

Pendule de Foucault et autres dispositifs inertiels 17/10/26

Introduction

Si on lance le pendule dans une certaine direction sur la Terre, le pendule de Foucault suit une trajectoire qui semble tourner par rapport au sol.



En fait, on constate expérimentalement, qu'au premier ordre au moins [1], notwithstanding l'action gravitationnelle des astres « proches » (Terre, Soleil, Voie lactée,..), il bat dans une direction pointant, au loin, vers un **point fixe** par rapport aux quasars lointains qui sont les repères du balisage de l'univers dans sa totalité, utilisés en astrométrie.

Le pendule étant un instrument de type « inertielle », sa trajectoire est une géodésique, mais de quelle géométrie ?

Si on décrit ce phénomène qui semble (au premier ordre) ne **prendre en compte que l'univers entier**, en relativité générale, ce sera alors une géodésique de la géométrie de l'univers, telle que décrite par le modèle standard de la cosmologie.

Cette rotation du mouvement du pendule par rapport au référentiel donné par la Terre constatée est donc **apparente** car le phénomène physique détecté est la rotation de la Terre, ceci à l'instar du mouvement apparent du Soleil dans le ciel qui n'est, également, que la manifestation de la rotation de la Terre.

Les dispositifs de type inertiel (pendule, gyroscopes, gyromètres, accéléromètres, ..) ont la capacité de détecter des accélérations « propres », dont celles liées aux rotations qui sont des phénomènes **non inertiels**, ces phénomènes « non inertiels » ayant un caractère **intrinsèque**, (lié à la dynamique de l'objet concerné lui-même) ne pouvant pas être « annulés » dans un référentiel inertiel.

Principe de Mach

Mach a stipulé au 19^{ième} siècle que l'inertie [2] des corps résultait de leur interaction gravitationnelle avec tous les corps de l'univers. L'inertie était de nature **gravitationnelle**. En conséquence cela fondait le principe d'équivalence : masse inerte = masse pesante (masse gravitationnelle passive qui se couple au champ gravitationnel), puisque l'inertie était de nature gravitationnelle.

La relativité générale

En relativité générale tous les corps contribuent à la géométrie de l'espace-temps auquel, en retour, tous ces mêmes corps se couplent en suivant des géodésiques de cette géométrie. Sur le principe, on voit que cela va dans le sens de ce que Mach a stipulé.

On comprend alors que, le pendule est un instrument ayant un mouvement inertiel décrivant une géodésique, ce soit une géodésique de l'univers.

Pourquoi la direction ne change pas

Comme dans le modèle standard, l'univers est supposé **isotrope** en tout point, toutes les directions sont **équivalentes**, donc ce sont les conditions initiales qui vont déterminer une géodésique (parmi toutes celles possibles) dans l'univers, et il n'y a aucune raison physique pour qu'elle change, sauf à être perturbée.

Avant de passer à suite, considérons quelques autres instruments « inertiels », permettant de détecter et mesurer des mouvements non inertiels.

Gyroscopes

Le gyroscope est un autre dispositif inertiel très utilisé. L'axe de rotation, d'une masse isotrope autour de cet axe de rotation et en rotation, en l'absence de perturbation, va pointer une direction fixe qui dépend des conditions initiales.

Accéléromètres et gyromètres

Accéléromètres

Cet instrument permet de détecter et mesurer des accélérations linéaires propres, par exemple, en utilisant l'inertie d'une masse, incluse dans le dispositif constituant l'accéléromètre, solidaire de l'accélération du corps.

Gyromètres

Ces instruments inertiels sont destinés à détecter et mesurer une rotation propre.



On peut citer les gyromètres à fibre optique utilisant l'effet Sagnac pour leur précision.

Un **gyromètre à effet Sagnac** est un capteur de vitesse angulaire (rotation) qui utilise les propriétés de la lumière et de la relativité restreinte pour mesurer un mouvement de rotation sans aucune pièce mobile.

Il s'appuie sur l'**effet Sagnac**, découvert par le physicien français Georges Sagnac en 1913.

Le Principe Physique : L'Effet Sagnac

Imaginez un anneau (ou une boucle fermée) dans lequel on injecte deux rayons lumineux issus de la même source laser.

- Un rayon tourne dans le sens des aiguilles d'une montre (**sens horaire**).
- L'autre rayon tourne dans le sens inverse (**sens antihoraire**).

Si le gyromètre est immobile :

Les deux rayons parcourent exactement la même distance à la même vitesse (la vitesse de la lumière c). Ils reviennent au point de départ en même temps et sont **en phase**.

Si le gyromètre tourne (vitesse angulaire Ω) :

Pendant que la lumière voyage, le point de départ/d'arrivée s'est déplacé en raison de la rotation.

