

NAVIGATION

—•—
Revue Technique de
Navigation Maritime
Aérienne et Spatiale



TRIMESTRIELLE

VOL. 32

NUMÉRO 126

AVRIL 1984

A LA RECHERCHE DU GYROSCOPE PARFAIT :

LE GYROSCOPE A SUSPENSION ÉLECTROSTATIQUE¹

par Pierre LÉGER
INGÉNIEUR SOCIÉTÉ SAGEM

et François BIHAN
INGÉNIEUR DE L'ARMEMENT
SERVICE TECHNIQUE DES CONSTRUCTIONS ET ARMES NAVALES

1 INTRODUCTION

La performance de précision d'un système de navigation par inertie à base de gyroscopes et d'accéléromètres, embarqué sur un navire (vitesse de déplacement faible comparée à un aéronef ou un engin), est essentiellement dépendante de la performance des gyroscopes de la centrale associée.

Les gyroscopes constituent en quelque sorte des mémoires physiques angulaires d'espace et la lente évolution incontrôlée de ces mémoires - la dérive *aléatoire* des gyroscopes - nécessite que la centrale, normalement autonome, soit « recalée » à intervalles réguliers pour que les erreurs de position restent dans des limites raisonnables.

La technologie du *gyroscope à suspension électrostatique* (nous l'appellerons désormais G.S.E.) est, à ce jour, la technologie la plus prometteuse dans le domaine de la très haute performance de stabilité de dérive.

Ce gyroscope peut être considéré comme une véritable « étoile en bouteille ».

Le présent article décrit les techniques utilisées et présente un développement français, demandé par le Service Technique des Constructions et Armes Navales à la Société SAGEM, spécialiste de la navigation inertielle, en particulier pour la très haute précision.

2 PRINCIPES ET INTÉRÊT DU GYROSCOPE A SUSPENSION ÉLECTROSTATIQUE (G.S.E.)

2,1 Le G.S.E. est un gyroscope mécanique à deux degrés de liberté dont le rotor, élément sensible de l'appareil, est constitué d'une bille sphérique métallique en rotation rapide autour de son axe principal d'inertie. Cette bille est suspendue, par *attraction électrostatique*, au moyen de tensions électriques appliquées sur un ensemble d'électrodes métallisées sur la face interne d'une cavité (verre ou céramique) contenant cette bille. La bille en rotation est sans contact physique avec les parties fixes, un entrefer (de quelques microns à quelques dizaines de microns) étant aménagé entre la bille et l'intérieur de la cavité.

Les forces d'attraction électrostatiques étant, pour un conducteur, normales aux surfaces, il s'ensuit que si la bille en rotation est parfaitement sphérique, elle est soustraite à tout couple parasite indésirable. C'est le gyroscope idéal.

Un vide très poussé évite les claquages entre bille et électrodes, et supprime les couples parasites d'origine aérodynamique; ce vide est entretenu à quelques 10⁻⁸ mm de mercure.

Le couple de ralentissement de la bille est très faible, sa constance de temps de ralentissement est de quelques années; très peu d'énergie suffit à entretenir sa rotation.

Par ailleurs, un blindage magnétique extérieur est associé au gyroscope pour le soustraire aux couples perturbateurs d'origine magnétique. La bille est avantageusement constituée d'un métal amagnétique ultrastable et de faible densité : le béryllium.

¹ Appelé aussi Gyroscope à Suspension Électrique, en abrégé G.S.E. < Electrostatically Suspended Gyroscope » en anglo-saxon, ou E.S.G.

2,2 L'attraction électrostatique, comme l'attraction magnétique, est sous sa forme élémentaire, un phénomène instable (attraction jusqu'à « collage » des pièces). Pour suspendre, de façon stable, la bille du G.S.E., l'on a recours à un véritable asservissement de position, centrant la bille dans la cavité selon trois directions X, Y et Z. C'est l'électronique de suspension associée au gyroscope qui, grâce aux progrès technologiques de ces dernières années, occupe un volume raisonnable au regard de la partie mécanique proprement dite du gyroscope. Les électrodes sont utilisées pour détecter la position de la bille et pour exercer les forces de recentrage (fonction détection et fonction action); ceci a constitué une des difficultés technologiques à résoudre.

La bille étant ainsi suspendue sans liaisons avec son support, gardera une orientation inertielle fixe, quels que soient les mouvements du boîtier : on a ainsi réalisé une « étoile en bouteille ».

La position angulaire de l'axe de rotation (c'est-à-dire du moment cinétique de la bille) doit être connue avec une très grande précision pour ne pas dégrader les qualités du système. La fonction de détection angulaire qui permet d'atteindre cet objectif est réalisée à l'aide d'électrodes fixes sur le boîtier du gyroscope.

2,3 Le G.S.E. est par nature, typiquement, un gyroscope composant lié (strapdown en anglo-saxon), sans limitation théorique due à la vitesse angulaire de son boîtier externe. Cependant, pour les applications de grande précision, le G.S.E. est utilisé en appareil de zéro, embarqué sur le cœur d'une centrale à cardans asservis. Ainsi, le boîtier du gyroscope est asservi à la direction fixe de l'axe de spin du gyroscope, ce qui a pour effet de simplifier et de réduire les couples parasites de nature électrostatique, liés aux très faibles défauts de forme de la bille. La fonction détection de position, attachée également au gyroscope, permet la commande des asservissements de cardans sur lesquels sera placé l'appareil.

Dans cette application, il n'est requis qu'une plage limitée de détection angulaire, selon deux directions orthogonales, le G.S.E. étant bien ainsi un gyroscope libre à deux degrés de liberté.

Cette détection angulaire est réalisée

- soit par des capteurs optiques visant des motifs imprimés au pôle et à l'équateur de la bille;
- soit par un traitement approprié des signaux de suspension de la bille, modulés par un faible balourd radial volontaire (obtenu de construction) de la bille.

2,4 Les avantages de ce type de gyroscope, dans l'application navigation maritime, sont les suivants

- grande simplicité physique de l'élément sensible (une seule pièce très précise); cette simplicité - sphère monobloc ou quasi monobloc - aide à l'obtention d'une stabilité dimensionnelle et géométrique de la bille sphérique;
- couples perturbateurs très faibles et modélisables ²;
- fiabilité limitée par celle de l'électronique (aucune usure des composants mécaniques);
- aucune pollution du gyroscope ².

