

3° Z
28960
(1337)

*que
sais-je?*

GPB
41

LE GYROSCOPE

PAR JEAN-CLAUDE RADIX



PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE

« QUE SAIS-JE ? »

LE SUJET DES CONNAISSANCES ACTUELLES

N° 1337

HISTOIRE GÉNÉRALE DE

LE GYROSCOPE

LE GYROSCOPE

Jour-Jardé BAINA

Éditions de la Librairie Universitaire de France
105, Boulevard Saint-Germain, Paris



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

105, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1960

07
960
1337/

DL--6 6 1969.09986

DU MÊME AUTEUR

La navigation par inertie, coll. « Que sais-je ? », n° 1235.

L'évolution des erreurs dans les centrales à inertie, *Doc Air Espace*, n° 104, mai 1967.

Distribution des ordres dans une stabilisation « trois axes », en configuration non canonique, *Doc Air Espace*, n° 110, mai 1968.

Les modèles réduits d'avions télécommandés par radio, *Sciences-Progress*, *La Nature*, avril 1968.

« QUE SAIS-JE ? »

LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

N° 1337

LE GYROSCOPE ET SES APPLICATIONS

par

Jean-Claude RADIX

Ingénieur à Sud-Aviation

Maître de conférences

à l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique

*Professeur à l'École Nationale Supérieure
des Télécommunications*



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

—
1969

« QUE SAIS-JE ? »

LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

N° 1387

LE CYROSCOPE

ET SES APPLICATIONS

Jean-Claude RADIX



Dépôt légal. — 1^{re} édition : 2^e trimestre 1969

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays

© 1969, Presses Universitaires de France

INTRODUCTION

Le comportement des *gyroscopes* passe pour capricieux. Effectivement, après avoir fait l'acquisition du jouet vendu sous ce nom, et après avoir mis sa toupie en rotation rapide, le profane ressent des réactions mécaniques bizarres et observe des mouvements inattendus. S'il cherche à élucider la question en attaquant un livre de mécanique rationnelle, le mystère risque de se trouver renforcé par la complexité d'une description *exacte* de ces phénomènes.

En fait, le fonctionnement de la majorité des appareils gyroscopiques peut être étudié correctement à partir d'une approximation (moment cinétique de la toupie parallèle à son axe de rotation) qui simplifie considérablement l'aspect théorique de la question. Cette approximation nous permettra de comprendre le principe de fonctionnement des jouets gyroscopiques (toupie, diabolo, cerceau) et de nombreux appareils gyroscopiques de navigation (directionnels, horizons artificiels, chercheurs de nord, compas gyroscopiques, centrales d'attitude...). Enfin, la notion de *couple gyroscopique* nous expliquera le rôle stabilisateur du gyroscope à bord d'un navire, d'un satellite ou d'une plate-forme stabilisée.

Nous verrons ainsi comment la technique actuelle a su exploiter un phénomène qui fut longtemps considéré comme une simple curiosité ⁽¹⁾.

(¹) Dans un souci de clarté, nous avons conservé pour les figures l'ancienne notation des vecteurs, alors que, dans le corps du texte, nous nous sommes conformés aux normes en vigueur.

INTRODUCTION

L'importance des travaux de ce genre est
cette fois-ci, à l'occasion de la publication de
ce livre, de nous en rendre compte et de
nous en rendre compte de la manière la plus
exacte possible. C'est à l'occasion de la
publication de ce livre que nous en rendons
compte de la manière la plus exacte possible.



En fait, le fonctionnement de ces
appareils gyroscopiques est très simple et
très facile à comprendre. C'est à l'occasion
de la publication de ce livre que nous en
rendons compte de la manière la plus exacte
possible. C'est à l'occasion de la publication
de ce livre que nous en rendons compte de
la manière la plus exacte possible.

Nous venons ainsi connaître la technique
à l'occasion de la publication de ce livre
que nous en rendons compte de la manière
la plus exacte possible.

En fait, le fonctionnement de ces
appareils gyroscopiques est très simple et
très facile à comprendre. C'est à l'occasion
de la publication de ce livre que nous en
rendons compte de la manière la plus exacte
possible.

CHAPITRE PREMIER

LES DEUX ASPECTS DE L'EFFET GYROSCOPIQUE

I. — Le moment cinétique d'une toupie en rotation

Nous appelons « toupie » (*gyro wheel, gyro rotor*) ⁽¹⁾ un corps de révolution autour d'un axe Δ susceptible d'être lancé en rotation rapide autour de cet axe. La masse des toupies peut varier de quelques dizaines de grammes, dans les appareils modernes de navigation, à une centaine de tonnes, dans certains dispositifs stabilisateurs de navires, d'ailleurs abandonnés à l'heure actuelle. Les vitesses de rotation usitées sont en général comprises entre : 10 tr/s, pour les toupies les plus grosses et 400 tr/s, dans les gyroscopes modernes.