- Le rayon qui tourne dans le même sens que la rotation doit parcourir une distance **plus longue** pour rattraper le point de sortie.
- Le rayon qui tourne en sens inverse parcourt une distance **plus courte**.

Cela crée un **déphasage** ($\Delta \Phi$) et une différence de marche temporelle (Δt) entre les deux faisceaux à l'arrivée.

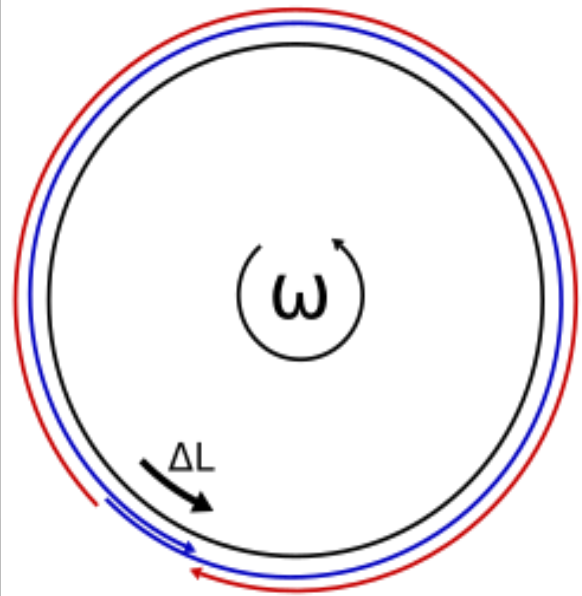
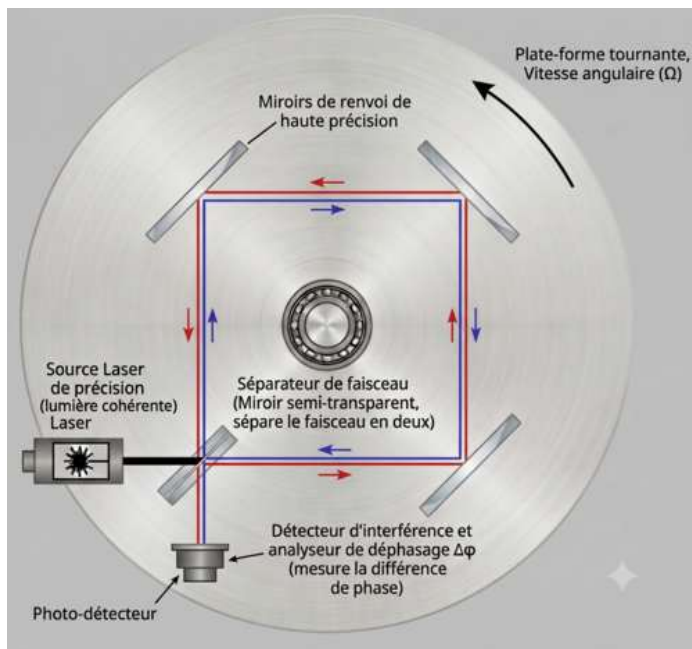
L'Équation Fondamentale

Le déphasage $\Delta \Phi$ mesuré par l'interféromètre est directement proportionnel à la vitesse de rotation Ω :

$$\Delta \phi = \frac{8\pi A}{\lambda c} \Omega$$

Où :

- A est l'aire géométrique fermée par le parcours de la lumière.
- λ est la longueur d'onde du laser utilisé.
- c est la vitesse de la lumière.
- Ω est la vitesse angulaire de rotation (en rad/s).



Le débat sur cet effet

Cet effet a fait l'objet de nombreux débats, car on le présentait comme mettant en défaut la relativité restreinte, encore contesté à l'époque.

Citons par exemple le débat à l'académie des sciences entre Picard et P. Langevin

Paul Langevin et l'effet Sagnac (1921)

Jacques Fric¹- Laboratoire Sphère, Université Paris-Diderot

Rappel historique

La relativité et l'effet Sagnac : Présentation du débat à l'Académie des Sciences en 1921.

