

## Aspects modernes des gyroscopes

---

On trouve souvent, à propos du gyroscope, deux types d'exposés :

- des exposés qui se veulent élémentaires d'où le calcul est banni et qui essaient de faire comprendre de façon intuitive un phénomène qui ne l'est absolument pas ; ces exposés contiennent le plus souvent des erreurs ou des insuffisances graves ;

- des exposés qui développent le formalisme mathématique avec rigueur mais ne mettent pas en évidence de manière claire le phénomène physique essentiel.

L'exposé qui suit développe l'« approximation gyroscopique » ce qui a l'avantage d'appréhender rapidement les notions fondamentales de *précession gyroscopique* et de *couple gyroscopique* avec un minimum de formulation mathématique.

H. G.

---

### 1. DEFINITION DES GYROSCOPES.

D'une manière très générale, nous appelons « gyroscope » tout appareil permettant d'effectuer une mesure de la rotation absolue de son boîtier, vis-à-vis de l'espace absolu. Les phénomènes physiques utilisés peuvent, *a priori*, être très variés ; propagation de la lumière cohérente (gyroscopes « laser », réf. (1), p. 525 à 536), résonance magnétique nucléaire (gyroscopes « à spin », réf. (1), p. 517 à 524), propriétés inertielles de la matière (gyroscopes « mécaniques »).

Cependant, à l'heure actuelle, il se trouve que les gyroscopes mécaniques sont, de très loin, les plus utilisés pour faciliter le pilotage et le guidage des véhicules terrestres, marins et aérospatiaux.

Ces appareils comportent toujours un organe mobile les rendant plus sensibles au mouvement angulaire de leur boîtier : rotor (ou « toupie ») tournant rapidement, lames vibrantes (gyroscopes « à diapason »), masses fluides en rotation (gyromètres fluidiques, réf. (1), p. 547).

Ici également, l'expérience a fait un choix : pour le guidage et le pilotage, les gyroscopes avec toupie assimilable à un corps solide sont pratiquement les seuls utilisés. Nous retrouvons ainsi la définition classique due à FOUCAULT : *le gyroscope est un appareil comportant un rotor tournant à grande vitesse et capable de mettre en évidence la rotation de son boîtier.*

Par ailleurs, nous appelons *roue à inertie* un appareillage mécanique comportant également un volant pouvant tourner, à grande vitesse, relié à une structure par un, deux ou trois axes de cardan. Leur constitution et leurs propriétés présentent une parenté évidente avec celles des gyroscopes ; par contre, elles diffèrent de ces derniers par leur masse, beaucoup plus importante. Celle-ci leur permet d'être utilisées comme générateur de couples, alors que les gyroscopes ne sont habituellement que des détecteurs de mouvement angulaire.

## 2. RAPPEL SUR LES PHENOMENES GYROSCOPIQUES.

Les propriétés d'une toupie en rotation rapide ne sont pas intuitives ; chacun de nous a été amusé ou déconcerté par les évolutions du jouet vendu sous le nom de *gyroscopie*, et par les réactions bizarres qui sont ressenties lorsqu'on le tient à la main, rotor lancé. Et pourtant, ces propriétés peuvent être logiquement déduites des lois de la mécanique rationnelle, auxquelles nous sommes directement et quotidiennement confrontés. Ce paradoxe tient au fait que nos expériences banales ne mettent généralement en jeu que de faibles vitesses angulaires absolues, ne provoquant pas l'apparition de phénomènes gyroscopiques.

Le comportement des appareils gyroscopiques de pilotage peut généralement être compris en utilisant les notions de *précession gyroscopique* et de *couple gyroscopique*. Ces concepts peuvent être reliés à la mécanique rationnelle, d'une manière simple, en faisant intervenir la notion d'*approximation gyroscopique*.

### 2.1. Approximation gyroscopique.

Considérons le mouvement angulaire d'un corps solide C, composé de points matériels M de masse  $m$ , autour d'un point fixe O. La mécanique rationnelle nous donne la définition de son moment cinétique par rapport à O :

$$(1) \quad \vec{H} = \sum \vec{OM} \wedge m \left[ \frac{d\vec{OM}}{dt} \right]_a$$

La dérivation de  $\vec{OM}$  a lieu après projection sur un trièdre centré en O et de vitesse angulaire absolue égale à zéro (trièdre « inertiel », du point de vue des mouvements angulaires).

Nous connaissons également l'expression ( $A_p$ ,  $B_q$ ,  $C_r$ ) des composantes de  $\vec{H}$  sur le trièdre principal d'inertie ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de C :  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sont respectivement les moments d'inertie de C vis-à-vis des axes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) et ( $p$ ,  $q$ ,  $r$ ) sont les composantes de la rotation instantanée absolue  $\vec{\Omega}$  de C, sur ces axes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Ces résultats peuvent être ainsi résumés :

$$(2) \quad \left\| \begin{array}{c} \vec{\Omega} \\ \Omega \end{array} \right\|_{xyz} = \left\| \begin{array}{c} p \\ q \\ r \end{array} \right\| \quad \left\| \begin{array}{c} \vec{H} \\ H \end{array} \right\|_{xyz} = \left\| \begin{array}{c} Ap \\ Bq \\ Cr \end{array} \right\| \quad (3)$$

D'une manière générale, les paramètres  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $p$ ,  $q$ ,  $r$  peuvent présenter des ordres de grandeur quelconques ; il s'ensuit que le vecteur rotation instantané  $\vec{\Omega}$  et le moment cinétique  $\vec{H}$  peuvent être de directions différentes. Par contre, si les conditions suivantes sont respectées :

$$A = B \sim C \quad (4) \quad (\Leftarrow \text{corps de révolution}/z)$$

$$p, q \ll r \quad (5) \quad (\Leftrightarrow (\Omega, z) \ll 1 \text{ radian}),$$

nous constatons que  $\vec{H}$  et  $\vec{\Omega}$  présentent des directions très voisines de celle de l'axe  $z$ .

L'approximation gyroscopique consiste précisément à admettre, pour le rotor du gyroscope, la condition :

$$(6) \quad \vec{H} // \text{axe } z, \quad \text{lié au rotor.}$$

Dans tous les gyroscopes de pilotage et de navigation en fonctionnement normal, cette condition est pratiquement vérifiée. En effet, les toupies utilisées sont de révolution par rapport à l'axe  $z$ , ce qui assure la condition  $A = B$  ; de plus, leur forme trapue donne le même ordre de grandeur à  $C$ . Par ailleurs, les vitesses de rotation adoptées ( $r$ ), autour de leur axe  $z$ , sont de l'ordre de plusieurs centaines de tours par seconde, à comparer aux composantes ( $p$ ,  $q$ ) de la rotation instantanée de l'axe  $z$  lui-même, de l'ordre de quelques degrés par seconde, dans les cas les plus défavorables. Considérons, par exemple, le cas d'un gyroscope utilisé dans une centrale de navigation par inertie pour avion ; nous avons :

$$\frac{Ap}{Cr} \simeq \frac{p}{r} \ll 1.$$

Par ailleurs, dans la majorité des cas, un moteur électrique agit sur le rotor du gyroscope pour maintenir sa vitesse de rotation par rapport au boîtier à une valeur sensiblement constante. Ceci nous permet d'admettre la condition supplémentaire suivante :

$$(7) \quad \left\| \begin{array}{c} \vec{H} \\ H \end{array} \right\| = \text{cte}$$

Cette relation est vérifiée avec une grande précision (meilleure que  $10^{-4}$ ) dans le cas de toupies entraînées par un moteur synchrone dont l'alimentation électrique est stabilisée en fréquence par quartz.

Les conditions simplificatrices précédentes impliquent que le moment cinétique  $H$  du rotor est confondu avec l'axe du rotor et a un module constant.