Nous appelons « gyroscope » (*gyroscope, ou plus souvent gyro*) un appareil comprenant :

- un boîtier (*case*) ;
- une toupie ;
- un dispositif de suspension de la toupie dans le boîtier, lui donnant une certaine liberté angulaire ; ces dispositifs sont fréquemment constitués de cardans (*gimbals*).

(1) La terminologie anglo-saxonne sera précisée en italique à l'occasion de la première rencontre des termes les plus importants.

Le comportement d'une toupie en rotation rapide — et, par suite, celui d'un gyroscope en fonctionnement — peut être expliqué à partir de la notion de « moment cinétique » (*angular momentum*). Cette grandeur est un vecteur défini par :

- son support, coïncidant avec l'axe de rotation Δ de la toupie (1) ;
- son sens, déterminé par la règle dite « du tire-bouchon » (fig. 1) ;

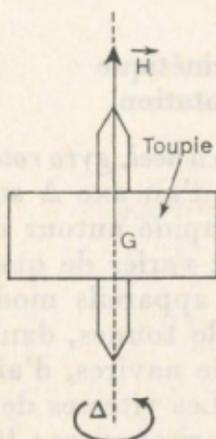


Fig. 1

Moment cinétique \vec{H} d'une toupie en rotation rapide. On pourra admettre que \vec{H} est attaché à l'axe Δ de la toupie.

- son module, proportionnel à la vitesse de rotation ω de la toupie autour de Δ et au moment d'inertie (2) I de la toupie par rapport à Δ ; on a : $H = I\omega$ (1).

(1) Il s'agit là d'une *approximation* d'autant plus valable que la rotation de la toupie autour de son axe est plus rapide ; cette approximation nous suffira très largement pour l'étude du fonctionnement de tous les appareils gyroscopiques.

(2) Rappelons que le moment d'inertie d'un corps solide composé de points matériels M , par rapport à un axe Δ , est égal à la somme $\sum m d^2$ dans laquelle :

m est la masse de chacun des points matériels considérés ;

d est la distance de M à Δ (la somme \sum est étendue à tous les points M du corps considéré).

Exemples. — Les valeurs numériques :

$$I = 100 \text{ g-cm}^2$$

$$\omega = 400 \text{ tr/s} = 400 \times 2\pi \text{ rd/s}$$

$$\text{conduisent à } H = 100 \times 400 \times 2\pi \simeq 2,52 \cdot 10^5 \text{ g-cm}^2/\text{s}.$$

L'ordre de grandeur de H peut varier beaucoup en fonction du type d'appareil considéré :

$H = 10^4 \text{ g-cm}^2/\text{s}$ dans le cas d'une toupie de gyroscope miniature ;

$H = 10^9 \text{ g-cm}^2/\text{s}$ dans le cas d'une toupie de compas gyroscopique pesant plusieurs kilogrammes ;

$H = 10^{12} \text{ g-cm}^2/\text{s}$ dans le cas d'une toupie pesant 100 t (stabilisateur de navire).

II. — La précession gyroscopique

Considérons une toupie en rotation rapide autour de son axe Δ , suspendue de manière à pouvoir tourner librement, dans toutes les directions, autour de son centre de gravité G . Quel est le mouvement de Δ lorsqu'on lui applique des efforts tendant à modifier sa direction ?

Rappelons le mode habituel de représentation de ces efforts ; ils peuvent toujours être assimilés à deux forces opposées (\mathbf{f}) et ($-\mathbf{f}$) formant un « couple » (*torque*) représenté par un vecteur \mathbf{C} (fig. 2) défini par :

- la direction de son support, perpendiculaire au plan défini par les supports (d) et (d') des forces (\mathbf{f}) et ($-\mathbf{f}$) ;
- son sens, déterminé par la règle dite « du tire-bouchon » ;
- son module, proportionnel à f et à la distance l séparant d et d' ; on a : $C = fl$ (2).