¹ Item supprimé

Dans le compte-rendu de l'Académie des Sciences, voir CRAS de la séance du 24 octobre 1921 pour l'intégralité de l'article d'E. Picard, les citations ci-dessous sont « en italiques ». L'article est intitulé :

Physique : Quelques remarques sur la théorie de la relativité : Par Emile Picard

Nous en extrayons le paragraphe suivant :

« Pour que la Physique s'engage définitivement dans la voie ouverte par la théorie de la relativité, il faudra probablement que de nombreuses expériences d'un caractère positif aient été effectuées dans les laboratoires. Une expérience, se rattachant aux questions qui nous occupent, fut faite, il y a une dizaine d'années par M. Sagnac. Elle présente quelque analogie avec celle de Michelson, mais elle se passe dans un système auquel on donne un mouvement de rotation. Comme il ne s'agit pas d'un mouvement de translation uniforme, il n'y a pas d'opposition avec la théorie restreinte d'Einstein. Il serait intéressant d'expliquer la belle expérience de M. Sagnac au moyen de la théorie générale de la relativité, en allant jusqu'aux concordances numériques. »

Dans ce paragraphe, Émile Picard s'interroge sur l'expérience de Sagnac où le mouvement de rotation est mis en évidence par un décalage de franges d'interférences et tout en convenant qu'il ne s'agit pas d'un mouvement de translation uniforme donc qui ne met pas en cause la relativité restreinte, mais que, à son avis, la relativité générale se doit de l'expliquer. Il poursuivra son commentaire en reconnaissant que si certains points paraissent obscurs ou paradoxaux dans la théorie, de son point de vue ce qui importe ce sont les prédictions que fait cette théorie et qu'on doit la juger en fonction de l'accord de ces prédictions avec les résultats expérimentaux.

Nous voyons que Picard a une vision moderne et objective de l'édifice théorique construit par Einstein. Il est intéressant de noter que nulle part le principe d'équivalence, qui est pourtant la base physique de la théorie, n'est cité.

La réponse de Paul Langevin à Painlevé et Picard : CRAS du 7 novembre 1921

Peu de temps après, dans la séance du 7 novembre 1921, P. Langevin répond dans une note :

“D'intéressantes remarques sur la théorie de la relativité ont été présentées récemment par MM Painlevé et Picard. Je montrerai ultérieurement comment les difficultés soulevées par M. Painlevé ne sont qu'apparentes et comment on peut mettre à profit ses critiques.”

Langevin rappelle que la théorie d'Einstein est la seule qui permet de représenter les faits expérimentaux connus et qui a été capable de prédire des phénomènes inconnus tels que la déviation des rayons lumineux par le Soleil qui a été vérifiée en

1919 (Eddington) et le décalage des raies spectrales dans le champ de gravitation du Soleil. ²

Il poursuit :

“Pour montrer combien cette synthèse est complète et répondre en même temps au désir exprimé par M. Picard, je vais montrer comment la théorie de la relativité généralisée explique, de manière quantitative, le résultat de l’expérience de M. Sagnac et en donne en même temps l’interprétation la plus simple et la plus conforme à la nature des choses.”

Langevin, qui avait bien compris que les scientifiques français avaient tout intérêt à renouer des liens avec leurs collègues allemands, à l’issue du premier conflit mondial, est le premier à défendre publiquement la théorie d’Einstein au sein de l’Académie.

Dans sa démonstration il fait remarquer que c’est une expérience au premier ordre où toutes les théories de l’optique, mécanique, électromagnétique ou relativiste sont d’accord qualitativement et quantitativement, donc qui ne peut être discriminante, à la différence de celle de Michelson–Morley ³ qui est au second ordre et qui est discriminante, vis-à-vis des théories citées précédemment qui prédisent des résultats différents.

Sans rentrer dans le détail de la démonstration qui suivra, Langevin invoque l’influence sur la propagation de la lumière d’un effet inertiel lié à cette rotation équivalent à un champ de gravitation⁴.

² Cet effet n’avait pas été vérifié quand P. Langevin publie son article. Il a d’abord été vérifié en laboratoire en 1960 (Harvard), puis observé sur des naines blanches et enfin sur le Soleil en 1991 (précision de 2 %), la turbulence de sa photosphère rendant la mesure délicate. Merci à Nathalie Deruelle pour cette précision.

³ Il fait le parallèle avec l’expérience de Michelson Morley où aucun mouvement “absolu” n’avait été mis en évidence par l’expérience ce qui avait conforté le fondement de la relativité restreinte. Ici une expérience semble mettre en évidence cette rotation lui conférant un caractère “absolu” en contradiction avec les hypothèses relativistes.

⁴ Langevin invoque, sans le nommer, implicitement le principe d’équivalence, assimilant une accélération cinématique à l’action d’un champ gravitationnel. En fait ce n’est pas de la relativité générale (il n’y a pas de champ gravitationnel) mais plutôt une version préliminaire (incorrecte) de la relativité générale qu’avait proposé Einstein en 1907, voir Einstein (1907) chapitre V “Principe de Relativité et Gravitation”, où il évoque pour la première fois, sans le nommer, le principe d’équivalence. Mais pour un résultat au premier ordre cela fait l’affaire.