## 2.2. Dérive gyroscopique.

Considérons un rotor de gyroscope animé d'une rotation importante autour de son axe de révolution  $z$ , et respectant sensiblement les conditions ( $|\vec{H}| = \text{constante}$ ) et ( $\vec{H}/z$ ).

Notre problème est de connaître le mouvement angulaire de  $z$  lorsqu'on applique au rotor un système de forces assimilable à un couple  $\vec{C}_a$ . Pour continuer à respecter la condition ( $|\vec{H}| = \text{constante}$ ) nous choisissons  $\vec{C}_a$  perpendiculaire à  $z$ ; par ailleurs, nous devons limiter son module à une faible valeur, afin de rester dans l'approximation gyroscopique.

Appliquons le théorème du moment cinétique au rotor :

$$\text{vitesse absolue du moment cinétique} \quad \left[ \frac{d\vec{H}}{dt} \right]_a = \vec{C}_a \quad (9)$$

La condition (8) nous permet de considérer  $\vec{H}$  comme lié à  $z$ , et par suite de lui appliquer la relation :

$$\left( \frac{d\vec{H}}{dt} \right)_a = \vec{\Omega}_{xy} \wedge \vec{H} (*) \quad (10)$$

$\vec{\Omega}_{xy}$  étant la rotation instantanée de l'axe de la toupie ( $z$ ) perpendiculaire à cet axe.

$$\boxed{C_a = \vec{\Omega}_{xy} \wedge \vec{H}} \quad (11)$$

(\*) Cette relation est un cas particulier de la relation générale de dérivation vectorielle d'un vecteur quelconque, soit pour  $\vec{H}$  :

$$\left( \frac{d\vec{H}}{dt} \right)_a = \vec{\Omega} \wedge \vec{H} + \left( \frac{d\vec{H}}{dt} \right)_{(C)} \text{ où } \vec{\Omega} \text{ est le vecteur rotation}$$

$$\text{du solide et } \left( \frac{d\vec{H}}{dt} \right)_{(C)} \text{ la dérivée de } \vec{H}$$

dans le repère du solide C. Dans notre approximation, cette dernière dérivée est nulle,  $\vec{H}$  étant constant dans le repère du solide en vertu de l'approximation gyroscopique.

L'usage fait donner des appellations différentes à cette composante de rotation instantanée : lorsque  $\vec{\Omega}_{xy}$  est due à un phénomène déterministe et connu, on l'appelle *précession* (\*) gyroscopique ; lorsque  $\vec{\Omega}_{xy}$  est due à un phénomène aléatoire, ou bien que l'on ne maîtrise pas, on l'appelle *dérive* gyroscopique.

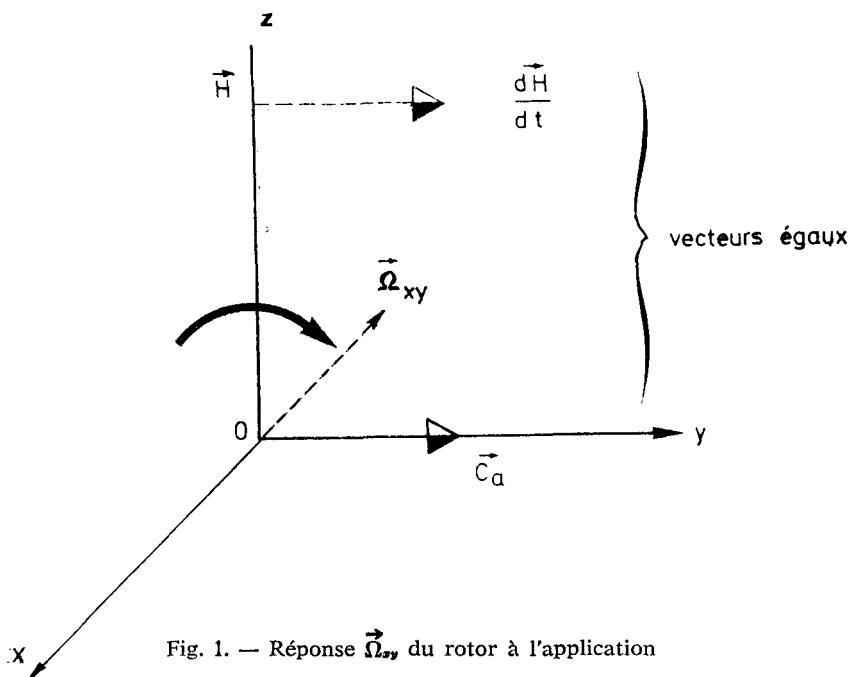


Fig. 1. — Réponse  $\vec{\Omega}_{xy}$  du rotor à l'application couple  $\vec{C}_a$  suivant y.

(\*) Cette signification du mot « précession » est donc différente de celles qui lui sont habituellement attribuées à propos des angles d'EULER, en mécanique rationnelle, ou bien des mouvements séculaires, en astronomie.

Nous obtenons finalement le résultat suivant :

L'application d'un couple  $\vec{C}_a$  à un rotor de moment cinétique  $\vec{H}$  vérifiant l'approximation gyroscopique provoque une rotation instantanée absolue  $\vec{\Omega}_{xy}$  de cet axe, obéissant à la relation :

$$\boxed{\vec{C}_a = \vec{\Omega}_{xy} \wedge \vec{H}} \quad (12)$$

### 2.3. Couple gyroscopique.

Considérons à nouveau l'expérience étudiée au paragraphe précédent. A l'application de  $\vec{C}_a$ , le rotor réagit par :

- une précession (ou une dérive)  $\vec{\Omega}_{xy}$  perpendiculaire à  $\vec{C}_a$ , d'après (12), conséquence du théorème du moment cinétique,
- un couple de réaction  $\vec{C}_r$ , opposé à  $\vec{C}_a$ , d'après le principe de l'égalité de l'action et de la réaction.

Nous obtenons donc :

$$\vec{C}_r = -\vec{C}_a = -\vec{\Omega}_{xy} \wedge \vec{H} = \vec{H} \wedge \vec{\Omega}_{xy} \quad (13)$$

Cette relation peut être ainsi interprétée : à l'application d'une rotation instantanée  $\vec{\Omega}_{xy}$ , le rotor réagit par un couple gyroscopique  $\vec{C}_r = \vec{H} \wedge \vec{\Omega}_{xy}$ , perpendiculaire à  $\vec{\Omega}_{xy}$ .

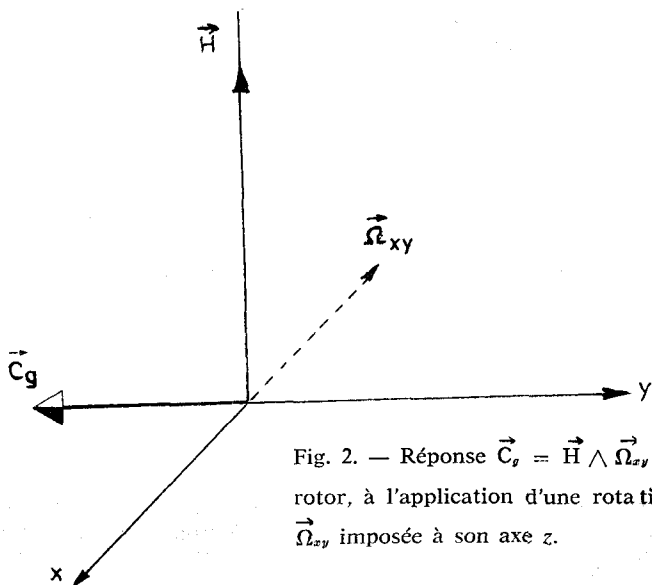


Fig. 2. — Réponse  $\vec{C}_r = \vec{H} \wedge \vec{\Omega}_{xy}$  du rotor, à l'application d'une rotation  $\vec{\Omega}_{xy}$  imposée à son axe z.

