide resp. érection rapide)**.

2.7.5 En faisant une **précession de soutien** (ou de **compensation**) on amène l'axe de la figure dans la position normale ou dans la position de marche pour l'y maintenir (contre l'influence des couples parasites agissant sur l'axe de mesure) fig. 72).

2.8 Les gyros libres (gyros d'assiette) comprennent entre autres:

2.8.1 Les **gyroscopes directionnels**: ils servent à mesurer l'angle d'azimut, c.à.d. les déplacements angulaires du corps de l'avion ou du véhicule autour d'un axe vertical.

2.8.2 Les **gyroscopes polaires** sont des gyroscopes directionnels ayant des dérives aléatoires particulièrement très faibles. Ils ne possèdent pas de précession pilotée par un détecteur de mesure du champ magnétique terrestre et sont essentiellement employés dans les régions polaires.

2.8.3 Les **compas gyro-magnétiques**: leur base est un gyroscope directionnel sur lequel l'axe de la figure effectue une précession pilotée par comparaison de direction avec celle indiquée par le détecteur de mesure du champ magnétique terrestre (compas magnétique) (gyro magnétique).

Remarque: La désignation compas gyroscopique ne doit pas être utilisée pour cet appareil et doit être réservée uniquement pour l'appareil indiqué sous 4.1.

2.8.4 Les **gyroscopes de verticale** servent à mesurer les angles par rapport à une direction de référence verticale. Si on utilise des gyroscopes de verticale pour indiquer un horizon (artificiel) l'appareil correspondant s'appelle **horizon gyroscopique** (en abrégé horizon tout court). Dans ce cas les détecteurs du système de pilotage (détecteur du système d'érection) sont par exemple des pendules, des niveaux à contact ou des billes entraînées.

3. Gyromètre

3.1 Les gyromètres sont des gyroscopes avec deux degrés de liberté (1.5 Rem. 1), ils sont utilisés pour la mesure et l'indication de vitesse angulaire (et de là les grandeurs qui en dérivent) autour d'un axe défini (suivant 3.4), dépendant de la position de montage.

Remarque 1: Dans les gyromètres on utilise le fait qu'une rotation imposée à l'axe cinétique produit un couple gyroscopique proportionnel à la vitesse de rotation.
Remarque 2: Dans l'aviation il existe par exemple des gyromètres pour vol en tonneau, pour vol en tangage, pour vol en lacets.

3.2 Dans un gyromètre, le rotor repose dans un cadre (boîtier) dont les mouvements de rotation autour de l'axe du cadre (axe du boîtier) sont en général influencés par un **assujettissement** (par ex. un ressort) et un **amortissement** (ou par l'un ou l'autre).

3.3 Dans le cas d'un gyromètre avec assujettissement, désigné sous le nom de **gyromètre-P** (gyromètre proportionnel), le signal émis est une mesure de la vitesse de rotation du châssis autour de **l'axe de mesure**.

3.4 L'axe de mesure d'un gyromètre est solidaire du châssis et forme aussi bien avec la position moyenne de l'axe du rotor qu'avec l'axe du cadre un angle droit.

Remarque: D'après les lois gyroscopiques, le couple produit est proportionnel à la vitesse de rotation autour d'un axe solidaire du boîtier. Cet axe est toujours perpendiculaire à l'axe du rotor et, en position moyenne, il coïncide avec l'axe de mesure.

3.5 Un gyromètre-P avec indication directe est un indicateur de virage. On l'utilise, muni de détecteurs, comme détecteur de mesure pour des régulateurs de vol. L'arbre de détection est l'axe du cadre; il ne doit pas être confondu avec l'axe de mesure (3.4).

3.6 Si maintenant il y a seulement action d'un couple d'amortissement proportionnel

à la vitesse de rotation du cadre, l'appareil a un effet intégrateur et s'appelle **gyromètre-I** (intégrateur). De tels gyromètres peuvent comme les gyroscopes libres, être utilisés pour la mesure de la position (déviation angulaire).

3.7 Les gyromètres avec effet différencié s'appellent des **gyromètres différentiels** (gyromètre-D). Ils sont utilisés pour mesurer des accélérations angulaires.

3.8 Il existe des gyromètres en versions mixtes, sur lesquels la grandeur mesurée se compose de différentes parties. Conformément au sens on parlera dans ce cas de **gyromètre-P-I**, **gyromètre-P-D** etc.

4. Appareils gyroscopiques divers

4.1 Les compas gyroscopiques servent à déterminer la direction du Nord géographique. A la différence des gyroscopes directionnels, qui sont uniquement des conservateurs de cap, les compas gyroscopiques recherchent eux-mêmes leur direction de référence c.à.d. la direction de la composante horizontale du vecteur rotation de la terre: Ce sont des chercheurs de cap.

4.1.1 D'après le nombre de gyroscopes existants sur un compas gyroscopique, on parle de compas **mono-**, **bi-** ou **trigyroscopique**.

4.1.2 Le **compas spatial** est un appareil solidaire de la terre qui indique en même temps la direction du Nord et de la verticale.

4.2 Tandis qu'un gyro libre ne peut maintenir qu'une direction de référence et permet tout au plus la mesure de 2 angles, il est possible en combinant au moins deux gyroscopes libres ou 3 gyromètres, de repérer l'orientation spatiale d'un système à l'aide de trois axes. Un tel type de système gyroscopique, dans le sens plus large, comprenant aussi l'ensemble de l'appareil y compris la suspension de ses cadres, s'appelle une **plate-forme d'assiette** (plate-forme stabilisée ou simplement plate-forme stable). La stabilisation peut être ou bien fixe dans l'Espace absolu ou bien fixe par rapport à la terre; les deux types d'appareils sont désignés par **plate-formes inertielles** si elles sont utilisées pour la **navigation inertielle**.