Le couple tendant à modifier la direction de Δ est donc perpendiculaire à cet axe (fig. 3),

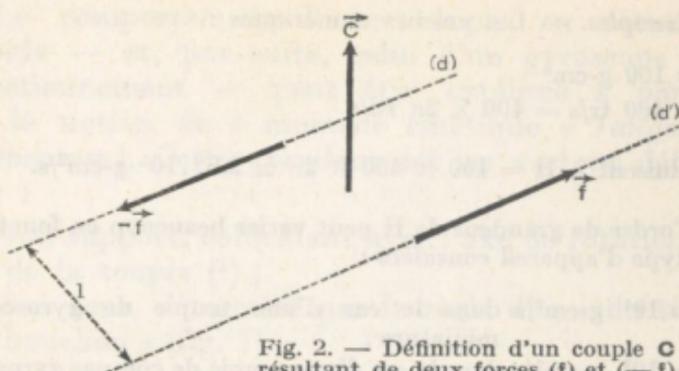


Fig. 2. — Définition d'un couple C résultant de deux forces (f) et ($-f$)

Le mouvement de Δ , sous l'action d'un couple C qui lui est perpendiculaire, est déterminé par la règle suivante :

La vitesse absolue ⁽¹⁾ dH/dt du moment cinétique de la toupie est égale au couple appliqué C .

On a :

$$\frac{dH}{dt} = C \quad (3)$$

Ce résultat, dû à l'application du « théorème du moment cinétique », est une conséquence des lois fondamentales de la mécanique rationnelle ⁽²⁾ ; il nous suffira pour expliquer le comportement de nombreux appareils gyroscopiques ⁽³⁾.

Un cas important est celui où le couple appliqué C est pratiquement nul : cette condition, recher-

⁽¹⁾ Il s'agit de la vitesse de H , rapporté à un trièdre d'orientation fixe par rapport aux étoiles. Rappelons que les composantes de la vitesse d'un vecteur A par rapport à un trièdre (τ) , sont obtenues par dérivation des composantes de A sur (τ) .

⁽²⁾ La démonstration de cette règle se trouve dans tous les cours de mécanique rationnelle.

⁽³⁾ Un moyen mnémotechnique, pour trouver dans quel sens va se déplacer H , consiste à penser que H (de module constant) cherche à s'aligner sur C .

chée dans les gyroscopes « libres », conduit à la relation ($\mathbf{H} = \text{cte}$) impliquant pour Δ une orientation fixe par rapport aux étoiles. Cette propriété confère au gyroscope libre le caractère d'un *repère angulaire spatial*.

Les vecteurs \mathbf{C} et \mathbf{H} étant perpendiculaires, il en résulte pour \mathbf{H} (et Δ), une vitesse de rotation de module C/H . Par exemple :

si $H = 10^5 \text{ g-cm}^2/\text{s}$;

et $C = 1 \text{ dyne-cm}$;

on a $C/H = 10^{-5} \text{ rd/s} \simeq 2,06^\circ/\text{h}$.

Cette vitesse de rotation prend le nom de *précession* (*precession*) lorsqu'elle est voulue (ou prévue) par l'utilisateur, ou de « *dérive* » (*drift*), lorsqu'elle constitue un phénomène parasite.

Considérons l'axe (D) de cette vitesse de rotation (fig. 3) ; il est *perpendiculaire* à \mathbf{C} ; il ne lui est

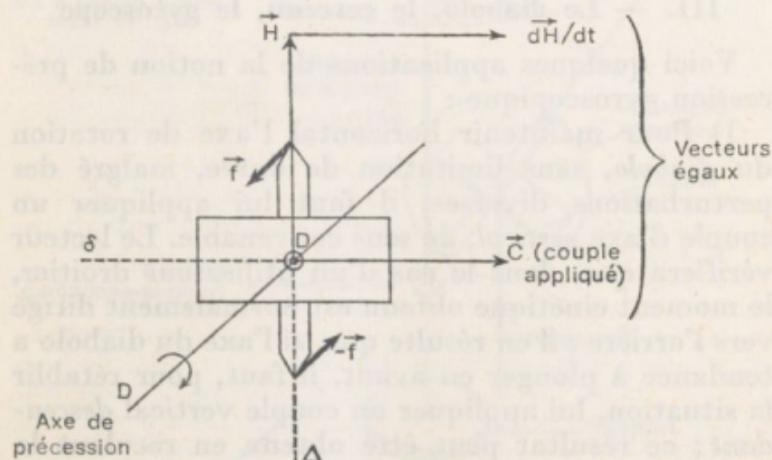


Fig. 3. — Précession de l'axe d'une toupie, sous l'action d'un couple \mathbf{C} :

\mathbf{H} et \mathbf{C} sont dans le plan de la figure ;

\vec{f} , $-\vec{f}$ et D (axe de précession) sont perpendiculaires au plan de la figure.

donc pas parallèle *comme cela se produirait si la toupie n'était pas en rotation autour de Δ* .