Ce couple gyroscopique  $\vec{C}_g$  dû à l'application de  $\vec{\Omega}_{xy}$  n'est pas plus intuitif que la précession (ou la dérive) gyroscopique due au couple appliqué  $\vec{C}_a$ . Ceci est dû à la perpendicularité de  $\vec{C}_g$  et  $\vec{\Omega}_{xy}$ , qui surprend nos habitudes.

Notons enfin que la notion de couple gyroscopique peut être introduite indépendamment de l'approximation gyroscopique, grâce au théorème de BEGHIN (réf. (9), p. 28).

## 2.4. Conclusion sur les phénomènes gyroscopiques.

Les actions mécaniques sur un rotor en rotation rapide peuvent être schématisées par deux *cas limites* : application d'un couple pur  $\vec{C}_a$ , ou bien d'une rotation instantanée  $\vec{\Omega}_{xy}$ , à son axe de révolution  $z$ . Il en résulte les réactions suivantes :

Application d'un couple  $\vec{C}_a \Rightarrow$  Précession (ou dérive)  $\vec{\Omega}_{xy}$  telle que :

$$\vec{C}_a = \vec{\Omega}_{xy} \wedge \vec{H}$$

Application d'une rotation instantanée  $\vec{\Omega}_{xy} \Rightarrow$  Couple gyroscopique :

$$\vec{C}_g \Rightarrow \vec{H} \wedge \vec{\Omega}_{xy}$$

Dans la majorité des cas, ces résultats permettent de comprendre le fonctionnement des appareillages gyroscopiques utilisés pour le pilotage et le guidage des véhicules, ainsi que les réactions de divers jouets (« gyroscope », diabolo, cerceau, etc.) et véhicules (bicyclette, avion à hélice, etc.) (réf. (8), p. 12).

Par contre, les concepts précédents ne permettent pas d'aborder les phénomènes où l'inertie transversale de la toupie joue un rôle important, tels que les vibrations « de nutation » des gyroscopes « 2 axes » (réf. (8), p. 23); ces appareils sont d'ailleurs conçus de telle sorte que ces phénomènes ne se produisent pas, tout au moins en cours de fonctionnement normal.

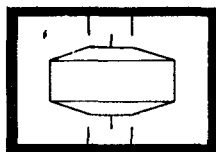
## 3. LES GYROSCOPES ACTUELS.

### 3.1. Généralités.

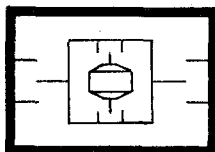
Le problème posé aux fabricants de gyroscopes et de roues à inertie peut être ainsi résumé :

a) donner au rotor un certain nombre de degrés de liberté angulaires : *un*, dans le cas des plus simples roues à inertie ; *deux* dans le cas des gyroscopes « 1 axe » ; *trois* dans le cas du

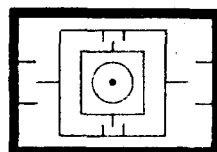
gyroscopie « 2 axes » (\*). Cette suspension du rotor doit être effectuée en minimisant l'incertitude régnant sur le moment des forces de suspension par rapport au centre de gravité du rotor ; les différents types de paliers étudiés dans ce but font l'objet du paragraphe 3.2 ;



a) roue à inertie  
1 axe rotor



b) gyroscopie « 1 axe »  
1 axe toupie z  
+ 1 axe



c) gyroscopie « 2 axes »  
1 axe toupie z  
+ 2 axes

Fig. 3. — Classification des appareillages gyroscopiques en fonction du nombre de degrés de liberté du rotor.

b) agir sur le rotor de manière à lui appliquer, suivant son axe z, un couple connu (cas des roues à réaction) ou une vitesse bien définie, en général constante (cas des gyroscopes).

Les moteurs utilisés sont généralement électriques, du type à courant continu et aimant permanent dans le cas des roues à inertie, et du type synchrone dans le cas des gyroscopes (\*\*). Les moments cinétiques obtenus sont de l'ordre de 0,001 et 0,1 Nms (\*\*\*) dans le cas des gyroscopes, et peuvent atteindre plusieurs dizaines de Nms dans le cas des roues à inertie ;

c) appliquer des couples connus à la toupie, suivant les axes de suspension autres que z, tout en maintenant la minimisation de l'incertitude régnant sur ces couples (condition a) ; ce résultat est souvent obtenu à l'aide d'un moteur électrique à courant continu et à aimant permanent, fonctionnant en prise directe sur sa charge, appelé *moteur-couple* ;

d) mesurer avec précision la position angulaire (rotor/boîtier) ; ceci est obtenu pour des appareils inductifs (cas le plus général), capacitifs, optiques, associés à des préamplificateurs électroniques souvent incorporés à l'appareil ;

(\*) Cette terminologie, respectée à 100 %, peut surprendre ; elle est due à ce que, dans la désignation des gyroscopes, le degré de liberté (obligatoire) du rotor, autour de son axe z, n'est pas pris en compte.

(\*\*) Signalons cependant l'existence de systèmes de lancement par ressort, par charge pyrotechnique, par action pneumatique et par fil.

(\*\*\*) Nms = Newton-mètre-seconde.



e) assurer à l'appareil une ambiance (thermique, magnétique, électrique, etc.) suffisamment stable pour qu'il conserve ses performances ; ce résultat est obtenu par certaines précautions de stockage, par divers blindages et systèmes électriques de régulation de température, souvent incorporés à l'appareil.

### 3.2. Modes de suspension des rotors.

#### a) PALIERS AVEC ROULEMENTS A BILLES (Réf. (1), p. 315 à 356).

Les roulements à billes de haute qualité sont encore largement utilisés pour matérialiser l'axe  $z$  des rotors ; ils sont généralement soumis à une précontrainte ajustée pour obtenir des raideurs axiale et radiale identiques ; ceci permet d'éviter l'apparition d'un défaut de centrage de l'équipage mobile, sous l'effet d'une accélération non gravitationnelle.

Par contre, en ce qui concerne les autres axes de suspension, l'utilisation de roulements à billes classiques n'a pas permis de réaliser des gyroscopes de dérive inférieure à quelques degrés par heure ; ceci a limité leur domaine d'application au pilotage (directionnels, horizons artificiels, gyromètres).

Il convient cependant de signaler un artifice, appelé activation, permettant de gagner un facteur supérieur à 10 sur les performances précédentes ; cet artifice consiste à insérer un anneau supplémentaire entre les deux bagues d'un roulement classique, et à faire subir à cet anneau un mouvement régulier de va-et-vient. Il en résulte l'élimination du frottement sec et un moyennage des frottements résiduels.

#### b) PALIERS AVEC PIVOT SUR PIERRE.

Il s'agit de pivots en acier extra-dur à faible coefficient de frottement supportés par des pierres (rubis ou saphir) ; le jeu entre pivot et pierre est réduit à quelques microns.

Ce mode de liaison présente l'avantage d'un très faible couple de frottement transmis d'une pièce à la suivante ; il est généralement utilisé pour guider un équipage mobile « flotté », c'est-à-dire immergé dans un liquide de densité choisie pour annuler le poids apparent de la partie suspendue, ce qui permet de soulager les pivots.

Ce procédé est très utilisé à l'heure actuelle, principalement pour la réalisation de gyroscopes « 1 axe » ; il permet d'obtenir des appareils de classe inertielle « avion » (un centième de degré par heure). Il est cependant de mise en œuvre relativement complexe, car la condition d'annulation du poids apparent de l'équipage mobile implique l'utilisation d'une température de fonctionnement bien définie (pour chaque type de gyroscope) et rigoureusement stabilisée (un centième de degré).

c) LIAISON « 2 AXES » PAR BARRES DE TORSION, AVEC ACCORD DYNAMIQUE (fig. 4).