4.2.1 Une plate-forme travaillant suivant le principe de Schuler (5.10) est souvent désignée par **plate-forme Schuler**

4.2.2 Suivant le nombre de gyroscopes utilisés pour la stabilisation et montés sur la plate-forme, on parle de **plate-forme à deux** ou **trois gyroscopes**. Le type le plus simple d'une plate-forme à deux gyroscopes est constitué par un appareil dans

lequel un horizon gyroskopique est stabilisé horizontalement par un gyroscope directionnel.

4.2.3 En ajoutant des cadres supplémentaires (1.5 Rem. 1), on peut constituer une **plate-forme à liberté angulaire totale**.

4.3 Les **gyroscopes de stabilisation** sont utilisés pour stabiliser des objets autour d'un axe. Ils se prêtent bien à l'interception directe des couples perturbateurs (par exemple gyroscope de navire de Schlick), où à la commande des moteurs-couples de compensation, parfois par l'intermédiaire de réducteurs de compensation.

4.4 Les **cadres d'inertie** sont constitués de deux gyroscopes de stabilisation accouplés, de rotation et de sens contraires. Ces cadres se prêtent à la stabilisation directe d'objets plus grands, chaque fois autour d'un axe.

Remarque: Les gyroscopes de stabilisation et les cadres de stabilisation peuvent être contrôlés suivant deux plans, c.à.d. pilotés ou compensés par une précession.

4.5 Si un couple agit sur un gyroscope dont l'axe est perpendiculaire à l'axe cinétique, le gyroscope précessionne. Comme la vitesse de précession est proportionnelle au couple, l'angle de précession devient une mesure pour l'intégrale des temps par l'intermédiaire du couple agissant. Ce fait est utilisé dans les **gyroscopes intégrateurs** (comparer avec gyromètres intégrateurs 3.6). En font partie, entre autres, le gyroaccéléromètre intégrateur, sur lequel le troisième axe ne passe pas par le centre de gravité du 2ème cadre. Dans ce cas, le couple est proportionnel à l'accélération et l'angle de précession est proportionnel à la vitesse.

5. Sources d'erreurs sur les appareils gyroscopiques

Remarque préliminaire: Les "erreurs" traitées dans ce paragraphe n'ont pas pour origine des défauts de fabrication ou de maniements des appareils, mais sont dues au principe de mesure. Plusieurs appareils ne peuvent pas mesurer directement la grandeur recherchée: ils mesurent plus exactement une grandeur physique autre qui ne concorde avec celle recherchée que dans certaines conditions bien déterminées.

5.1 La **verticale vraie** est la direction que prend un pendule de pesanteur immobile par rapport à la terre. Elle peut être déterminée par des appareils de mesure tels que des pendules ou des niveaux.

5.2 Sur des corps en mouvement, les appareils de mesure de la verticale ne peuvent, en principe, saisir que la **verticale apparente** qui coïncide avec la direction de la résultante constituée de la pesanteur et de la résistance due à l'inertie (par suite de l'accélération du système).

5.3 Si on utilise des appareils de mesure de la verticale comme détecteur-transmetteur de mesure pour une précession pilotée d'un gyroscope de verticale ou d'un gyroscope d'horizon, l'indication de la verticale apparente des appareils de mesure de la verticale est soumise à une **erreur due à l'accélération** du gyroscope piloté par eux.

Des **erreurs directes dues à l'accélération** sont engendrées sur ces gyroscopes dont le centre de gravité ne se trouve pas au point d'appui par suite des couples produits par l'accélération.

5.4 L'erreur due à l'accélération, engendrée lors du changement de direction de la trajectoire s'appelle l'**erreur de virage**

5.5 Les **erreurs de route** par exemple chez des compas gyroscopiques sont des erreurs d'indication qui dépendent essentiellement de la vitesse de marche.

Remarque: Elles disparaissent sur un véhicule immobile et deviennent perceptibles sur des véhicules en mouvement, même en cas de mouvement non accéléré (contrairement aux erreurs d'accélération).

5.6 Les **erreurs dues à la rotation terrestre** peuvent être engendrées par des couples gyroscopiques qui sont provoqués par suite de la vitesse de rotation terrestre. Ces erreurs ne doivent pas être confondues avec la dérive apparente (2.2). Pour des appareils dont le contrôle est fait par des détecteurs transmetteurs d'accélération, ces erreurs peuvent devenir perceptibles sous forme d'erreurs dues aux **forces de Coriolis**.

5.7 Différentes erreurs peuvent se produire à la suite des mouvements périodiques du corps respectivement du châssis; l'origine de celles-ci est indiquée par leur terminologie, par exemple:

5.7.1 Les **erreurs de roulis** apparaissent sur le compas gyroscopique du navire par suite des mouvements de roulis (rotation autour de l'axe longitudinal du navire).

Remarque: L'erreur de roulis intercardinale est l'erreur de roulis se présentant lors des trajets intercardinaux (Sud-Est, Nord-Ouest; Sud-Ouest, Nord-Est).

5.7.2 Les **erreurs de changement d'attitude oscillante** apparaissent sur des appareils gyroscopiques à précession de compensation, lorsque pour des mouvements oscillants

du châssis, le plan dans lequel s'effectue la précession de compensation, participe à l'attitude oscillante, par exemple sur des gyroscopes directionnels lors du virage avec l'axe du châssis incliné.