Il conclut :

“Cette expérience optique du premier ordre s’apparente ainsi à l’expérience du pendule de Foucault ou à celle du gyroscope et manifeste une fois de plus, depuis Newton, la possibilité de mettre en évidence le mouvement de rotation d’un système matériel par des expériences intérieures au système”.

Paul Langevin répond aux doutes de certains de ses collègues de l'Académie des Sciences qui se demandaient si l'expérience de Sagnac⁵, n'invalidait pas la relativité restreinte, (stipulant qu'on ne pouvait pas détecter le mouvement d'un système inertiel par des expériences internes au système)⁶, puisque cette expérience permet de détecter la rotation et d'autre part ils se demandaient ce que prédit la relativité.

Plutôt qu’une solution utilisant les transformations de Lorentz entre référentiels inertiels infinitésimaux tangent à la ligne d’univers, où la solution s’obtient en intégrant les équations, Paul Langevin propose une résolution moderne géométrique du problème à partir de la métrique relativiste et pour montrer qu’au premier ordre la solution relativiste converge avec la solution newtonienne, il va supposer que la vitesse de rotation tangentielle est très petite devant celle de la lumière ($1 \pm \omega^2 r^2 / c^2 \approx 1$).

En fait cela utilise le formalisme de la relativité générale, mais n’est pas de la relativité générale, car la gravitation est absente. Ce n’est plus non plus de la relativité restreinte définie par Einstein en 1905, où seuls les référentiels galiléens sont traités et dont la représentation géométrique est donnée par l’espace-temps de Minkowski avec son groupe de 10 transformations. Pour des mouvements non inertiels, il faut opérer dans un espace-temps affín. Il y a un débat de terminologie, mais on peut considérer que c’est une « extension » de la relativité restreinte.

⁵ Plateforme faisant interférer, par un jeu de miroirs, deux faisceaux lumineux de directions opposées, montées sur un disque en rotation.

⁶ Comme cela a été dit, un système en rotation n'est pas un système inertiel, donc que le principe de relativité restreinte ne s'applique pas.

Langevin fait d'ailleurs observer que cette expérience qui comporte un résultat au premier ordre est moins discriminante vis à vis des théories qu'elle permet de vérifier que celle de Michelson qui est une expérience au deuxième ordre.

Exposé de sa démonstration (généralisée).

Pour répondre aux objections de ses collègues, P. Langevin n'avait besoin que d'un résultat au premier ordre. Mais sa méthode est générale et s'il s'en tient au premier ordre, c'est pour faire une démonstration en quelques lignes. Nous utiliserons des coordonnées polaires (c'est un problème à 2 dimensions spatiales) plus pratiques que les coordonnées cartésiennes qu'il utilise dans sa démonstration.

Le résultat au premier ordre sera retrouvé en faisant la même approximation que lui, mais à partir du résultat général.

Métrie de Minkowski associée au référentiel (R_0), extérieur à l'instrument :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - r^2 d\phi^2 \quad [1]$$

Métrie sur le repère (R_1) en co-rotation de vitesse angulaire ω , associé à l'instrument :

$$ds^2 = (c^2 - \omega^2 r^2) dt^2 - 2\omega \cdot r^2 dt \cdot (d\phi) - r^2 \cdot (d\phi)^2 \quad [2]$$

car : $(\Phi) = (\phi) + \omega \cdot t$

On note que la coordonnée t est commune à [1] et [2] et que dans [1], t est le temps propre d'un observateur statique.

Pour un photon $ds^2 = 0$, [2] s'écrit :

$$(c^2 - \omega^2 r^2) dt^2 - 2\omega r^2 dt \cdot d\phi - r^2 d\phi^2 = 0 \quad [3]$$

On considère [3] comme une équation du second degré en dt . Ceci donne pour les 2 racines :

$$dt = d\phi \left[\frac{\omega r^2}{c^2 \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right)} \pm \frac{r}{c \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right)} \right] \quad [4]$$

L'une des racines correspond au photon en co-rotation et l'autre à un photon en contre-rotation.

En intégrant⁷ φ de 0 à 2π , où $A = \pi.r^2$ est l'aire du disque et $L = 2\pi r$ est le périmètre du cercle, on obtient :

$$t = \frac{\frac{2\pi\omega r^2}{c^2} \pm \frac{L}{c}}{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} = \frac{\frac{2\omega A}{c^2} \pm \frac{L}{c}}{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} \quad [5]$$

t est la coordonnée temps de la métrique, qui est aussi le temps propre de l'observateur « extérieur statique » dans le repère R_0 . C'est ce que devrait constater un observateur extérieur à l'instrument en rotation.