La liaison (boîtier - toupie) est assimilable, dans son principe, à un joint de HOOKE, ou encore à une liaison par cardan dont les roulements à billes seraient remplacés par des barres de torsion. Lorsque la toupie ne tourne pas autour de son axe  $z$ , elle est soumise à un rappel élastique vers l'axe de rotation du moteur d'entraînement, dû à l'élasticité des barres de torsion ; par contre, lorsque la toupie tourne à une vitesse particulière, appelée vitesse d'accord, les forces d'inertie prenant naissance dans l'anneau de cardan équilibrent ce rappel élastique, en moyenne, sur chaque tour.

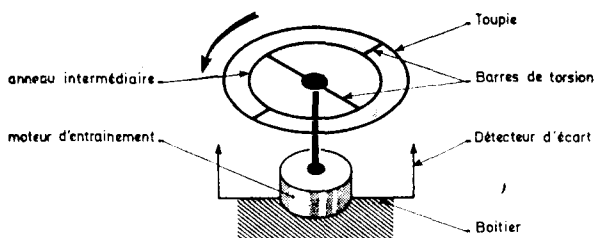


Fig. 4

Ce mode de liaison connaît une vogue croissante depuis plusieurs années ; il présente en effet de gros avantages : simplicité de conception (pas de liquide, pas de roulement à billes dans la partie sensible) et d'utilisation (moindre sensibilité thermique ; moteur toupie séparé de la partie sensible).

Dans certains appareils, un perfectionnement consiste à adjoindre un deuxième joint de HOOKE, décalé par rapport au premier d'un quart de tour, par rapport à l'axe de rotation du moteur ; il en résulte un meilleur équilibrage dynamique et une sensibilité moindre aux vibrations extérieures (3).

d) PALIERS A GAZ (Réf. (1), p. 357 à 374).

La liaison, sans contact solide, est réalisée par une couche gazeuse (hydrogène, hélium, etc.). Dans les paliers *hydrostatiques*, le gaz est fourni sous pression par une source extérieure, ce qui constitue une complication évidente ; par contre, dans le cas des paliers *hydrodynamiques*, c'est le mouvement relatif (toupie - carter) qui provoque, par viscosité, un entraînement des molécules gazeuses dans des rainures aménagées sur le carter.

Dès que le rotor atteint une vitesse angulaire de quelques tours par seconde, des surpressions le font décoller et assurent une liaison sans frottement. Lorsque la vitesse de la toupie atteint sa valeur nominale (quelques centaines de tours par seconde), il en résulte une liaison d'une rigidité comparable à celle des meilleurs roulements à billes. Leur réalisation pose des problèmes technologiques difficiles, car les entrefers à réaliser sont de quelques microns, et les inégalités de surfaces doivent rester nettement inférieures.

Les paliers à gaz hydrostatiques ont parfois été utilisés pour matérialiser l'axe extérieur d'un gyroscope « 1 axe ».

Par ailleurs, les paliers hydrodynamiques semblent appelés à un bel avenir, principalement dans le cas d'applications spatiales, en raison de leur haute fiabilité.

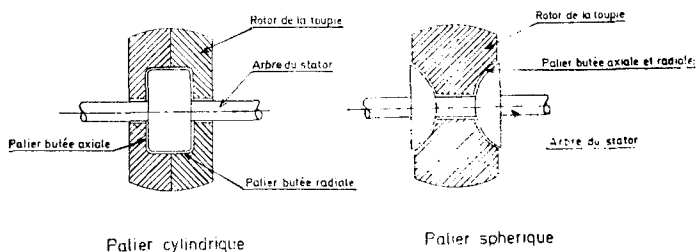


Fig. 5. — Exemples de palier à gaz.

e) SUSPENSION PAR CHAMP ÉLECTRIQUE (Réf. (2), chapitre 13).

Une bille sphérique, en béryllium (matériau conducteur d'une grande stabilité) est lancée à grande vitesse (1 000 tr/s), en présence d'un ensemble d'électrodes soumises à des potentiels permettant d'assurer sa suspension par action électrique, le tout fonctionnant dans un vide poussé ( $10^{-2}$  torr).

Ce type d'appareil, réalisé aux Etats-Unis, est étudié en France ; il présente des avantages potentiels comparables à ceux des gyroscopes hydrodynamiques : pas de contact mécanique, grande durée de vie. Il convient cependant de signaler la limitation en raideur de leur palier, due à la limitation des différences de potentiels réalisables sans claquage, entre électrodes et bille.

f) SUSPENSION MAGNÉTIQUE.

Un champ magnétique peut être utilisé :

- pour améliorer le centrage d'une liaison par pivot et pierre (Réf. (4), p. 112),
- pour réaliser le palier de certaines roues à inerties.

### g) SUSPENSION PAR FIL.

Ce procédé a été très utilisé pour la réalisation des compas gyroscopiques.

### 3.3. Roues à inertie.

Depuis fort longtemps, des inventeurs ont cherché à stabiliser un véhicule (monorail, navire...) par application directe d'un couple gyroscopique sur la structure considérée. Ces tentatives, bien qu'ayant conduit à des réalisations monstrueuses (rotors de plusieurs centaines de tonnes...) connurent un certain succès (Réf. (8), p. 56); ces dispositifs furent cependant remplacés par des pilotes automatiques, dans lesquels le rôle joué par le gyroscope est limité à celui de détecteur.

Il se trouve qu'à l'heure actuelle, ce procédé de pilotage par couple d'origine inertielle connaît une vogue nouvelle à propos des satellites et véhicules spatiaux. Sa vertu fondamentale est de permettre l'application de couples fort bien définis, *sans dépense de matière*.

Le matériel considéré prend alors le nom de roue à inertie; leur structure est celle d'un gyroscope de grandes dimensions, pouvant comporter un, deux ou trois axes (les dessins de la fig. 3 peuvent être considérés comme des représentations de roues à inertie); des méthodes de pilotages particulières (réf. (5) et (7)) peuvent être adaptées à chacun de ces cas.

La Société AÉROSPATIALE étudie et réalise différents types de roues à inertie « 1 axe » présentant les caractéristiques suivantes :

- rotors en alliage d'aluminium, fibres de verre, fibres de carbone,
- centrage radial magnétique passif,
- centrage axial magnétique actif,
- vitesse angulaire atteignant 30 000 tr/mn,
- moteur électrique à courant continu et à commutation électronique,
- couple atteignant 0,1 Nm,
- moment cinétique atteignant 100 Nms,
- durée de vie recherchée : supérieure à 10 ans.

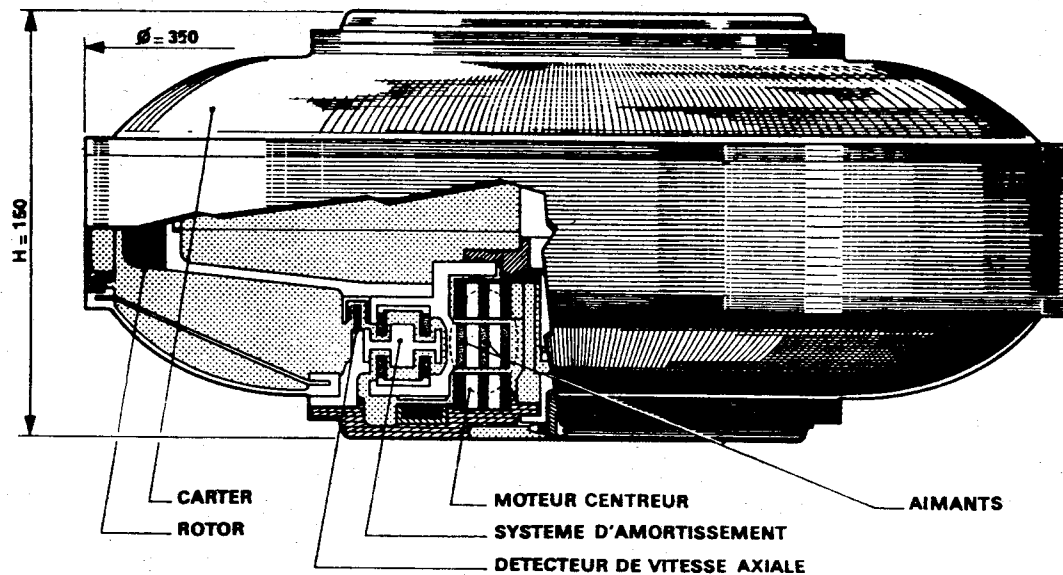


Fig. 6. — Configuration de principe d'une route à inertie.