5.8 Avec des compas-gyromagnétiques, les erreurs de mesure du compas magnétique engendrées par exemple à la suite de l'influence des accélérations ou des inclinaisons transversales de l'avion, se répercutent directement comme erreurs de pilotage du gyroscope directionnel.

5.9 Les **erreurs de Cardan** peuvent avoir deux sources différentes. D'une part par suite de l'inclinaison de l'axe de mesure lors d'un virage (par exemple sur le gyroscope directionnel effectuant un parcours intercardinal) (Rem. 5.7.1), elles s'établissent à partir de phénomènes purement cinématiques par l'intermédiaire des paliers de cardan ou par l'intermédiaire de la tringlerie de mesure (erreur cinématique de Cardan ou erreur due au coincement), d'autre part, des effets d'inertie des masses nécessaires à la suspension du gyroscope peuvent engendrer des erreurs (erreurs dynamiques de Cardan).

5.10 On désigne par **principe de Schuler** (principe de compensation indépendante de l'accélération) le fait connu que les appareils soumis aux lois du pendule (par exemple les compas gyroscopiques ou les plate-formes stabilisées) ne possèdent pas d'erreurs dues à l'accélération, si on leur octroie une période d'oscillation T qui se calcule à partir de la distance R du véhicule au centre de la terre (en général on peut prendre $R =$ au rayon de la terre) et de la grandeur de l'accélération terrestre locale g :

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{R}{g}} .$$

On parle alors d'**accord Schuler**. Pour des mouvements sur la surface de la terre $T = 84,4$ minutes.

Remarque: La modification de la direction de référence, due à l'influence des accélérations correspond dans le cas des appareils avec compensation Schuler exactement à la modification de direction de la verticale vraie.

5.11 Les **erreurs dues à l'amortissement** peuvent apparaître à la suite d'accélération lorsqu'on utilise pour l'atténuation des oscillations à longues périodes, des dispositifs d'amortissement complémentaires. Car avec des systèmes oscillants amortis, on ne peut pas obtenir, même avec une compensation Schuler, une indépendance par rapport à l'accélération.

6.3 Description et mode d'emploi du modèle gyroscopique pédagogique de Phywe AG

Le gyroscope modèle servant à exécuter les expériences décrites dans le texte a plusieurs ancêtres. Notre modèle est né après étude des avantages et des inconvénients des gyroscopes-modèles connus jusqu'à présent. Lors de sa conception on a particulièrement insisté à pouvoir réaliser le plus grand nombre possible d'expériences. En plus, l'objet de démonstration le plus important concernant les différentes expériences devait apparaître clairement. Finalement le modèle devait, malgré sa polyvalence, rester simple, une exigence qui a pu être satisfaite au mieux grâce à la forme de construction.

a) Description

Le gyroscope modèle (fig. 73) possède une toupie avec suspension dite à la Cardan qui assure au gyroscope une liberté totale de rotation autour des trois axes sur

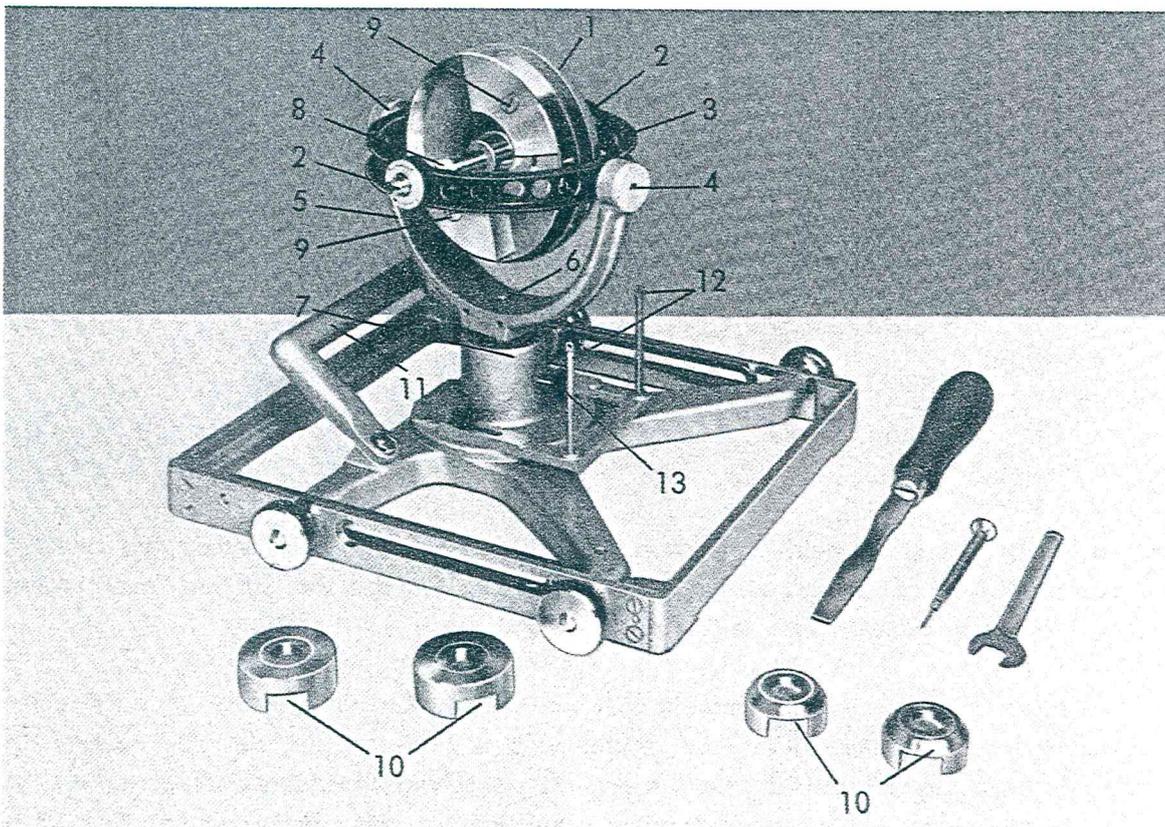


Fig. 73. Model d'enseignement de gyroscope avec accessoire.