Comme l'instrument (l'interféromètre) est sur la plateforme en rotation, (expérience interne au système), c'est le temps propre τ de l'observateur (virtuel) qui serait attaché au repère tournant qui va intervenir dans la mesure. Avec $\varphi =$ constante, [2] devient :

$$d\tau^2 = ds^2/c^2 = (1 - \omega^2 r^2/c^2) dt^2 \quad [6]$$

Soit $d\tau = dt (1 - \omega^2 r^2/c^2)^{1/2}$ ce qui, en intégrant donne :

$$\tau = t \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} \quad [7]$$

En reportant dans [5]

$$\tau = \frac{\frac{2\omega A}{c^2} \pm \frac{L}{c}}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}} \quad [8]$$

donc la différence $\Delta\tau$ entre le temps de parcours τ_1 d'un photon en co-rotation et celui d'un photon en contre-rotation τ_2 dans le repère (R_1) solidaire de la plateforme en rotation vaut :⁸

⁷La constante d'intégration peut être ignorée car elle s'élimine dans le calcul final.

⁸ Il faut faire la somme algébrique, car l'orientation du temps est prise en compte.

$$|\tau_1 - \tau_2| = \Delta\tau = \frac{\frac{4\omega A}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}}$$

C'est ce que devait constater (mesurer avec son horloge ou en observant les franges d'interférences) un observateur solidaire de l'instrument en rotation.

Si on néglige $\omega^2 r^2 / c^2 \ll 1$, on obtient alors le résultat au premier ordre qui est identique à celui donné par la mécanique newtonienne

$$\Delta\tau_{1st} = [(4\omega A)/c^2]$$

C'est le résultat du calcul fait par Paul Langevin qui a pris en compte cette approximation au premier ordre dès le début dans son article.

Comme on mesure, non pas un décalage de temps mais un décalage de phase, si on appelle λ , la longueur d'onde il faut multiplier par :

$$\frac{2\pi c}{\lambda}$$

Pour obtenir le décalage de phase.

En effet, le temps T associé à une période de longueur d'onde λ , vaut $T = \lambda/c$. Le nombre de périodes contenues dans $\Delta\tau$ vaut $\Delta\tau / T = \Delta\tau \cdot c/\lambda$. Comme, dans une période la phase varie de 0 à 2π il faut multiplier cela par 2π , pour avoir la phase. Cela donne :

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{8\pi\omega A}{\lambda c}}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}} \approx \frac{8\pi\omega A}{\lambda c}$$

1. Les Deux Grandes Technologies de Gyromètres Sagnac

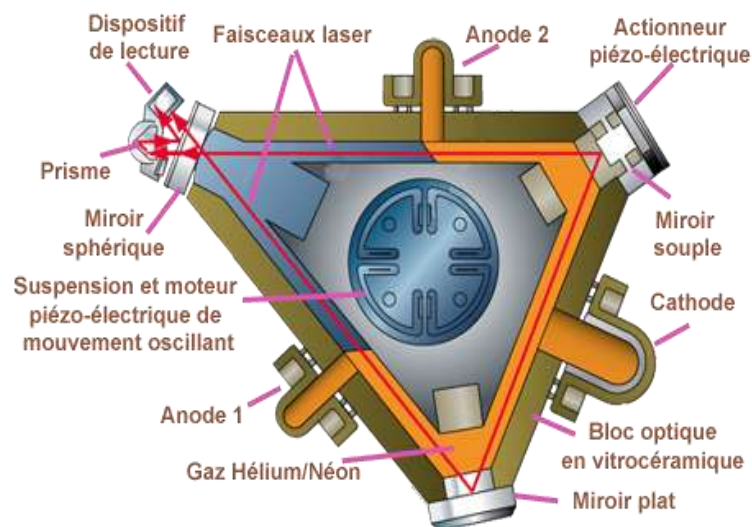
Pour obtenir une sensibilité industrielle et militaire, l'aire A doit être maximisée ou le signal amplifié. Deux technologies dominent le marché :

Caractéristique	Gyromètre Laser (Laser Gyro / RLG)	Gyromètre à Fibre Optique (FOG)
Principe	Cavité laser active en forme de triangle ou de carré (miroirs).	Longue bobine de fibre optique passive (parfois plusieurs kilomètres).
Mesure	Différence de fréquence entre les deux modes lasers.	Différence de phase (interférométrie pure).
Avantages	Précision extrême (haut de gamme), excellente stabilité long terme.	Aucun composant mécanique, très robuste aux chocs, coût scalable.
Applications typiques	Aéronautique civile/militaire, sous-marins, fusées.	Missiles, guidage de drones, stabilisation de caméras, robots terrestres.