2,5 Le G.S.E. présente cependant quelques inconvénients liés aux principes physiques mis en oeuvre

- capacité de tenue aux accélérations limitées compte tenu des phénomènes de claquage qui apparaissent inévitablement au-delà d'un certain champ électrique appliqué; des accélérations de 5 à 10 g, voire plus, peuvent être cependant tolérées;
- délai de mise en oeuvre relativement long, comparé à ceux des gyroscopes classiques : suspension de la bille, mise en rotation et amortissement des nutations, stabilisation thermique, calibration; ce délai est malgré tout tolérable, compte tenu des précisions désirées et des durées acceptables d'initialisation des systèmes de navigation marine;
- aucune possibilité de commande précise de précession de l'axe de spin par un moteur - couple, sans affecter la performance de dérive, compte tenu de l'échauffement correspondant de la bille qui, étant suspendue dans le vide, sera longue à retrouver un nouvel équilibre thermique;
- nécessité de maintenir la bille « inertielle », ce qui impose, en plate-forme asservie, que le cœur de la plate-forme soit également inertielle et que les accéléromètres travaillent dans la plage ± 1 g au lieu de ne mesurer que l'accélération de propulsion comme sur les centrales classiques dites de Schuler où le cœur reste asservi au plan horizontal local;

² On peut ainsi mesurer le pas fait par rapport aux gyroscopes mécaniques classiques.

- nécessité d'incorporer une pompe ionique (ou un getter) pour maintenir l'ultra-vide et son alimentation haute tension correspondante.

2,6 Compte tenu de tous ces éléments et des études et réalisations effectuées à ce jour, il apparaît que ce type de gyroscope, utilisé en appareil de zéro sur une centrale inertielle à cardans, est le seul candidat qui permette d'atteindre des stabilités de dérive de 10^{-5} /10-5 degré par heure, sur des périodes de quelques jours à quelques semaines.

Considérons d'abord, les réalisations connues, celles dont font état les programmes engagés aux États-Unis.

3 LES RÉALISATIONS CONNUES AUX ÉTATS-UNIS

Le G.S.E. a été < imaginé > vers 1952, par le Professeur Arnold NORDSIECK de l'Université de l'Illinois. A l'époque, il est né de l'idée qu'il serait nécessaire de disposer d'un moyen approprié et précis pour la navigation des sous-marins lanceurs de missiles balistiques qui étaient projetés à l'époque. On observera que l'application opérationnelle de ce gyroscope n'a été en définitive faite qu'après la génération des gyroscopes flottants qui se sont avérés suffisamment précis pour répondre aux premiers besoins dans un délai raisonnable.

D'abord curiosité de laboratoire, il a fait l'objet de premières études vers 1956, à la General Electric et à Honeywell, sous contrats de la Navy.

L'Air Force s'est alors intéressée à ce gyroscope (avec les Sociétés Autonetics³ et Honeywell) pour des applications aéronautiques. En 1965, alors qu'il était en phase de développement exploratoire, ce gyroscope était déjà considéré comme un composant inertiel de qualité.

Dans les années 1970, les premiers systèmes produits par Autonetics et Honeywell ont été lancés sur financement de la Navy et l'Air Force.

Honeywell a développé un système de navigation précis pour avions, le GEANS, construit autour d'une plate-forme à cardans, relativement volumineuse mais précise (mieux que 0,1 nautique/heure). Dans cette application, la bille est creuse et a un diamètre de 1,5 pouce (38,1 mm). Les systèmes GEANS sont en production de série et ont été choisis, semble-t-il, pour rééquiper les bombardiers B-25 américains.

Autonetics a initialement choisi la formule petite bille pleine en béryllium de 1 cm de diamètre (masse 1 gramme, rotation à 2 500 tr/s) en utilisation « strap-down ». Les études entreprises par cette société ont abouti à la formule du MICRON (ou encore N73 ESG strap-down Standard Navigator) pour avions⁴.

Parallèlement, Autonetics, déjà fournisseur des centrales inertielles pour les sous-marins américains, a développé une formule marine (système ESGM) haute performance autour de ce même gyroscope. Dans cette application, les G.S.E. ne sont plus « strap-down », mais placés dans le cœur d'une plate-forme asservie à quatre cardans. La détection angulaire est utilisée uniquement en détection de zéro et le boîtier de chaque gyroscope est placé dans un équipement qui les retourne périodiquement de 180° autour de l'axe de spin, afin de moyennner les couples parasites.

L'ESGM serait opérationnel sur les sous-marins Trident américains.

³ Division de Rockwell International.

⁴ Précision de la classe du nautique/heure.

4 PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT D'UN G.S.E. HAUTE PERFORMANCE EN FRANCE

4,1 Introduction.

La Direction Technique des Constructions et Armes Navales a lancé le développement d'un G.S.E. marine et de sa centrale associée, pour une application marine comparable à celle du système ESGM d'Autonetics. Ce développement est réalisé dans les laboratoires de la SAGEM qui a déjà développé antérieurement le système de navigation opérationnel sur les S.N.L.E.

Le G.S.E., réalisé par la SAGEM, a quelques différences avec celui qui équipe l'ESGM d'Autonetics :

- bille creuse en béryllium d'un diamètre de 38 mm (au lieu d'une bille pleine de 10 mm)⁵
- suspension trois axes à six électrodes (au lieu d'une suspension quatre axes à huit électrodes);

Le G.S.E. d'Autonetics, application ESGN, est dérivé du G.S.E., composant lié pour application aéronautique (MICRON). Le G.S.E. marine SAGEM s'est d'emblée placé dans la formule la plus prometteuse pour l'application haute précision.

4,2 Le G.S.E. : Constitution - Fonctionnement:

4,21 LA SUSPENSION ÉLECTROSTATIQUE (fig. 1 et 2).

L'attraction électrostatique (que l'on peut assimiler à une pression négative), exercée entre deux électrodes de condensateur permet de soulever des plaques minces de métaux de faible densité, aluminium ou béryllium (cf. fig. 1).

Le principe ci-dessus peut être utilisé pour maintenir un rotor sphérique entre des électrodes (représentation d'un axe de suspension sur la figure 2, bille creuse de grand diamètre, ou bille pleine de petit diamètre).