### 3.4. Gyroscopes « 1 axe » (\*).

Ce type d'appareil (fig. 7) comporte essentiellement :

- un axe de *spin*  $z$  matérialisé par le palier (toupie-carter),
- un axe de *sortie*  $S$  matérialisé par le palier (carter-boîtier),
- un axe d'*entrée*  $E$ , non matérialisé, dont la direction est définie par la perpendiculaire à  $S$  et à  $z$ .

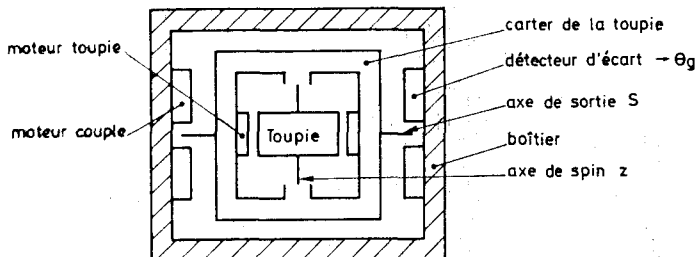


Fig. 7. — Représentation schématique d'un gyroscope « 1 axe ». Dans cette configuration, l'axe d'entrée  $E$  serait perpendiculaire au plan de la figure.

Le principe de fonctionnement des gyroscopes « 1 axe » repose essentiellement sur la notion de couple gyroscopique (§ 2.3). En effet, son signal de sortie  $\theta_g$  représente la position angulaire (carter/boîtier) ; or le mouvement de ce carter autour de  $S$  résulte d'un équilibre dynamique entre :

1° le couple d'inertie prenant naissance dans l'équipage mobile, comportant :

- un terme gyroscopique  $H\Omega_E$ ,  $\Omega_E$  étant la composante de la rotation instantanée du boîtier suivant l'axe d'entrée  $E$ ,
- un terme non gyroscopique, voisin de  $-I_g \ddot{\theta}_{ga}$ ,  $I_g$  étant le moment d'inertie de l'équipage mobile par rapport à l'axe de sortie  $S$ ,  $\ddot{\theta}_{ga}$  étant son accélération angulaire absolue projetée sur  $S$ ,

2° le couple  $\tau_g$  appliqué par le moteur-couple ou un ressort mécanique,

3° un éventuel couple de frottement visqueux  $-f_g \dot{\theta}_g$ ,  $f_g$  étant un coefficient constant et  $\dot{\theta}_g$  étant la vitesse angulaire relative carter/boîtier ; ce couple peut être dû à l'action d'un liquide de flottaison.

Il en résulte (Réf. (9), chapitre 3, § 2) dans les cas normaux de fonctionnement, l'existence d'une relation :

$$\theta_g = f(\Omega_E)$$

(\*) Voir problème page 113.

La forme de  $f$  dépend du type d'appareil utilisé :

a) s'il existe un rappel élastique  $-k_s \vartheta_s$ , ( $k_s$  étant une constante) et un amortissement suffisant du mouvement (carter/boîtier), nous avons :

$$(14) \quad \vartheta_s = \frac{H}{k_s} \Omega_E$$

Ce type d'appareil, appelé *gyromètre*, est très utilisé en pilotage (indicateur de virage, élément détecteur des pilotes automatiques) et en navigation (centrales inertielles sans plate-forme stabilisée); son domaine de mesure peut atteindre quelques tours par seconde,

b) s'il existe un fort amortissement visqueux sans rappel élastique, nous avons :

$$(15) \quad \vartheta_s = \frac{H}{k_s} \vartheta_E \quad \text{avec} \quad \vartheta_E = \int \Omega_E dt$$

$\vartheta_E$  représente le mouvement angulaire, supposé très petit, du boîtier autour de son axe d'entrée E.

Ce type d'appareil, appelé *gyromètre intégrateur*, est utilisé :

- d'une part, pour stabiliser les plates-formes porteuses d'accéléromètres, dans les centrales de navigation par inertie ; cette circonstance particulière leur permet de vérifier la condition de validité de (15),
- d'autre part, pour effectuer des mesures très précises de rotation instantanée dans les centrales de navigation inertielle sans plate-forme stabilisée, dites *strap-down*. Dans ce cas, il est monté « en gyromètre » ; la relation (15) est alors à remplacer par (14), car un rappel ( $-k_s \vartheta_s$ ) est obtenu par un asservissement (fig. 8).

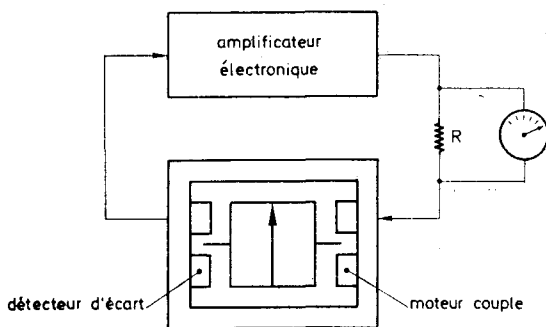


Fig. 8. — La mesure du courant  $i$  passant dans la résistance étalon  $R$  permet d'estimer le couple nécessaire pour équilibrer le couple gyroscopique  $H\Omega_E$ ; il en résulte une mesure de  $\Omega_E$ , car  $H$  est bien défini.

Le courant  $i$  peut être continu ou impulsif. Dans ce dernier cas, chaque impulsion est calibrée de manière à transporter une quantité d'électricité définie avec une grande précision, et correspondant à un écart angulaire également bien défini (par exemple : quelques secondes d'arc),

c) s'il n'existe ni rappel élastique, ni amortissement visqueux, nous avons :

$$(16) \quad \vartheta_s = \frac{H}{I_s} \int \vartheta_E dt$$

Ce type d'appareil, appelé *gyroscope intégrateur* (ou gyromètre doublement intégrateur) est utilisé dans les mêmes conditions que le gyromètre intégrateur. Cependant, il fait appel à des technologies très différentes, car l'axe de sortie, ne devant pas comporter de frottement visqueux, peut être réalisé par un palier hydrostatique ou par des roulements à billes (activés ou non).

Les performances des gyromètres intégrateurs et des gyroscopes intégrateurs sont exprimées par les *dérives* des plates-formes qu'ils stabilisent. On peut vérifier (Réf. (9), p. 76) que ces dérives sont imputables au couple parasite appliqué du boîtier sur l'équipage mobile, suivant l'axe de sortie ; ceci est à l'origine de la condition a) définie au § 3.1.

### 3.5. Gyroscopes « 2 axes ».

Dans ces appareils, également appelés « gyroscopes libres », la liaison (toupie/boîtier) laisse à l'axe  $z$  la possibilité de décrire un certain angle solide dans un trièdre lié au boîtier. Cet angle solide peut être limité à quelques degrés au carré ; il s'agit alors d'un appareil de zéro destiné à stabiliser une plate-forme, ou bien à être monté en gyromètres « 2 axes », par asservissement de son axe de spin à une direction liée au boîtier. Dans d'autres cas, cet angle solide peut être beaucoup plus grand (gyroscopes à cardan) ou même égal à  $4\pi$  stéradians (gyroscopes à suspension électrique).

Ils comportent essentiellement :

- une toupie et son moteur,
- des moteurs-couples, permettant d'appliquer à la toupie des couples perpendiculaires à son axe  $z$ , de façon à lui imposer une rotation instantanée absolue connue,
- des détecteurs d'écart permettant la mesure de l'orientation ( $z$ /boîtier).