2. Avantages Majeurs

- **Absence de pièces mobiles** : Contrairement aux anciens gyroscopes mécaniques (à toupie), ils ne subissent aucune usure mécanique, aucun frottement et sont insensibles à la gravité ou aux fortes accélérations linéaires.
- **Démarrage instantané** : Pas de temps de mise en rotation d'un rotor.
- **Dynamique et Précision** : Capables de mesurer aussi bien la rotation de la Terre (très lente) que les mouvements brusques d'un missile.

• Exemple de réalisation



Source: www.faa.gov/handbooks_manuals/media

Dans le Futur

On travaille sur des gyromètres à atomes froids qui sont prometteurs d'une précision encore supérieure. Compte-tenu de la complexité de mise en œuvre ces équipements sont aujourd'hui au stade du laboratoire.

Par rapport à quoi définit-on l'accélération et la rotation propres ?

On entend souvent à propos de la rotation d'un objet : Mais par rapport à quoi tourne un objet ?

Cette question sous-entend une approche newtonienne avec un espace absolu de référence. En fait, la détection d'un mouvement non inertiel (accélération linéaire propre ou rotation propre) par un dispositif inertiel, (Pendule, gyroscope, accéléromètre, gyromètre,...), se réfère au corps lui même.

Par rapport à son état à l'instant t , si l'état immédiatement suivant à $(t + dt)$ ne résulte pas d'un mouvement inertiel, indépendamment de toute référence extérieure, le dispositif va le détecter et éventuellement le mesurer.

L'exemple des trous noirs de Kerr en relativité générale

On peut se demander **par rapport à quoi** ces trous noirs dits « en rotation », par comparaison avec les trous noirs « statiques » de Schwarzschild par exemple, tourneraient.

Dans l'approche relativiste, comme un trou noir de Kerr définit un espace-temps complet (infini) effectivement, comme il ne tourne pas par rapport à lui-même, on peut être dubitatif.

En fait c'est la géométrie de cet espace-temps de Kerr, différente de celle des trous noirs « statiques » qui caractérise le phénomène de rotation.

Ainsi, par exemple, la **géodésique** d'un objet à l'infini, sans vitesse initiale tombant radialement, est une « radiale entrante », modélisée par une « **ligne droite** » pointant vers la singularité centrale (un rayon) dans la solution d'un trou noir statique, alors que le même objet, dans les mêmes conditions initiales va suivre des courbes, qu'on pourrait interpréter (de façon newtonienne) comme subissant une « rotation » alors qu'en fait il ne fait que suivre les géodésiques de cette géométrie.

La métrique de Kerr qui définit sa géométrie, qui contient un paramètre caractérisant cette rotation (un moment angulaire) est plus complexe de celle Schwarzschild, mais elle se ramène à elle quand ce paramètre est nul.

Situation physique

En fait cette condition d'homogénéité et d'isotropie que nous avons décrit pour expliquer pourquoi le pendule pointerait toujours une direction ne dépendant que des conditions initiales est une **approximation** à l'échelle de l'univers, mais localement, elle n'est pas totalement respectée [3]. Ceci entraîne des effets locaux qui vont provoquer une **infime déviation** de la direction.

Exemple de mesure de la déviation géodésique dans un cas réel

Cela a été mesuré par l'expérience Gravity Probe B, [4] utilisant des gyroscopes ultra-précis qui ont montré une très faible déviation géodétique (liée à la courbure de l'espace-temps par la masse de la Terre) et une déviation « gravitomagnétique » (entraînement de référentiel) encore plus faible liée à la rotation de la Terre.

Article complet sur Gravity Probe-B, ci-dessous.

Le 8 Mai 2004 : Gravity Probe B

Lancement réussi, le 20 Avril 2004 (cf : <http://einstein.stanford.edu/>.)

En orbite polaire quasi idéale, à 640 km d'altitude, plan contient la référence.

Objectif : Expérience visant à vérifier « directement » **deux prédictions** de la **Relativité générale** dans le champ de gravitation terrestre (orbite polaire optimisée), les **effets sont « orthogonaux »** (cf figure ci-dessous) ce qui permet de les séparer

- Effet de **précession géodésique** (**Effet de Sitter**, lié à la courbure de l'espace par le champ terrestre): **6,6 seconde d'arc/an** (précision de la mesure **0,01%**). [Remarque cet effet a déjà été validé expérimentalement sur le système Terre – Lune, précision **1%**]
- Effet **Lense Thirring** (entraînement du référentiel, liée à la rotation de la Terre, effet gravito magnétique): **0,042 seconde d'arc par an** (précision de la mesure **1%**): **Un défi technologique!!!!**
- En ce deuxième point, l'expérience permettra de valider les prévisions **« gravito-magnétiques »** de la Relativité générale, liés au champ créé par les masses en mouvement