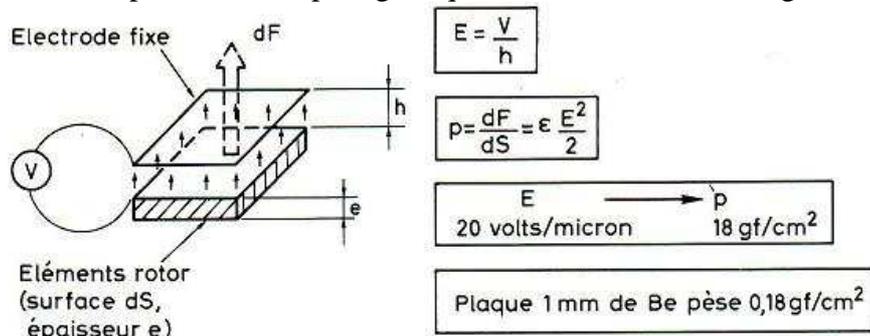
4,22 LA CONSTITUTION DE L'APPAREIL (fig. 3).

Le rotor est une bille creuse en béryllium, de 38 mm de diamètre, profilée en épaisseur pour lui conférer un axe principal d'inertie majeur. Cette bille est légèrement ovalisée dans sa forme extérieure (quelques microns de différence sur les diamètres polaires et équatoriaux) pour qu'à sa vitesse nominale de rotation (800 tr/s ou 4 800 tr/min), elle prenne une forme aussi sphérique que possible (effet des déformations centrifuges).

La cavité est formée de deux demi-cavités identiques en céramique métallisée, assemblées par vis-écrous (avec un centrage réalisé à mieux que le micron). La configuration des six électrodes, métallisations internes des cavités, est donnée figure 3. Des ouvertures assurent le maintien du vide dans l'entrefer bille-cavité. Une pompe de type ionique - non représentée sur la figure 3 maintient le vide dans l'enceinte où est placé le groupe « bille-cavité ».

A l'extérieur de cette enceinte sont disposées trois paires de bobines :

- deux paires de bobines (X et Y) pour la mise en rotation de la bille à sa vitesse nominale (courants diphasés - champ magnétique tournant - bille = « cage d'écureuil »);



Propriété fondamentale : forces électrostatiques normales aux surfaces

Fig 1 : Pression électrostatique

⁵ La SAGEM étudie également une version petite bille pleine pour applications aéronautiques

- une paire de bobines (Z) pour l'amortissement des nutations à la mise en rotation (amortissement passif par un champ magnétique axial continu).

Une fois la vitesse atteinte, les courants dans les bobines sont définitivement coupés. Le freinage et l'arrêt de la bille sont assurés par le rétablissement de courants continus dans les bobines.