lesquels nous reviendrons d'une façon plus précise. La toupie (rotor) proprement dite est constituée d'un disque (1) qui, tournant avec l'axe (2-2) repose dans un cadre (3), le cadre intérieur de Cardan. Ce cadre repose lui-même, à son tour, dans le cadre extérieur de Cardan où demi-anneau à Cardan, par l'intermédiaire d'un axe (4-4) (axe de Cardan intérieur) permettant sa rotation. Finalement ce demi-anneau de Cardan (5) peut, lui, tourner autour de l'axe vertical (6) (axe de Cardan extérieur) qui repose dans le pied (7). Dans le cas normal les trois axes du modèle, l'axe de la toupie, l'axe intérieur et l'axe extérieur de Cardan sont perpendiculaires entre eux. Le système peut complètement basculer autour de chacun des axes sans être gêné d'aucune manière dans sa liberté de mouvement. Le gyroscope possède donc trois degrés de liberté de rotation.

L'axe de rotation, les axes intérieur et extérieur de Cardan se coupent en un seul point, que l'on a fait coïncider, avec la plus grande précision possible, avec le centre de gravité du système total. Le gyroscope se trouve en équilibre indifférent et devrait donc rester en équilibre dans toute position sans effectuer de mouvement pendulaire. On peut procéder à de faibles rectifications de la position du centre de gravité par déplacement des deux poids d'équilibrage à fente (8), qui sont calés sur les deux moitiés de l'axe de rotation. Au cas où le gyroscope continue à chercher son équilibre par oscillation dans certaines positions, malgré le déplacement des poids d'équilibrage ceci peut avoir comme origine des défauts dans les paliers ou également une légère flèche de l'anneau plein de Cardan. Cette déformation ne peut pas complètement être évitée à cause de la légèreté de conception du cadre, nécessaire pour pouvoir exécuter toutes les expériences décrites dans cet ouvrage.

La masse oscillante principale du gyroscope n'est pas fournie par le disque gyroscopique mais par les quatre poids-disques (9) pouvant se visser sur celui-ci et qui ont été élaborés à partir d'un anneau de disque coupé en quatre. On peut modifier les moments d'inertie du gyroscope ainsi que leur rapport entre eux en faisant varier la position d'application de ces quatre poids-disques. En fixant deux poids diamétralement opposés entre eux sur un côté du disque et les deux autres poids diamétralement opposés mais dans les secteurs encore libres de l'autre face du disque (fig. 74), la répartition des masses est symétrique par rapport à l'axe de rotation. Par conséquent, l'ellipsoïde du gyroscope est un ellipsoïde de rotation et le gyroscope est appelé dans ce cas: gyroscope symétrique. La fig. 74 représente la répartition des poids-disques pour ce cas. Les poids se trouvant sur la face visible du disque sont dessinés en traits pleins, ceux de la face arrière en traits interrompus.

En déplaçant les deux poids d'une face, de 90° , on réalise la disposition représentée par la fig. 75 sur laquelle le même secteur du disque comporte chaque fois deux poids mais fixés de part et d'autre du disque. Le moment d'inertie du système autour de l'axe de rotation n'a pas subi de modification dans cette opération, le poids disque ayant en effet la même distance de l'axe de rotation que dans le cas de

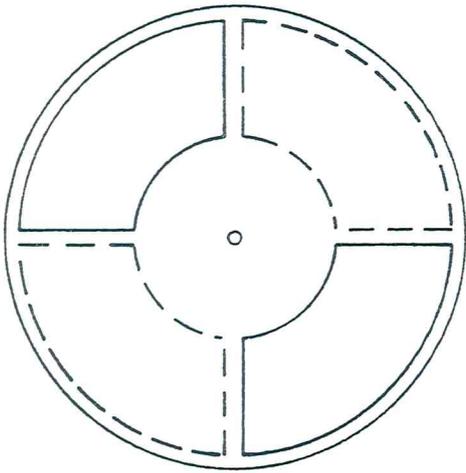


Fig. 74. Disposition des poids disques pour un rotor symétrique.

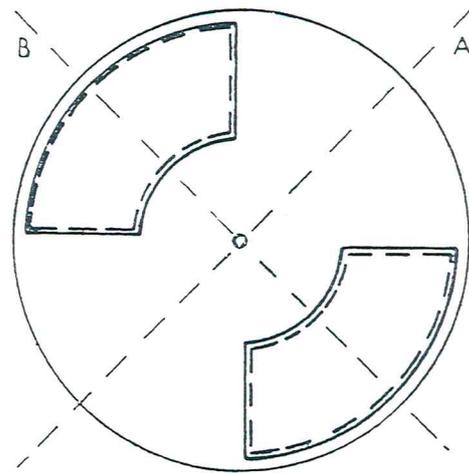


Fig. 75. Disposition des poids disques pour un rotor asymétrique.

la fig. 74, par contre l'ellipsoïde d'inertie n'est plus un ellipsoïde de rotation. Au contraire le moment d'inertie pour l'axe principal A représenté sur la figure, est plus grand que pour l'axe principal B. Un tel corps est appelé gyroscope asymétrique.