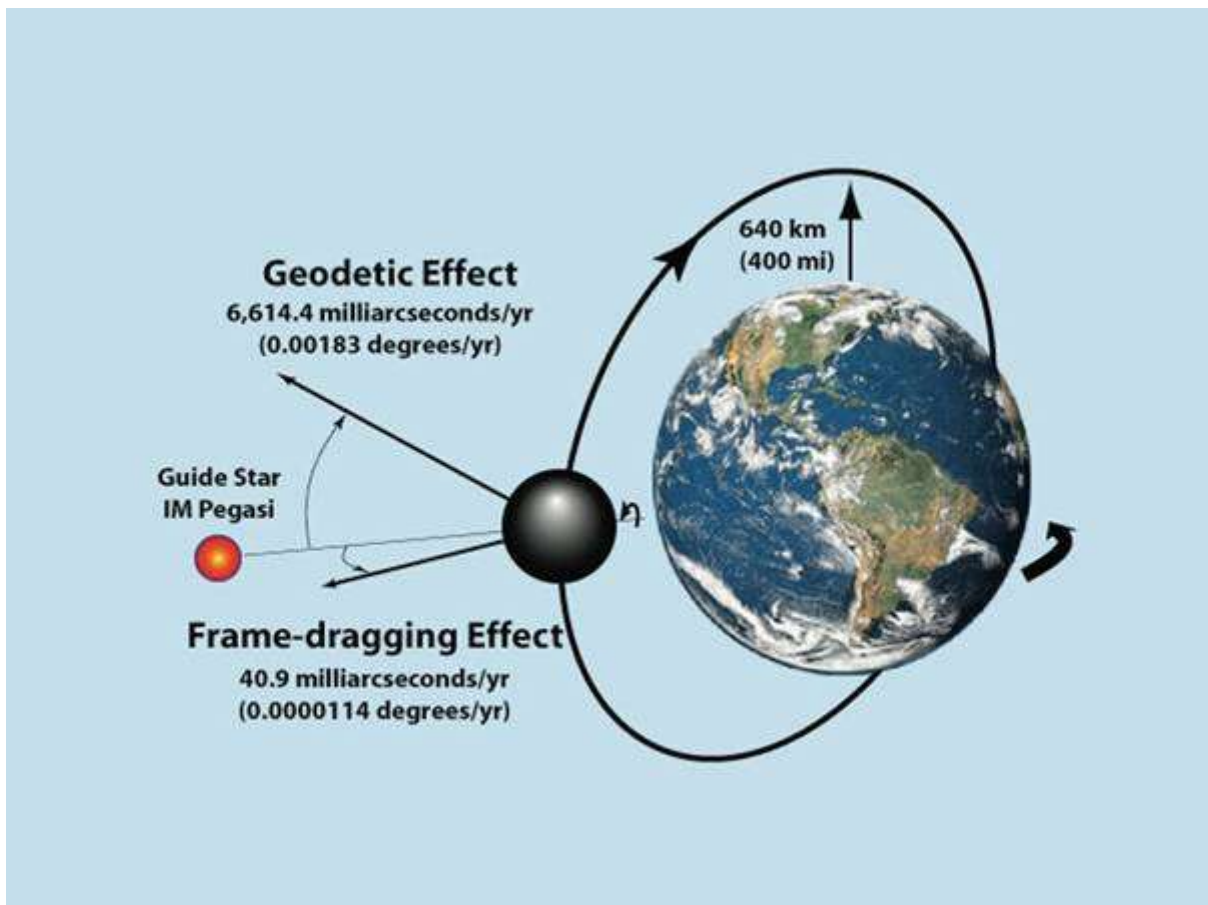


Schéma de principe (ci dessus) et vues du satellite en Vol (ci dessous)



Principe de l'expérience : Un système de **quatre gyroscopes** « ultra précis », (sens de rotation inversé par paire et le système tournant lentement autour de son axe de visée pour s'affranchir de dissymétries éventuelles), doivent fournir une référence inertielle stable, en l'absence de perturbation. Un **télescope** embarqué pointe très précisément (**0,0001 sec arc**) sur **une référence** lointaine dont la position (et dérive éventuelle) est connue (**HR8703, IM Pegasus**). Le plan de l'orbite polaire passe par cette référence. Une **dérive** de ces gyroscopes, dont l'axe est initialement

// à celui de visée du télescope, par rapport à cette référence, liée aux deux effets testés de la valeur indiquée, est **prédite par la Relativité générale**

Défi technologique : Mesurer une dérive aussi faible que **0,042 seconde d'arc /an** du système inertiel ainsi constitué nécessite de réaliser un système 10^6 (**un million** de) fois plus stable que le meilleur système inertiel en service.