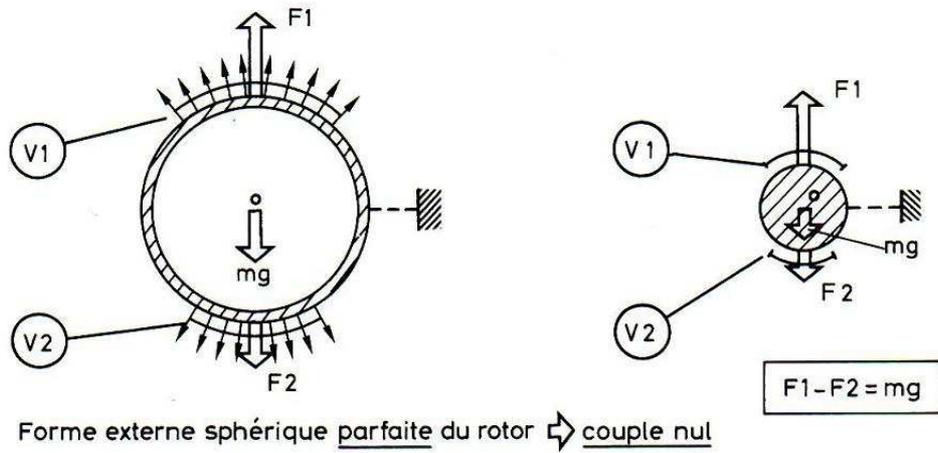


Fig. 2 – Suspension électrostatique

Un blindage magnétique est placé à l'extérieur du gyroscope

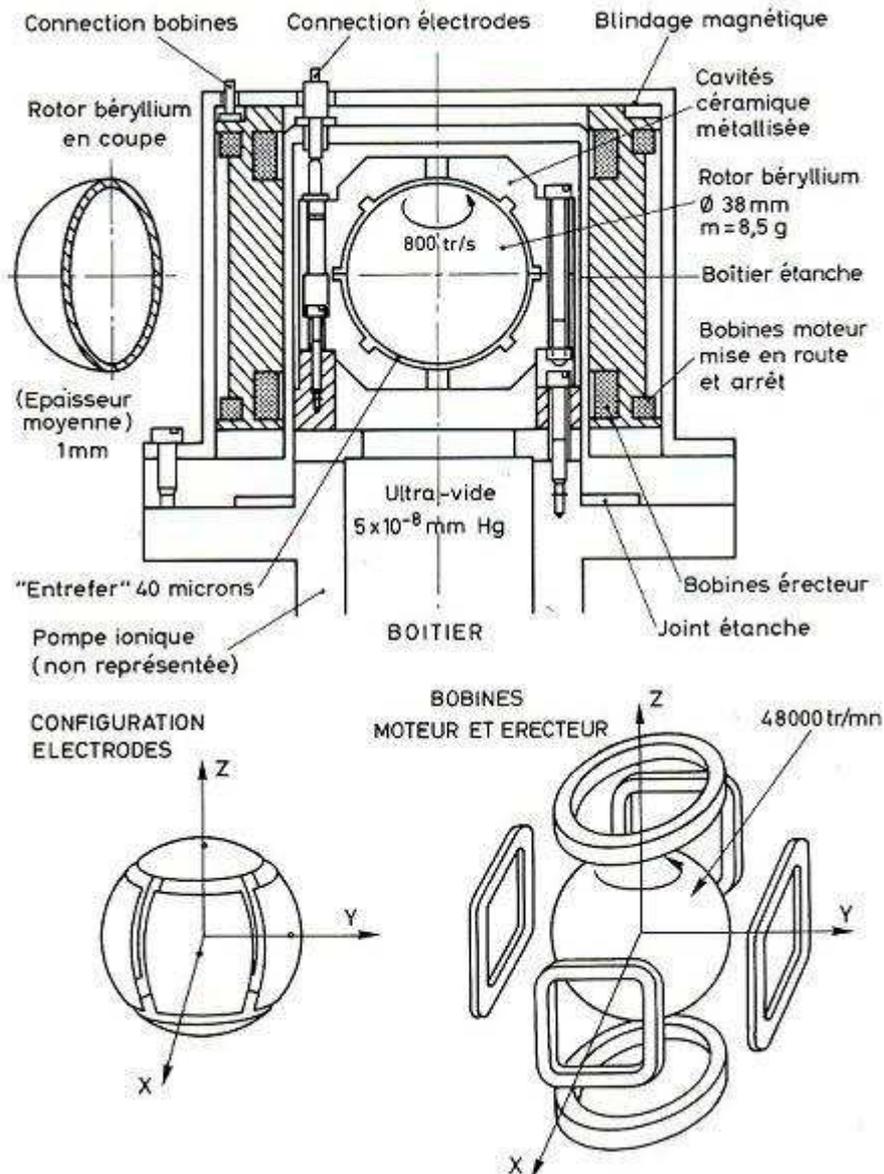


Fig. 3

Le gyroscope lancé n'est véritablement opérationnel qu'à l'issue d'un temps de stabilisation thermique de quelques heures. En effet, au cours de l'opération de lancement, la bille s'échauffe de quelques degrés et le gyroscope n'atteint son équilibre thermique que par rayonnement, ce qui allonge la durée du processus.

4,23 LES CIRCUITS SUSPENSION [fig. 4 et 5 (schémas 1 axe)].

L'attraction électrostatique est un phénomène à caractéristique quadratique (voir formule fig. 1). Une linéarisation est apportée par l'emploi d'un circuit de polarisation (fig. 4.1). A cette fin, on utilise des transformateurs différentiels alimentés en leur point milieu.

Les trois paires d'électrodes sont le siège de tensions triphasées alternatives sinusoïdales⁶, de telle sorte que la bille se trouve naturellement portée au *neutre* des tensions d'alimentation

- axe 1 : polarisation $\overline{V} 0$ (courant $2 I_0$);
- axe 2 : polarisation $\overline{V} 120$ (courant $2 I_{120}$);
- axe 3 : polarisation $\overline{V} 240$ (courant $2 I_{240}$).

$$(\overline{V} 0 + \overline{V} 120 + \overline{V} 240 = 0 : \text{courants triphasés})$$

La force de polarisation exercée par chaque électrode sur la bille vaut :

$$F_0 = k I_0^2 \quad (k : \text{facteur de forme}).$$

Leur résultante est bien entendu nulle.

4,24 FONCTION ACTION (FORCE) (fig. 4.2).

La tension de commande V appliquée au primaire du transformateur (axe 1) induit un courant I au secondaire. La force nette exercée sur la bille vaut :

$$F = k(I_0 + I)^2 - k(I_0 - I)^2$$

$$\text{ou } F = 4 k I_0 \cdot I = 4 F_0 \cdot I / I_0$$

Elle est proportionnelle au courant I , c'est-à-dire à la tension de commande V (en phase ou opposition de phase avec V_0).

4,25 FONCTION DÉTECTION DE POSITION (fig. 4.3).

Si dans ce même circuit différentiel, l'on considère un décentrage z de la bille dans la cavité, selon l'axe de suspension, un déséquilibre du pont va se produire et induire une tension d'erreur v côté primaire du transformateur différentiel, les courants dans les deux branches du pont deviennent

$I_0 (1 + Z / h_0)$ et $I_0 (1 - Z / h_0)$ où h_0 est l'entrefer moyen bille - cavité.

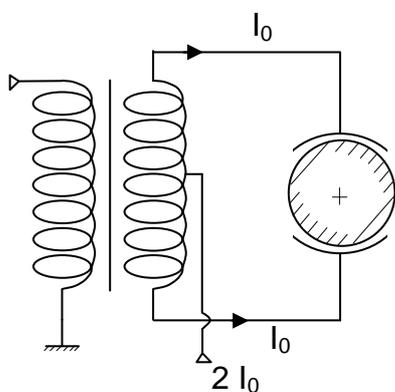
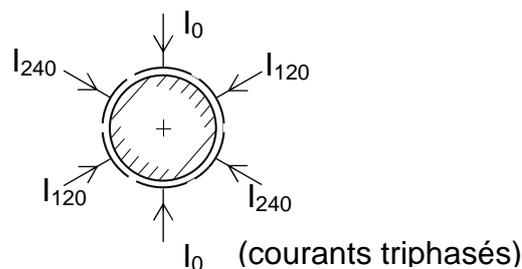


Fig 4.1



POLARISATION

⁶ Porteuse à quelques dizaines de kilohertz.