Finalement on peut aussi répartir les poids disques de telle façon que deux poids se trouvent côte à côte sur une face du disque, les deux autres poids sur les deux autres secteurs libres de la face opposée. La répartition des masses est dans ce cas encore symétrique (avec une très bonne approximation). Le gyroscope est donc symétrique, mais l'axe de rotation n'est plus axe d'inertie principal. L'axe d'inertie principal dévie plutôt d'une certaine valeur angulaire de la direction de l'axe de rotation. On appelle un tel type de gyroscope un gyroscope à balourd. La fig. 76

Fig. 76. Disposition des poids disques pour un rotor symétrique avec balourd.

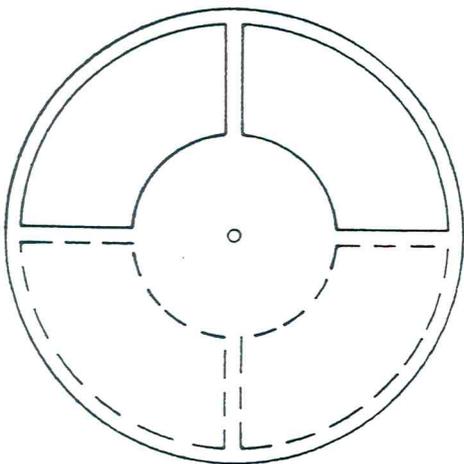
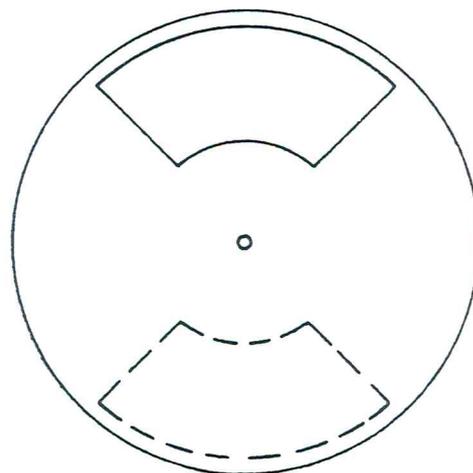


Fig. 77. Disposition des poids disques pour pour un rotor asymétrique avec balourd.



montre donc la disposition des poids disques pour un gyroscope symétrique à balourd. On obtient la disposition pour un gyroscope asymétrique à balourd, en enlevant dans la fig. 76, deux poids disques opposés l'un à l'autre (fig. 77).

Dans tous les cas cités jusqu'à présent (fig. 74 à 77), le centre de gravité reste au point d'intersection des trois axes du système. Mais on peut aussi l'amener dans une autre position, si on fixe les poids disques, ou bien sur une seule face du disque, ou bien en ne les mettant plus par paires, l'un en face l'un de l'autre. Ces cas, toutefois, nous importent peu.

On peut fixer, par calage et vissage, sur le cadre intérieur à Cardan, à l'emplacement des paliers de l'axe de rotation, des poids additionnels 10. Ces poids additionnels ne participent pas à la rotation autour de l'axe gyroscopique; ils ne s'ajoutent donc pas au moment d'inertie autour de cet axe (le dénommé moment d'inertie axial). Par contre, les poids additionnels accompagnent les mouvements du système autour des axes à Cardan et agrandissent donc lesdits moments d'inertie équatoriaux inhérents à ces deux axes. Le modèle est livré avec deux paires de poids additionnels, dont la plus légère est désignée par paire N°1 et la plus lourde par paire N°2.

On peut par différentes dispositions des poids disques et par les différentes grandeurs des poids additionnels, modifier, dans une large mesure, l'ellipsoïde d'inertie du système constitué par le disque gyroscopique et les cadres à Cardan.

Dans beaucoup d'expériences décrites dans le texte, il est nécessaire d'assujettir élastiquement l'axe du gyroscope à une position d'équilibre déterminée ou de la maintenir dans un plan déterminé. Ceci est réalisé en accrochant des ressorts spirales qui sont disposés par paires, d'un côté entre les deux cadres à Cardan et de l'autre côté entre le cadre à Cardan extérieur et les oeillets disposés sur les tiges montantes (12) qui, elles, sont fixées sur le châssis. La première paire de ressorts assujettit le cadre intérieur, par rapport au cadre extérieur et cherche ainsi à ramener l'axe du gyroscope, toujours vers le plan horizontal. La deuxième paire de ressorts assujettit le cadre extérieur par rapport au châssis et cherche ainsi à maintenir l'axe du gyroscope dans une position d'azimut déterminée. Si seule la deuxième paire de ressorts est utilisée, c'est à dire sans l'autre, l'axe du gyroscope est assujetti à un plan vertical. Si les deux paires de ressorts sont accrochées, l'axe du gyroscope reçoit une direction d'équilibre formée par la droite d'intersection des deux plans cités précédemment.

L'assujettissement peut, suivant la puissance des ressorts qui sont accrochés, être de force diverse. Le modèle est livré avec quatre paires de ressorts, désignées par paire 1 à paire 4, de telle sorte que la paire N°1 désigne les ressorts les plus puissants, tandis que la paire N°4 les plus faibles. A la limite, l'assujettissement peut être rendu rigide, bloquant ainsi un des deux cadres à Cardan. Sur le modèle, le cadre extérieur peut être bloqué: la vis moletée (13) au pied de l'appareil permet