Lorsqu'ils ne sont pas montés en gyromètre, leur principe de fonctionnement fait appel à la notion de *dérive gyroscopique*.



En effet, par construction, leur toupie n'est soumise, perpendiculairement à son axe  $z$ , qu'à un couple fort bien connu. Cet axe est donc animé d'un mouvement absolu également bien connu, d'après la relation (12) établie au paragraphe 2.1.

Un cas limite intéressant est celui où ce couple est nul, ce qui implique  $\vec{\Omega}_{xy} = 0$  et par suite, la fixité de la direction de  $z$  dans l'espace absolu.

Cette propriété, souvent appelée mémoire gyroscopique, est à l'origine de l'appellation familière « étoile en bouteille » quelquefois attribuée aux gyroscopes à suspension électrique de haute qualité.

### 3.6. Performances des gyroscopes.

Les performances des gyroscopes sont exprimées par une vitesse angulaire pouvant être interprétée, soit comme une erreur de mesure lorsque l'appareil est monté en gyromètre, soit comme une dérive. Dans tous les cas, ces défauts sont dus à la méconnaissance des couples appliqués à la toupie, suivant l'axe de sortie dans le cas du gyroscope « 1 axe », ou suivant le plan perpendiculaire à l'axe de spin, dans le cas des gyroscopes « 2 axes ».

Ces composantes de couple sont fonction d'un grand nombre de paramètres : rotation angulaire  $\vec{\Omega}$ , accélération angulaire  $\dot{\vec{\Omega}}$ , accélération non gravitationnelle  $\vec{A}$  du boîtier ; écart de la température ambiante, des niveaux des alimentations électriques vis-à-vis de leurs valeurs nominales, etc. Une représentation précise de ces phénomènes peut être obtenue sous la forme d'un développement limité, pouvant atteindre le troisième degré, en fonction des composantes des vecteurs  $\vec{\Omega}$ ,  $\dot{\vec{\Omega}}$ ,  $\vec{A}$ ... dans un trièdre lié au boîtier. L'étude statistique des coefficients correspondants est effectuée à partir de mesures pouvant durer fort longtemps et mettant en œuvre un matériel sophistiqué (alimentation stabilisée, tables asservies, centrifugeuses, etc.).

Nous nous limiterons ici, en considérant :

a) l'erreur de mesure des gyromètres souvent représentés, dans le cas des gyromètres de pilotage, par la somme d'une erreur absolue, de l'ordre de un pour cent à un pour mille du domaine de mesure, et d'une erreur relative de l'ordre de un pour cent à un pour mille. L'erreur absolue est due, en particulier, aux phénomènes étudiés aux paragraphes suivants (b) (c), à propos de la dérive des gyroscopes ; par ailleurs, l'erreur relative prend naissance principalement au niveau du générateur de couple élastique (rappel proportionnel à l'écart angulaire). Cette erreur est donc essentiellement fonction de la stabilité dans le temps

de ce générateur (ressort mécanique, aimant permanent de moteur-couple, etc.),

b) la « dérive propre », existant lorsque les vecteurs  $\vec{\Omega}$ ,  $\vec{\Omega}$ ,  $\vec{A}$  sont nuls. Son origine physique peut être très variée ; fils d'amenée de courant au moteur-toupie, défaut d'accord d'un gyroscope à accord dynamique, frottement au niveau des axes de cardan, action d'un champ magnétique résiduel, etc. Examinons, par exemple, l'ordre de grandeur du couple de frottement  $C$  tolérable, au niveau de l'axe de sortie d'un gyroscope « 1 axe » de classe  $10^{-3}$  degré par heure. En portant les valeurs numériques :

- moment cinétique  $H = 0,1 \text{ Nms}$ ,
- dérive tolérable  $D = 0,001^\circ/\text{heure}$

dans la relation :

$$(17) \quad C = HD \quad (\text{déduite de (10)})$$

nous obtenons :

$$(18) \quad C \simeq 0,1 \times 0,001 \times 4,85 \cdot 10^{-6} = 4,85 \cdot 10^{-10} \text{ Nms !}$$

c) la dérive « de balourd », proportionnelle aux composantes de  $\vec{A}$  perpendiculaires à  $z$ , due au défaut d'équilibrage de l'équipage mobile. Examinons, par exemple, la distance  $d$  tolérable, dans un gyroscope « 1 axe » à suspension par pivots, entre l'axe de sortie (matérialisé par les pivots) et le centre de gravité de l'équipage mobile, lorsque l'appareil est soumis au champ de la pesanteur  $g$  (\*). En portant les valeurs numériques :

- masse  $M = 0,3 \text{ kg}$ ,
- moment cinétique  $H = 0,1 \text{ Nms}$ ,
- dérive tolérable  $D = 0,001^\circ/\text{heure}$ ,

dans la relation :

$$(19) \quad Mgd = HD \quad (\text{déduite de (10)}),$$

nous obtenons :

$$(20) \quad d \simeq \frac{0,1 \times 0,001 \times 4,85 \cdot 10^{-6}}{0,3 \times 9,81} \simeq 2 \cdot 10^{-10} \text{ mètres !}$$

Il est aisé de concevoir quels peuvent être les soucis des fabricants cherchant à respecter des conditions telles que (18) et (20) ; ils doivent mettre en œuvre des matériaux particulièrement stables (béryllium, céramique...), des outillages complexes (machines à équilibrer automatiques...) et prendre des précautions draconiennes lors du montage des appareils (salles « propres »...).

Les résultats sont étonnamment bons : depuis quelques dizaines d'années, les dérives des meilleurs gyroscopes industriels, en ambiance de laboratoire, sont passées de quelques degrés par heure à  $10^{-3}$  et peut-être  $10^{-4}$  degrés par heure ; de plus, le ni-

---

(\*) Il s'agit d'un défaut « d'équilibrage statique ».

veau  $10^{-5}$  degrés par heure est visé, tout au moins aux Etats-Unis, pour la prochaine « génération » de gyroscopes.

Signalons enfin que les moyens industriels exceptionnels mis en œuvre pour obtenir ces résultats ont également permis d'améliorer sensiblement la *fiabilité* de ces appareils.

En effet, les meilleurs gyroscopes avec roulements à billes présentent une durée de vie et une durée moyenne entre pannes exprimées en milliers, ou même quelquefois en dizaines de milliers d'heures ; cette condition est spécialement importante dans le cas des applications spatiales, où les durées des missions sont précisément exprimées en dizaines de milliers d'heures. Par ailleurs, les gyroscopes ne mettant pas en jeu de contact solide (hydrodynamiques, etc.) peuvent présenter une fiabilité nettement supérieure.

### 3.7. Domaines d'application.

#### a) PILOTAGE.

Les *indicateurs de virage*, utilisés en particulier dans les avions de tourisme, sont des gyromètres « 1 axe » dont l'écart angulaire  $\theta$ , (équipage mobile/boîtier) est directement visualisé par un procédé mécanique.

Les *directionnels* sont des gyroscopes à « 2 axes » de cardan dont l'axe de spin reste sensiblement horizontal, constituant ainsi une référence inertielle d'azimut ; leur dérive, de l'ordre de quelques degrés par heure, nécessite une recalage périodique. Ils sont utilisés à bord des avions, des torpilles, etc.

Les *horizons artificiels* sont des gyroscopes à « 2 axes » de cardan, dont l'axe de spin reste sensiblement vertical. Un dispositif mécanique ou électro-mécanique permet de visualiser des mesures approchées du roulis et du tangage du véhicule considéré. Lorsque l'accélération du véhicule n'est pas trop importante, leur précision peut être meilleure que le degré.

Les *gyromètres de pilotage* (§ 3.4. a) constituent un élément essentiel des pilotes automatiques d'avion et de missiles, dont ils permettent d'amortir les mouvements angulaires.