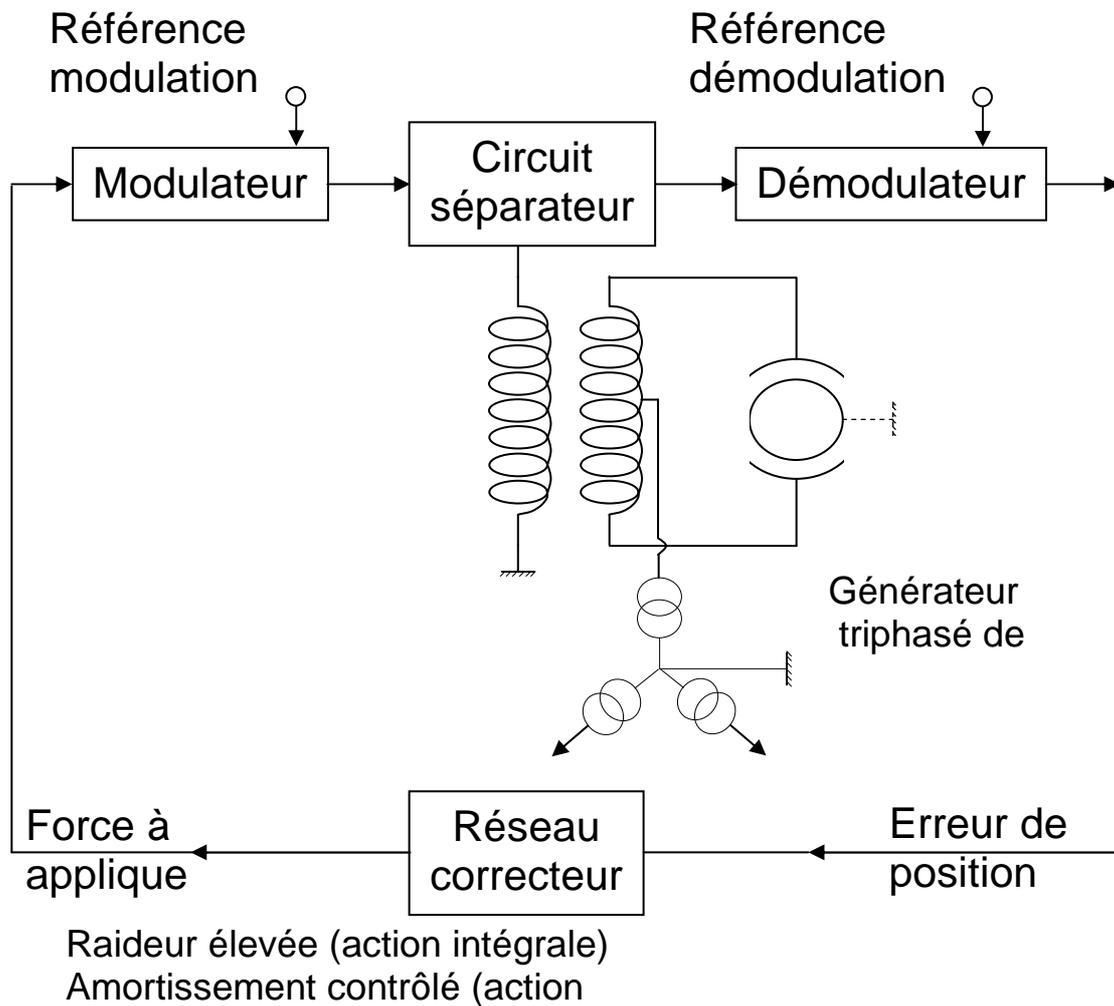
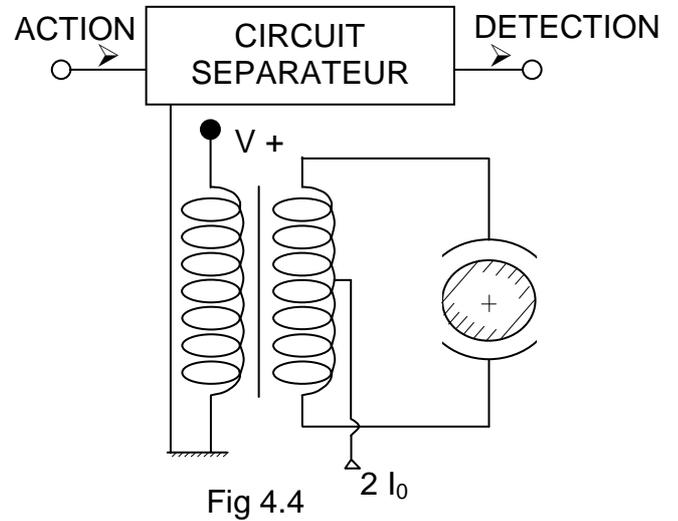
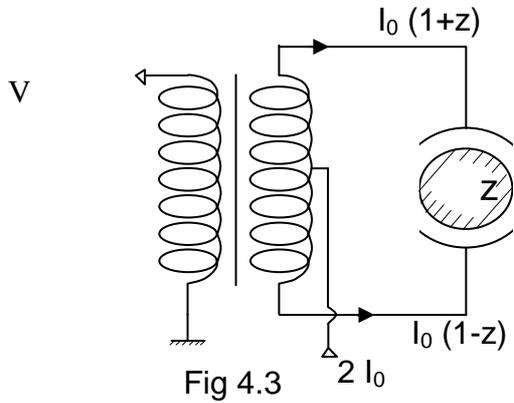
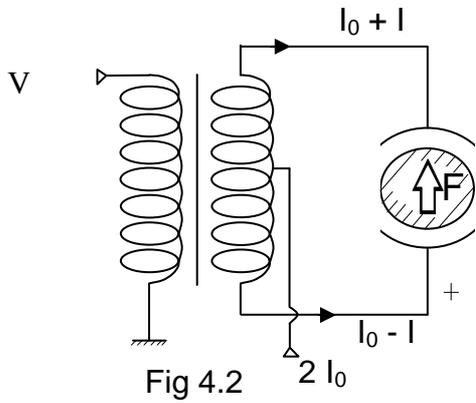


Fig. 5 – Suspension électrostatique active : Asservissement de suspension (1 axe)

4,26 ASSOCIATION DÉTECTION - ACTION (fig. 4.4)

Un seul circuit réalise les deux fonctions; il suffit d'associer au transformateur différentiel un circuit séparateur permettant simultanément l'application de l'action V et l'extraction de l'information de position v .

4,27 SUSPENSION ACTIVE. LE RÉSEAU CORRECTEUR (fig. 5).

Grâce au circuit explicité précédemment (on notera ainsi que détection et action utilisent les mêmes électrodes), la suspension de la bille est mise en oeuvre en plaçant entre la tension de décentrage v et la commande de force de recentrage une amplification et un réseau correcteur d'asservissement qui assurent:

- un amortissement contrôlé de la boucle de suspension (action dérivée);
- une raideur statique quasi infinie (action intégrale).

On observera que la tension de commande est proportionnelle à l'action de l'accélération (en premier lieu, la pesanteur) sur la bille. Cependant, cette fonction « accéléromètre » du G.S.E. n'est pas utilisée, la linéarité des accéléromètres pendulaires classiques étant nettement supérieure à celle qu'il est possible d'obtenir sur les circuits suspension du G.S.E.