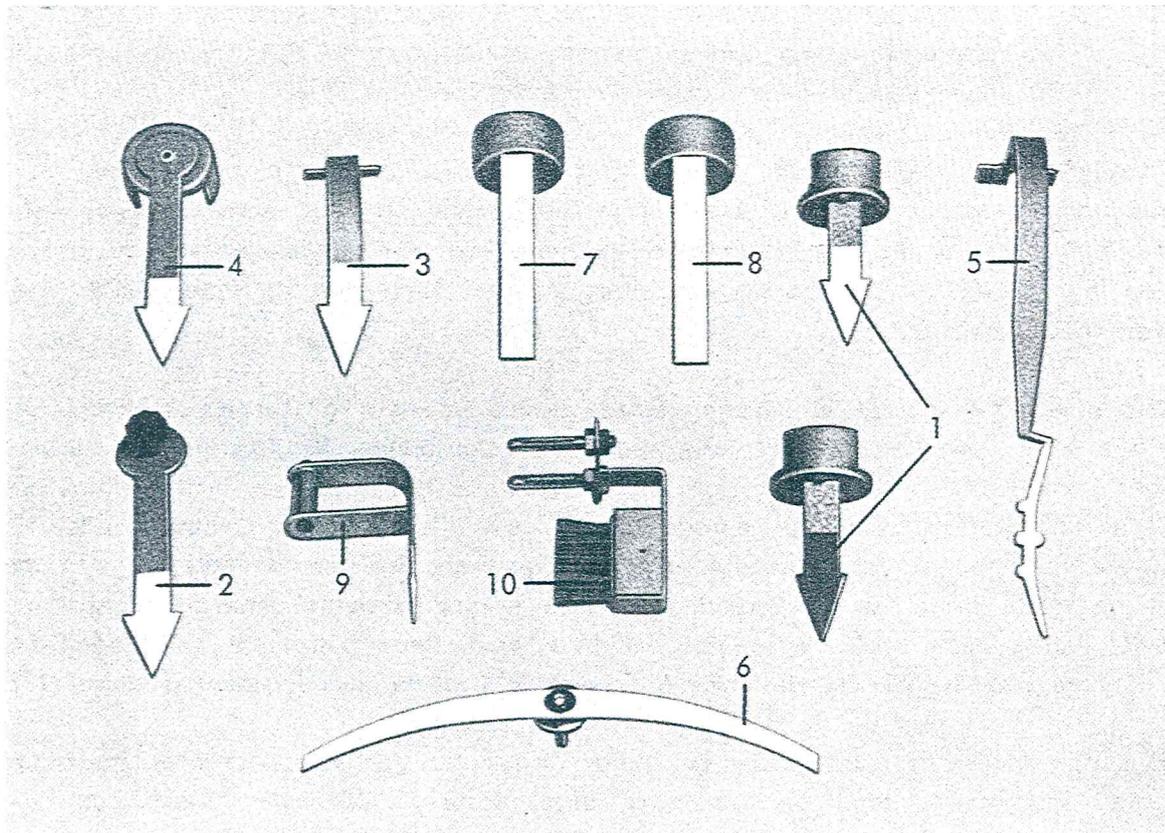


Fig. 78. Aiguilles et brosses amortisseuses du gyroscope modèle de démonstration.

cette opération. Par ce fait, la liberté de mouvement du gyroscope est réduite. Dans ce cas, le système possède uniquement deux degrés de liberté de rotation. Un assujettissement de l'axe du gyroscope peut aussi se réaliser par un couple de gravité produit par un déplacement correspondant du centre de gravité. A cet effet, il suffit d'apposer à la place de la paire de poids additionnels seulement un poids sur un des emplacements des paliers de l'axe du gyroscope.

D'autre part, le modèle est livré avec des aiguilles-flèches (1 à 10) et avec une brosse d'amortissement (10) (fig. 78). Les aiguilles-flèches servent à la visualisation du fonctionnement des appareils gyroscopiques. On a expliqué, aux différents endroits du texte qui y est relatif, la manière de les fixer.

b) Le maniement du modèle

Pour permettre l'exécution de certaines expériences, les poids et moments d'inertie des différents éléments de construction du gyroscope-modèle ont dû être accordés, d'une façon très précise, les uns par rapport aux autres. Il était particulièrement nécessaire de réaliser les deux cadres à Cardan aussi légers que possible tout en

leur assurant une résistance suffisante. Cela n'a pu être obtenue que par une construction soignée et une fabrication précise. **Le gyroscope modèle est donc un appareil de précision et doit être traité comme tel!** Un maniement brutal, particulièrement des sollicitations brusques peuvent par déformation des cadres à Cardan ou par détérioration des paliers influencer le fonctionnement de l'appareil.

En procédant aux expériences, il faut veiller à une mise en place stable du modèle et particulièrement éviter un éventuel basculement du socle à l'aide de la mise en place d'un coin. Avant toute expérience, il faut s'assurer que les poids disques et les poids additionnels soient fortement serrés. Un poids éjecté ne présente pas seulement un danger pour les personnes aux alentours mais peut aussi détruire l'appareil par suite d'un déséquilibre brutal.

Le lancement du modèle est effectué par une manivelle d'entraînement, dont le doigt d'entraînement en forme de dent engrène dans une contre-pièce d'accouplement fixée sur l'axe du gyroscope (fig. 79). Pour aucune des expériences, il n'est nécessaire d'atteindre, lors du lancement, les vitesses les plus élevées du gyroscope.