Ceci nous explique le comportement en apparence paradoxal de la toupie, sous l'action du couple \mathbf{C} ($\perp \Delta$) : *on s'attend à ce que Δ tourne autour du support de \mathbf{C} , et en fait, Δ tourne autour de (D) perpendiculaire à \mathbf{C} .*

Intéressons nous maintenant aux couples parallèles à Δ , appliqués à la toupie. Ces couples ont pour origine, d'une part, l'action du moteur entraînant la toupie, et d'autre part, les frottements, tendant à ralentir la rotation de la toupie. En fonctionnement normal, le moteur a pour mission de conserver la constance de la vitesse de rotation ω de la toupie autour de son axe. La résultante (\mathbf{C}_A) des couples appliqués à la toupie suivant Δ est alors nulle ; les conditions $\omega = \text{cte}$, $H = \text{cte}$, $\mathbf{C}_A = 0$ sont d'ailleurs en accord avec la règle $d\mathbf{H}/dt = \mathbf{C}$. Dans la suite, sauf avis contraire, nous considérerons donc seulement les couples appliqués à la toupie *perpendiculairement à son axe*.

III. — Le diabolo, le cerceau, le gyroscope

Voici quelques applications de la notion de précession gyroscopique :

- 1) Pour maintenir horizontal l'axe de rotation du *diabolo*, sans limitation de durée, malgré des perturbations diverses, il faut lui appliquer un couple d'axe *vertical*, de sens convenable. Le lecteur vérifiera que, dans le cas d'un utilisateur droitier, le moment cinétique obtenu est normalement dirigé vers l'arrière ; il en résulte que, si l'axe du diabolo a tendance à plonger en avant, il faut, pour rétablir la situation, lui appliquer un couple vertical *descendant* ; ce résultat peut être obtenu en reculant la baguette droite par rapport à la baguette gauche ;
- 2) Le moment cinétique \mathbf{H} d'un cerceau en mouvement est sensiblement horizontal ; il est dirigé vers la gauche de l'utilisateur. Pour modifier

sa direction, il faut donc lui appliquer un couple d'axe horizontal, de direction avant-arrière (ou arrière-avant). Le lecteur vérifiera que, pour obtenir un virage à droite, il suffira de lui appliquer un effort latéral, au voisinage de son sommet vers... la droite!... (La précession est alors due à l'action du couple résultant de cet effort et de la réaction du sol) ;

3) En ce qui concerne le *gyroscope* (jouet) la précession est due à l'action du couple résultant de son poids (mg) et de la réaction de son support (fig. 4).

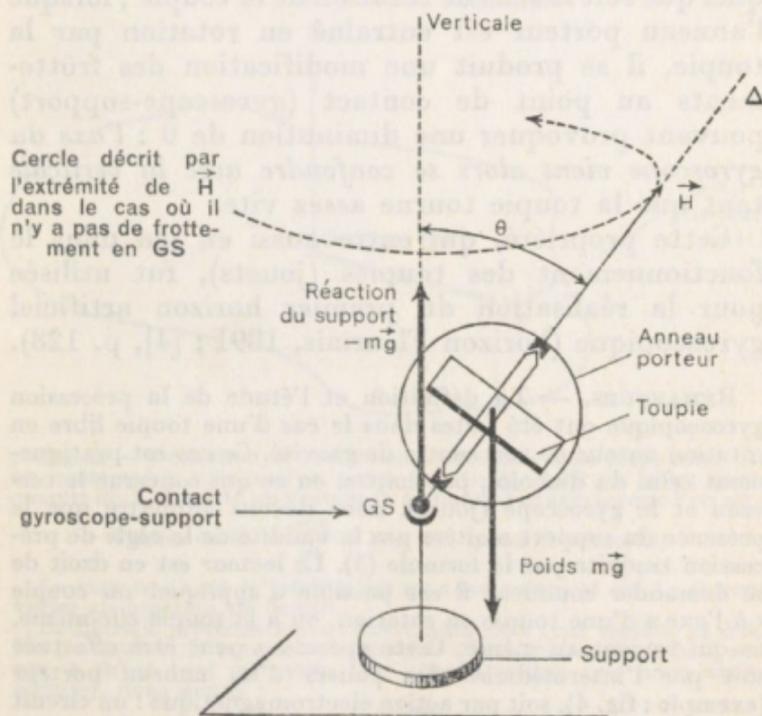


Fig. 4. — Précession du gyroscope (jouet) sous l'action de son poids et de la réaction de son support

H est dans le plan de la figure ; le couple C , résultant du poids et de la réaction du support est perpendiculaire au plan de la figure.