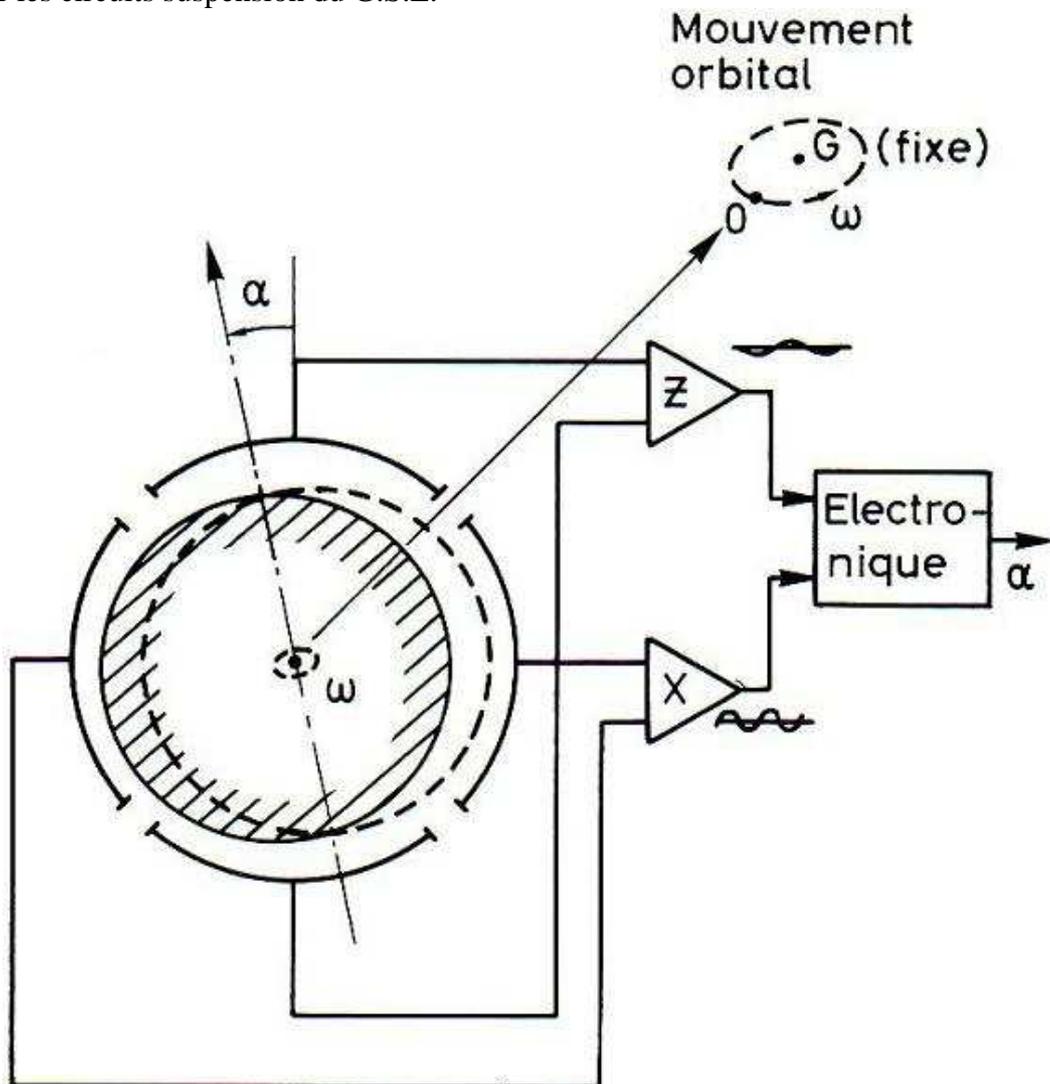


Fig. 6. - Détection angulaire par balourd radial

4,28 DÉTECTION ANGULAIRE (fig. 6).

Le principe utilisé est celui du balourd radial de construction de la bille. La bille ayant tendance à tourner autour de son centre de gravité, le centre géométrique de la bille décrit une petite orbite circulaire dans un plan normal à son axe de rotation. Ce mouvement circulaire module, à la vitesse de rotation, les signaux de position des circuits suspension. Un traitement électronique de démodulation de ces signaux (fig. 6)

fournit un signal proportionnel à l'inclinaison α par rapport à l'axe de suspension démodulé (axe Z sur la figure).

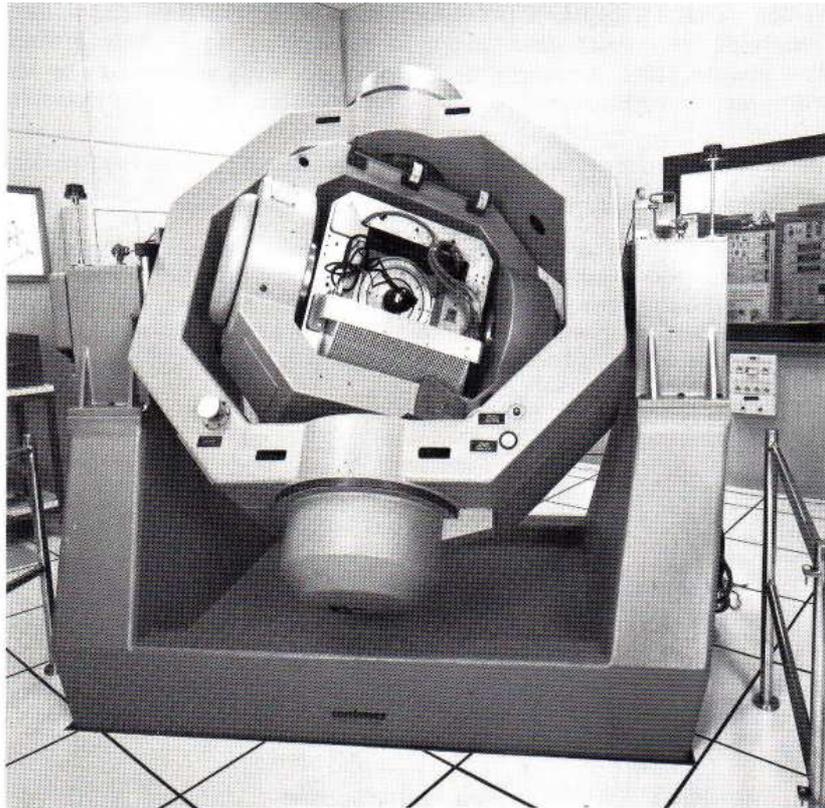


Fig. 7. – G.S.E. marine en essai longue durée sur une plate-forme précise à trois axes asservis

Le balourd radial de la bille est également mis à profit pour assurer une *régulation à vitesse constante* de celle-ci. Une solution peut consister à placer un *filtre réjecteur* dans les chaînes suspension, de façon à ce que, si la bille a une vitesse trop basse, les forces induites dans la suspension (réaction naturelle des asservissements au décentrage dynamique de la bille) soient en avance de phase par rapport au déplacement et procurent un léger couple moteur « électrostatique », remontant la vitesse de la bille.

Inversement, le filtre réjecteur, en apportant un retard de phase et donc un couple résistant, freinera la bille si celle-ci possède une vitesse de rotation supérieure à la consigne du filtre réjecteur.

L'énergie nécessaire à assurer le maintien d'une vitesse de rotation constante est extrêmement faible, quelques microwatts seulement. A comparer aux watts nécessaires à l'entretien des toupies de gyroscopes classiques !

4,3 Plate-forme d'essais d'un G.S.E. (fig. 7).