#### b) RECHERCHE DU NORD GÉOGRAPHIQUE.

Les *chercheurs de nord* sont essentiellement des gyromètres dont l'axe d'entrée est asservi à balayer le plan horizontal local, ce qui leur permet de détecter les directions horizontales orthogonales à la rotation terrestre (\*), à condition toutefois que cette dernière soit correctement transmise à leur boîtier, ce qui exige une fixité absolue de l'appareil vis-à-vis du sol. Les chercheurs de nord rendent des services en topographie, préparation des tirs d'artillerie, principalement lorsque les autres procédés se

---

(\*) Ces directions sont l'est et l'ouest, ce qui permet d'en déduire une estimation du nord.

rèvent inapplicables (temps couvert, mines...); ils permettent d'obtenir une précision pouvant descendre en dessous de  $10^{-8}$  radians, à condition que l'on dispose d'une durée suffisante, supérieure à quelques minutes.

Les *compas gyroscopiques* sont essentiellement composés par une toupie dont l'axe de spin est soumis à un couple « érecteur » tendant à l'écartier (ou à le rapprocher) du plan horizontal local. Dans ces conditions, on peut montrer (Réf. (8), p. 74) que cet axe de spin a tendance à osciller de part et d'autre du plan méridien ; en présence d'un mouvement peu accéléré du boîtier, cette tendance est relativement peu perturbée, à condition que la période d'oscillation en question soit de l'ordre de  $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ ,  $R$  étant le rayon terrestre et  $g$  l'accélération de la pesanteur, soit environ 84 mn. Les compas gyroscopiques sont quelquefois utilisés à poste fixe, comme les chercheurs de nord ; mais ils ont trouvé leur application essentiellement comme compas, à bord des navires et sous-marins. Leur précision est de quelques dixièmes de degré.

Signalons enfin les montages appelés *gyro-compas orbitaux* (Réf. (5) (7)) ayant pour but, à bord d'un satellite, de matérialiser (ou de calculer) la direction perpendiculaire au plan orbital. Ces montages comportent essentiellement un ensemble de gyroscopes ou de roues à inertie associé à une référence de verticale (en général, un senseur d'horizon). Ils transposent le principe de fonctionnement des compas gyroscopiques, en remplaçant la rotation terrestre par la rotation absolue de la verticale locale, perpendiculaire au plan orbital.

### c) NAVIGATION.

Dans les centrales de navigation par inertie, des gyroscopes de haute précision sont utilisés, soit pour stabiliser une plateforme porteuse d'accéléromètres inertiels, soit pour mesurer à chaque instant l'attitude du véhicule.

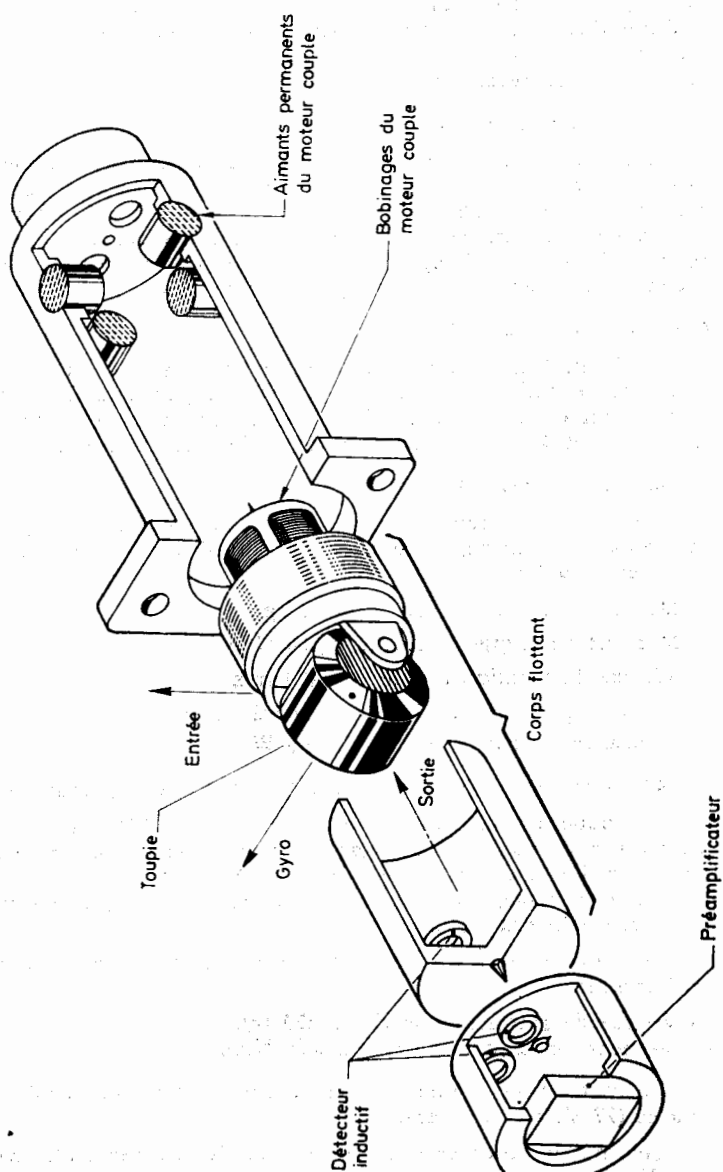
À bord des missiles balistiques, la classe de gyroscope devant être utilisée est fonction de la portée considérée.

Les ordres de grandeur des dérives tolérables sont les suivants :

— missile tactique .....	1 à $10^\circ/\text{h}$ ,
— missile stratégique de portée inter-médiaire .....	0,1 à $1^\circ/\text{h}$ ,
— lanceur de satellite .....	0,01 à $0,1^\circ/\text{h}$ .

À bord des avions et bâtiments marins, on peut montrer que l'erreur de point à long terme de la centrale inertielle est de l'ordre de  $RD$ ,  $R$  étant le rayon terrestre et  $D$  la dérive des gyroscopes utilisés. Par exemple, une centrale utilisant des gyroscopes de classe  $1/60^\circ/\text{h}$  dérivera en moyenne de  $1'$  d'arc/heure, soit 1 mille nautique par heure.

## GYROSCOPE F



Cette classe de matériel correspond aux missions à bord des avions ; par contre, dans le cas des navires et des sous-marins, la durée des missions, pouvant atteindre plusieurs semaines, fait rechercher des gyroscopes de classe  $10^{-3}$  ou  $10^{-4}$ /h et implique l'utilisation de recalages.

#### d) STABILISATION.

Outre les applications déjà citées (plates-formes inertielles et satellites avec roues à inertie), les gyroscopes sont utilisés dans certains cas, pour stabiliser les affûts de canons de char, les viseurs de bombardiers ou de télémètres marins, certains modèles réduits (bateaux, hélicoptères), et même des phares de motocyclettes, pour éviter le gaspillage d'énergie lumineuse !...

### 4. EXEMPLES DE GYROSCOPES.

L'échantillonnage qui va suivre ne prétend en aucune façon être représentatif de l'ensemble des gyroscopes actuellement en service. En effet, si les modèles 1 et 3 sont très répandus, les modèles 2 et 4 ne sont, à l'heure actuelle, que rarement utilisés.

#### 4.1. Gyromètres S.A.G.E.M., type F.

Il s'agit d'un gyromètre intégrateur « 1 axe » classique (§ 3.4 b) utilisé dans la marine, l'aéronautique (centrales inertielles de l'AIRBUS...) et les véhicules spatiaux.

- Masse ..... 165 g
- Moment cinétique ..... 0,004 Nms
- Vitesse de rotation toupie .. 400 tr/s
- Dérive : quelques centièmes de degré par heure
- Puissance consommée ..... 1,5 W

#### 4.2. Gyroscopes hydrodynamiques ALCATEL (Réf. (2), chapitre 11).

La coupe schématique de cet appareil (fig. 10) nous montre un rotor monté sur palier à gaz sphérique, mu par un moteur à induction. Les moteurs-couples agissent sur le rotor par actions locales de freinage, par courants de FOUCAULT, sur la jupe en métal non ferreux liée au rotor.