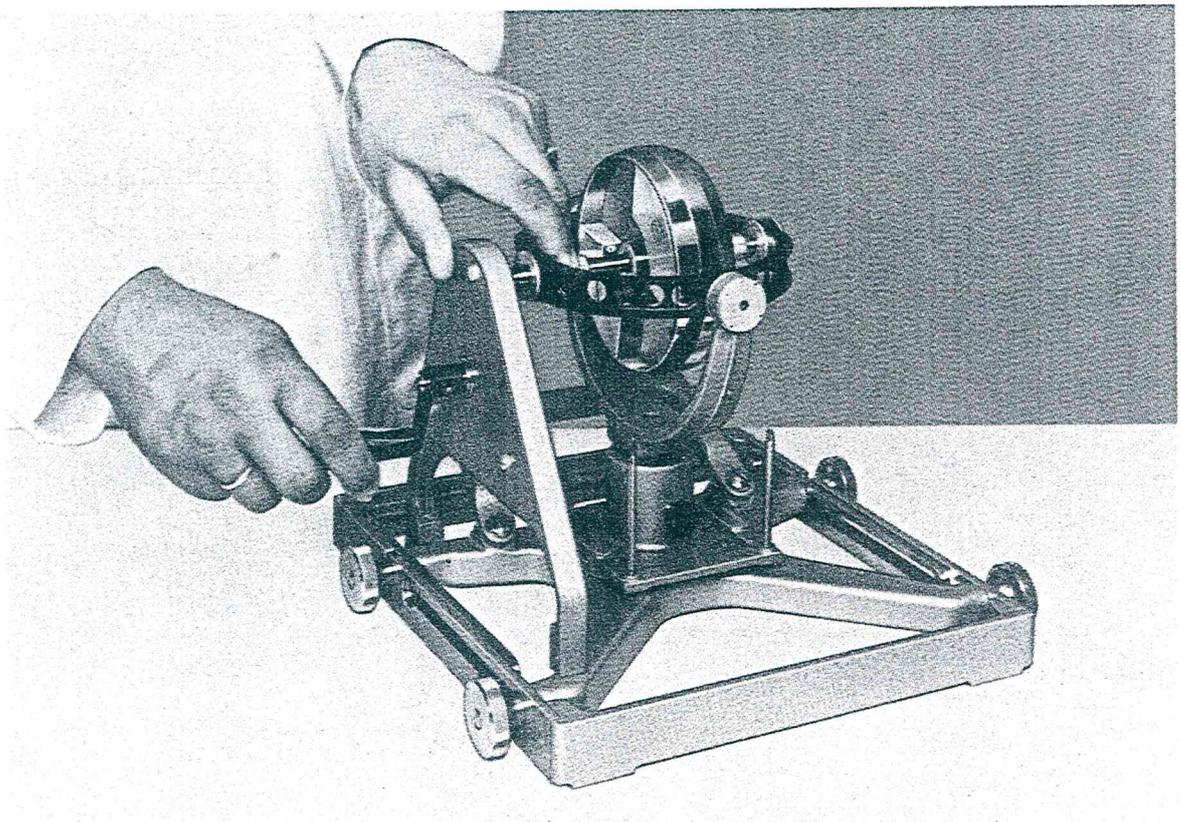


Fig. 79. Le lancement du rotor à l'aide de la manivelle d'entraînement.

Le lancement du gyroscope à une vitesse juste nécessaire pour l'exécution de l'expérience envisagée est suffisant. Dans la plupart des cas, un simple lancement à la main suffit déjà. A cet effet, on applique l'index derrière un poids disque et on communique au gyroscope une impulsion. De toute manière, l'entraînement du gyroscope par frappes successives sur le bord du disque doit être évité!

Des précautions particulières sont nécessaires pour toutes les expériences nécessaires avec le gyroscope asymétrique! Des expériences avec un gyroscope asymétrique à rotation rapide peuvent devenir dangereuses et détruire l'appareil. **Pour cette raison, le gyroscope asymétrique ne doit pas être amené à la vitesse par la manivelle d'entraînement!** Un lancement à la main est toujours suffisant.

Si le modèle doit servir en démonstration, il est conseillé d'essayer les expériences au préalable et de noter tous les détails importants, comme par exemple:

- la disposition des poids-disques,
- le type et la grandeur des poids additionnels,
- la puissance et le point d'accrochage des ressorts,
- le nombre approximatif de tours d'entraînement du gyroscope.