Ce gyroscope, nouveau dans son principe et sa constitution, l'est également sur le plan des procédures à mettre en œuvre pour l'évaluer, c'est-à-dire pour mesurer sa performance, en tant que composant individuel.

Cela est dû, en particulier, à son absence de moteur-couples : le spin du G.S.E. est fixe dans l'espace inertiel, il est donc en révolution permanente, en laboratoire, autour de l'axe du Monde (mouvement apparent des étoiles).

De plus, compte tenu de sa haute performance, il est nécessaire de lui associer un moyen d'essais précis, à la hauteur de cette performance.

Les essais de ce gyroscope sont réalisés sur une plate-forme de laboratoire, du type de celle représentée figure 7.

Cette plate-forme possède trois axes asservis dont deux sur paliers à gaz. Elle pèse 3 t, mesure 2 m x 2,5 m x 2,5 m et la précision de lecture angulaire des axes et de positionnement du cœur (anneau intérieur) est d'une seconde d'arc dans tout l'espace. Un ordinateur de processus et une installation autonome avec climatisation du laboratoire, compresseurs d'air pour les paliers, chargeur-batteries-onduleur et groupe électrogène sont nécessaires pour sa mise en œuvre.

Les cardans de la table sont asservis aux mouvements du spin du G.S.E. placé sur l'anneau intérieur de la plate-forme, à la façon d'une lunette astronomique pointée en permanence sur une étoile. La trajectoire du G.S.E., enregistrée en permanence dans un fichier informatique, pour des durées de plusieurs jours à plusieurs semaines, est ensuite traitée numériquement pour identifier le modèle du gyroscope et évaluer sa stabilité et ses caractéristiques.

4,4 Mécanisation du G.S.E. : plate-forme quatre axes (fig. 8 et 9).

Le système de navigation utilisant le G.S.E. en appareil de zéro est constitué de deux gyroscopes et de trois accéléromètres disposés sur le cœur d'une plate-forme à cardans. Pour asservir à zéro les quatre axes de mesure des deux gyroscopes, il est nécessaire de disposer d'une articulation interne sur le cœur (articulation notée β sur la figure 8).

Les gyroscopes conservent des directions fixes par rapport aux étoiles. Ils sont nominalement orientés l'un vers l'axe du Monde (P : gyro polaire), l'autre dans le plan Équatorial (E : gyro équatorial). Compte tenu des mouvements du bâtiment, cap-roulis-tangage, et de ses déplacements en latitude, une plate-forme à trois cardans passerait par des positions « interdites » (deux axes de cardans colinéaires), bloquant toute stabilisation du cœur. Aussi est-il nécessaire de disposer d'une plate-forme à quatre axes de cardans, comme celles que l'on utilise sur les centrales d'avion.

Des codeurs angulaires précis, placés sur les axes de cardans fournissent quatre angles qui sont convertis en cap, roulis et tangage.

Une vue d'ensemble d'un type de plate-forme et de sa suspension mécanique associée est représentée figure 9.

Les informations accélérométriques, issues des trois accéléromètres du cœur, intégration et changement d'axes, sont intégrées après changement d'axes, pour fournir les termes de vitesse et de position du bâtiment porteur.

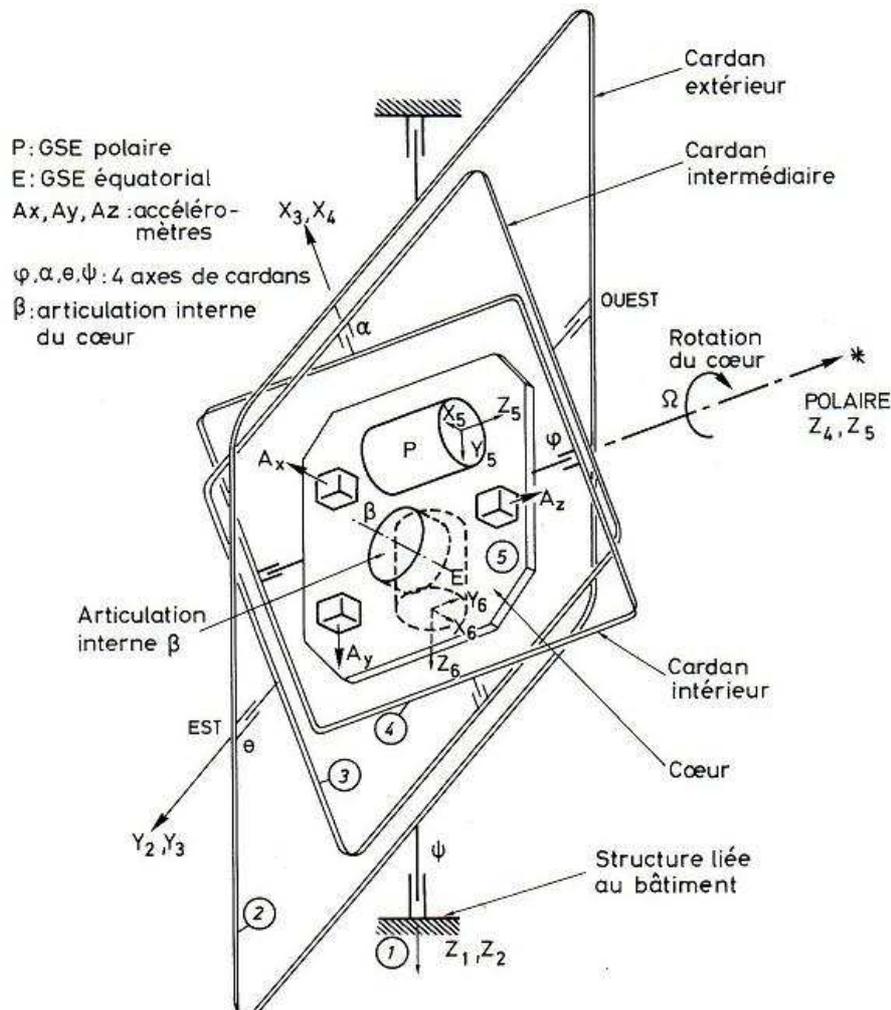


Fig. 8. - Mécanisation du G.S.E. sur une plate-forme quatre axes

L'ensemble des traitements évoqués précédemment sont, bien entendu, effectués par un *calculateur digital* associé à la centrale. On observera que, à l'inverse de ce qui se passe dans les centrales classiques de SCHULER, le calculateur est placé « en boucle ouverte » dans le système car il reçoit des informations de la centrale, mais n'en communique pas en retour (pas de commande de précession des gyroscopes).