Que sais-je?

Collection dirigée par Paul Angoulvent

Derniers titres parus

1314. **L'unité allemande** (P. AYÇOBERRY).
1315. **Les Guyanes** (M. DEVÈZE).
1316. **Les accélérateurs de particules** (D. BOUSSARD).
1317. **Le mercure** (Cl. DUVAL).
1318. **La thermo-analyse** (M. HARMELIN).
1319. **Les présocratiques** (J. BRUN).
1320. **La géodésie** (M. DUPUY et H.-M. DUFOUR).
1321. **L'économie de l'Espagne** (M. DRAIN).
1322. **L'utilisation des microbes** (P. MANIL).
1323. **Le commerce extérieur** (A. BAVELIER).
1324. **La conduite des automobiles** (J. RIVES).
1325. **Les mots savants** (P. GUIRAUD).
1326. **Les prêts hypothécaires** (C. ALPHANDÉRY).
1327. **Le droit public** (A. DEMICHEL et P. LALUMIÈRE).
1328. **Histoire du Japon (des origines à Meiji)** (M. VIÉ).
1329. **La balance des paiements** (J. WEILLER).
1330. **La pollution atmosphérique** (P. CHOVIN et A. ROUSSEL).
1331. **Histoire de la colonisation allemande** (R. CORNEVIN).
1332. **Le contrat de travail** (Cl. ORLIAC).
1333. **Les grandes dates de l'histoire de la musique** (N. DUFOURCQ, M. BENOIT et B. GAGNEPAIN).
1334. **Les méthodes en sociologie** (R. BOUDON).
1335. **Le rein et ses maladies** (B. ANTOINE et H. DUCROT).
1336. **Le calcul tensoriel** (A. DELACHET).
1337. **Le gyroscope et ses applications** (J.-Cl. RADIX).
1338. **Histoire de l'ethnologie** (J. POIRIER).
1339. **Ciments et bétons** (M. VÉNUAT).
1340. **Histoire des doctrines politiques en Grèce** (Cl. MOSSÉ).
1341. **Le perfectionnement des cadres** (R. VATTIER).
1342. **Les maladies endocrinienne** (J. DECOURT).
1343. **Grammaire du grec moderne** (A. MIRAMBEL).
1344. **Les transports urbains** (Chr. GÉRONDEAU).
1345. **Histoire des doctrines politiques aux Etats-Unis** (Y.-H. NOUAILHAT).
1346. **Les grandes dates de la littérature française** (A. CHASSANG et Ch. SENNINGER).
1347. **La radioprotection** (P. BONETMAURY).
1348. **Peintures et vernis** (G. NEDEY).
1349. **Le profit** (A. BABEAU).
1350. **Les grandes dates des littératures étrangères** (G. WEIL et J. CHASSARD).
1351. **Le contrôle de gestion** (J. MEYER).
1352. **Géographie de la Belgique et des Pays-Bas** (R. SEVRIN).
1353. **La statique** (A. RICCI).
1354. **Grammaire de l'espagnol** (B. POTTIER).
1355. **La littérature arabe** (A. MIQUEL).
1356. **Le droit de la construction** (R. SAINT-ALARY).
1357. **Le calcul scientifique** (G. CANEVET).
1358. **L'immunologie** (A. DELAUNAY).
1359. **Les méthodes en psychologie** (M. REUCHLIN).
1360. **Le droit de la radio et de la télévision** (Ch. DEBBASCH).
1361. **La magnétohydrodynamique** (Cl. THIRRIOT).

Participant d'une démarche de transmission de fictions ou de savoirs rendus difficiles d'accès par le temps, cette édition numérique redonne vie à une œuvre existant jusqu'alors uniquement sur un support imprimé, conformément à la loi n° 2012-287 du 1^{er} mars 2012 relative à l'exploitation des Livres Indisponibles du XX^e siècle.

Cette édition numérique a été réalisée à partir d'un support physique parfois ancien conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal. Elle peut donc reproduire, au-delà du texte lui-même, des éléments propres à l'exemplaire qui a servi à la numérisation.

Cette édition numérique a été fabriquée par la société FeniXX au format PDF.

La couverture reproduit celle du livre original conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal.

*

La société FeniXX diffuse cette édition numérique en accord avec l'éditeur du livre original, qui dispose d'une licence exclusive confiée par la Sofia – Société Française des Intérêts des Auteurs de l'Écrit – dans le cadre de la loi n° 2012-287 du 1^{er} mars 2012.

Avec le soutien du