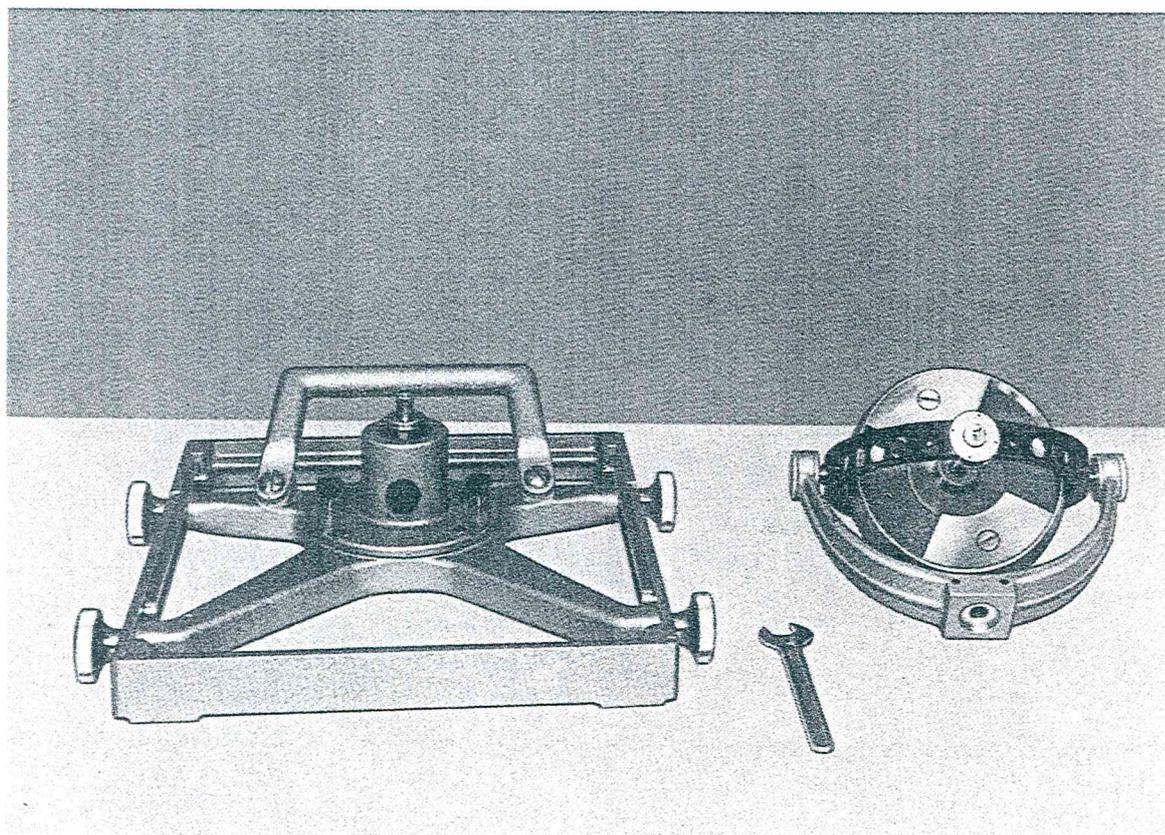


Fig. 80. L'appareil avant montage.

Une préparation correcte peut et doit permettre de réussir chaque expérience.

c) Instruction de montage

L'appareil gyroscopique est expédié, pour raison de meilleure protection durant le transport en pièces détachées (voir fig. 80), il doit donc être monté avant sa mise en place.

Pour le montage, la fourniture comprend une clé plate. On applique cette clé plate dans le carré du palier dans le châssis et on visse à la main le gyroscope avec son cadre extérieur à Cardan dans la partie fileté du palier, en maintenant la clé plate.

Lorsqu'on est au bout du filetage, on serre et bloque fortement. Pour ce faire, on applique la main gauche au milieu du cadre extérieur de Cardan, tandis que de la main droite on serre avec la clé (voir fig. 81). Le milieu de la partie cintrée du cadre extérieur de Cardan doit être maintenu à proximité du filetage. Un maintien des branches du cintre, donc des paliers des axes, pourrait déformer le cadre et coincer les paliers sensibles.

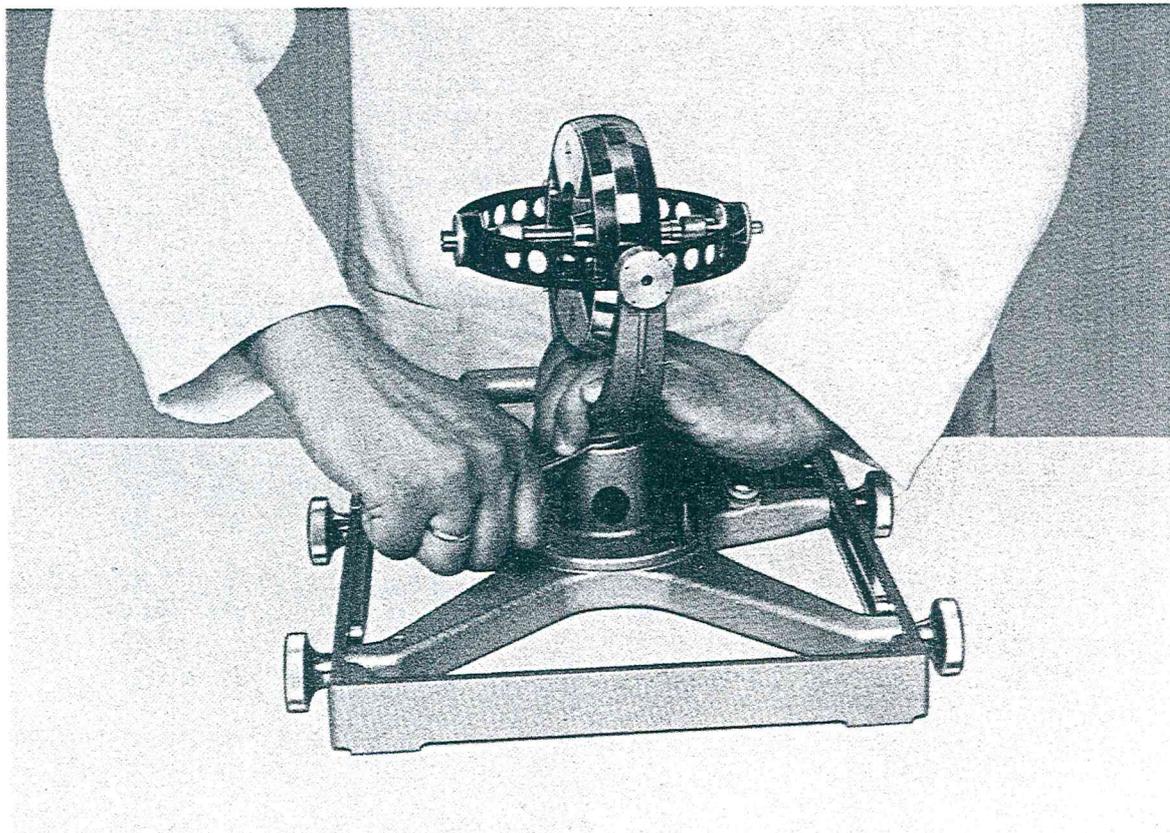


Fig. 81. Le serrage du filetage des paliers.