4,5 Performance - Importance du logiciel.

Bien que les phénomènes physiques mis en oeuvre dans le G.S.E. soient simples et quasi parfaits et que la qualité de réalisation des éléments sensibles soit la plus élevée possible, il subsiste des dérives brutes (quoique très faibles) des gyroscopes incompatibles avec la précision recherchée.

Une modélisation déterministe de la dérive brute est donc nécessaire. Elle permet de gagner plusieurs ordres de grandeurs sur les dérives naturelles du G. S. E.

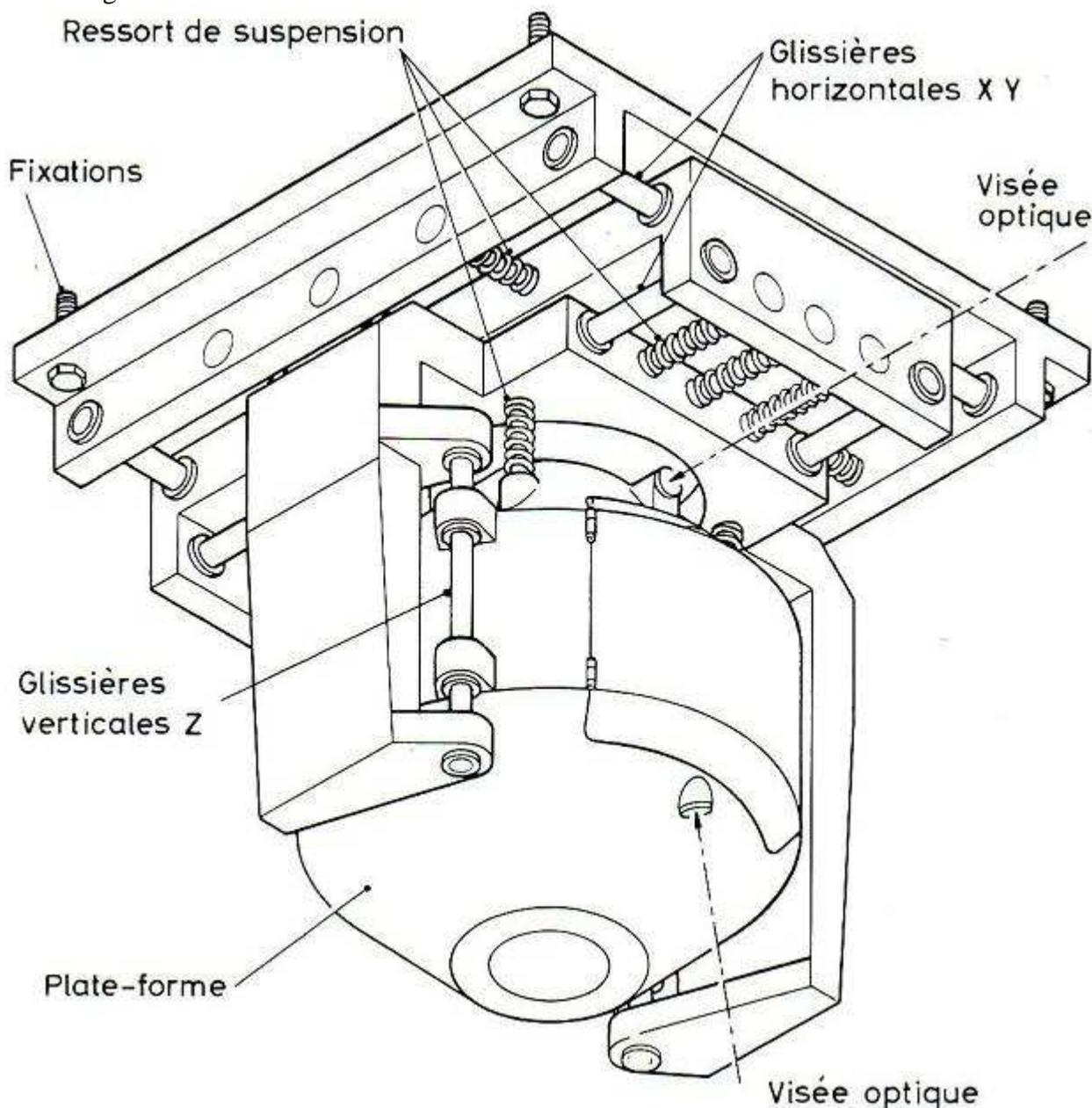


Fig. 9 – Plate-forme marine à G.S.E. et suspension mécanique associée

Le calculateur de la centrale dispose de logiciels permettant le fonctionnement sur un certain nombre de modes : alignement, calibration, navigation, recalage. Ces logiciels s'écartent sensiblement de ceux mis en oeuvre dans les centrales de SCHULER, par le fait que le cœur de la plate-forme n'est plus asservi au trièdre local, mais reste, en première approximation, fixe dans l'espace inertiel. De plus, *alignement*, *calibration* sont surtout des processus logiciels et non matériels : tout se passe dans le calculateur qui « observe » le comportement du matériel sur lequel il ne peut pas agir; la performance de la centrale, en

navigation, est très dépendante de la qualité de ces phases où les algorithmes mis en oeuvre doivent au mieux, dans un temps très court, déterminer le comportement physique vrai des G.S.E., c'est-à-dire leur modèle.

La performance ultime appartient au matériel (les G.S.E.). Au logiciel d'appréhender et de l'approcher au mieux.

L'évolution des calculateurs, en capacité, rapidité et encombrement, a été un facteur positif dans la résolution des problèmes posés, tant matériels que logiciels.

5 CONCLUSION

Le gyroscope à suspension électrostatique a confirmé sa capacité à atteindre les très hautes performances. Ces résultats n'ont pu être atteints que grâce à l'utilisation de matériaux spéciaux, de procédures d'usinage originales, d'une électronique très sophistiquée et de moyens informatiques puissants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SCHMIDT (J.N.). *Similarities between classical celestial navigation and electrostatic gyro navigation. Navigation (U.S.)*, vol. 26, n° 3 (1979).
- [2] SANDBERG H.J., DUSHMAN A. *System design and analysis of ESGMISINS navigation systems. Navigation (U.S.)*, vol. 21, n° 2 (1974).
- [3] MC MURRAY M.W., LING J.S. *Development and testing of a precise marine electrostatic gyroscope. I.O.N., Annual meeting, June 1972.*