Le stator et le rotor peuvent être en acier, en céramique ou en béryllium.

- Vitesse de rotation : environ 320 tr/s,
- Moment cinétique : environ 0,06 Nms.

Le moteur d'entraînement est alimenté par une tension déphasée (27 Volts, 1 200 Hz).

Les moteurs-couples sont excités par des courants alternatifs (400 Hz).

Les détecteurs angulaires capacitifs sont excités par une tension alternative 100 kHz.

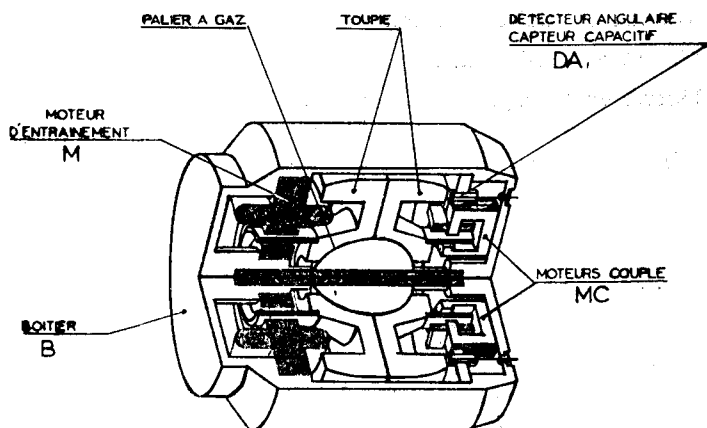


Fig. 10. — Coupe schématique du gyroscope.

#### 4.3. Horizon gyroscopique S.F.E.N.A., type 911 V 6.

Il s'agit d'un ensemble électro-mécanique comprenant essentiellement :

- un gyroscope « 2 axes » dont la toupie, portée par cardan, est soumise à un couple « érecteur » tendant à assurer le parallélisme de son axe de rotation  $z$  et de la verticale apparente locale,
- un système mécanique de visualisation permettant la lecture du roulis et du tangage correspondant à la verticale matérialisée par  $z$ .

Ce type d'appareil est largement utilisé sur avion.

Le dispositif fournissant le couple érecteur (fig. 11) est principalement composé de deux pendules instables (1-2), d'axes (3) parallèles à l'axe toupie, dont le débattement est limité par des butées (5-6). L'ensemble de ces pendules est entraîné par le mécanisme (4); il tourne lentement autour de  $z$ , dans le même sens que la toupie. On peut vérifier que le balourd mobile ainsi constitué assure, en moyenne, la verticalité de  $z$ .

- Précision : quelques dixièmes de degré
- Masse 1,67 kg
- Moment cinétique 0,39 Nms
- Vitesse de rotation 22 000 tr/mn

- Vitesse de poursuite de la verticale apparente :
  - écart angulaire à combler  $< 9^\circ$  :  $2,75^\circ/\text{mn}$
  - écart angulaire à combler  $\geq 9^\circ$  : 0
- Liberté en roulis totale
- Liberté en tangage
  - 106° vers le haut
  - 64° vers le bas
- Alimentation toupie 115 V 400 Hz 0,5 A

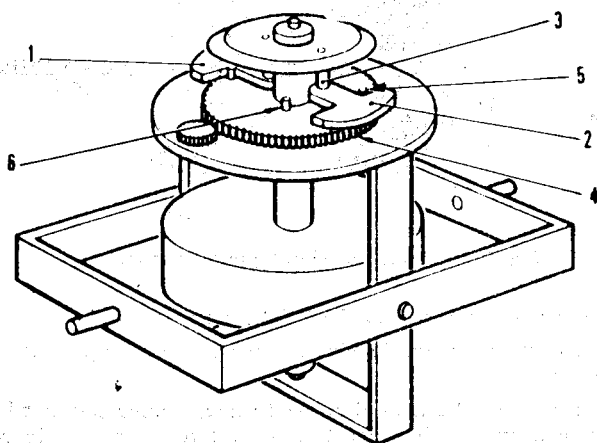


Fig. 11. — Schéma de principe d'un érecteur à pendules.

#### 4.4. Gyromètre fluide BERTIN.

Le principe de fonctionnement de cet appareil consiste à mesurer l'influence des forces d'inerties *dans un gaz*, associées à la combinaison d'un mouvement d'entraînement dû à un circuit fluide et de la rotation à mesurer (fig. 12).

En effet, la conservation du moment cinétique, autour de l'axe d'entrée, implique une augmentation de la vitesse de rotation du gaz, autour de cet axe ; il en résulte une augmentation de la pression dynamique, mesurable à l'aide de deux tubes de Pitot, excitant des amplificateurs fluidiques.

Cet appareil présente la particularité de ne comporter aucune pièce mécanique en mouvement ; sa simplicité de conception lui assure une grande fiabilité et un faible prix de revient.



— Diamètre	70 mm
— Longueur	80 mm
— Masse	0,250 kg
— Débit	15 l/mn
— Seuil	0,1°/s
— Domaine de mesure	360°/s
— Retard pur	10 ms
— Constante de temps	6 ms

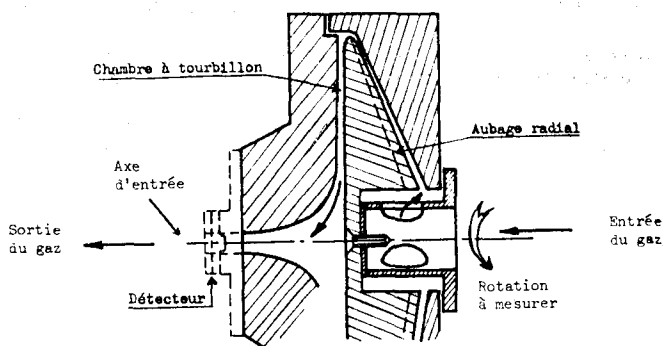


Fig. 12. — Coupe axiale d'un gyromètre fluide.

J.-C. RADIX,  
Aérospatiale (Les Mureaux).

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) AGARD. — Conference Proceedings n° 43.
- (2) AGARD. — Conference Proceedings n° 116.
- (3) CRAIG J.-G. — *I.E.E.E. Tr. on Aerospace and electronic systems*, May 1972 ; p. 280 : *Theory of operation of an elastically supported, Tuned gyroscope* ; p. 289 : *Theory of errors of a multigimbal, elastically supported, tuned gyroscope*.
- (4) FAURE P. — *Navigation inertielle optimale et filtrage statistique*, Dunod, 1971, 448 p.
- (5) GORDON R.-L. — *An orbital gyro compass heading ; reference for satellite vehicle* ; A.I.A.A. paper 64-238.

- (6) GRAY A. — *A treatise on gyrostatics and rotational motion*; Dover publication, Inc. New-York.
- (7) LYONS M.-G., LESBOCK K.-L., SCOTT E.-D. — *Double gimballed reaction wheel attitude control system for high altitude communication satellites*; A.T.A.A. paper n° 71-949.
- (8) RADIX J.-C. — *Le gyroscope et ses applications*, P.U.F., Collection « Que sais-je ? » n° 1 337, 128 p.
- (9) RADIX J.-C. — *Techniques inertielles*, Masson, 1972, 218 p.
- (10) SAVET P.-H. — *Gyroscopes theory and desing*, Mac Graw Hill.
- (11) WILLEMS P.-Y. — *Gyrodynamics, Euromech 38 colloquium* Springer verlag, Berlin Heidelberg New-York, 1974, 282 p.
- (12) WRIGLEY W., HOLLISTER W.-M., DENHARD W.-G. — *Gyroscopic theory, desing and instrumentation*; M.I.T. Press 1969, 444 p.