Gravity Probe se propose de vérifier cet effet **à 1%** : nécessite une **stabilité de 10^{-11} degré d'arc / Heure**.

Réalisation de la prouesse technologique :

L'environnement : Les équipements expérimentaux du satellite sont à l'intérieur d'un Vase Dewar contenant **2328L** d'hélium superfluide, pour maintenir les équipements à **1,8 °K** pendant **2 ans**.

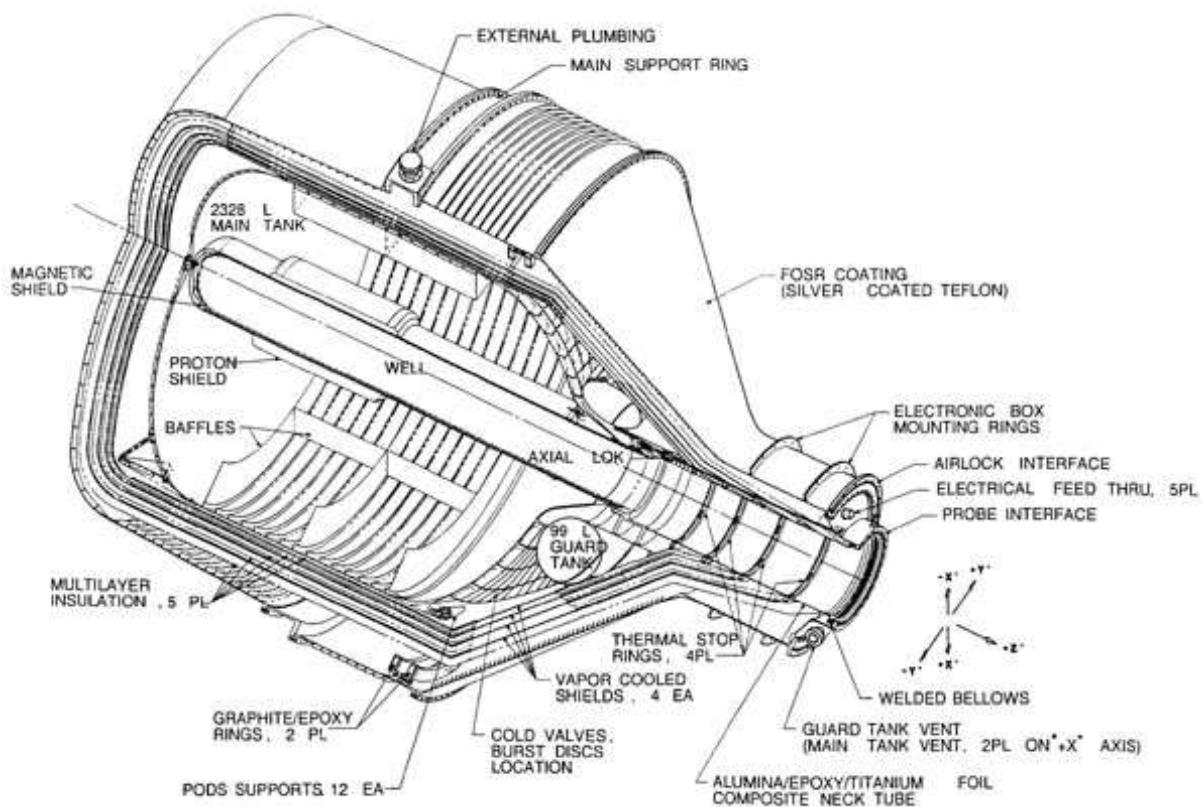
Un blindage magnétique pour s'affranchir du champ terrestre et solaire à plusieurs niveaux en particulier par des métaux en état de **supra conductivité** permettent de réduire le champ résiduel à l'intérieur à moins de **10^{-17} Gauss**.

Le vide fait dans l'équipement est de **10^{-14} bar**

Un boule libre identique à celle des gyroscopes, dans une cavité, à l'abri des perturbations extérieures (vent solaire, atmosphère résiduelle, magnétisme...) au centre de gravité, fournit la référence inertielle du centre de gravité du système sur la trajectoire géodésique (Accélération résiduelle à **10^{-10} G**).

Au froid, dans un vide poussé, en micro gravité, dans des conditions de symétrie maximum, protégés des perturbations électriques et magnétiques, les gyroscopes tournent dans un environnement qui les isole pratiquement complètement de leur milieu

Vue générale de l'enveloppe de l'expérience



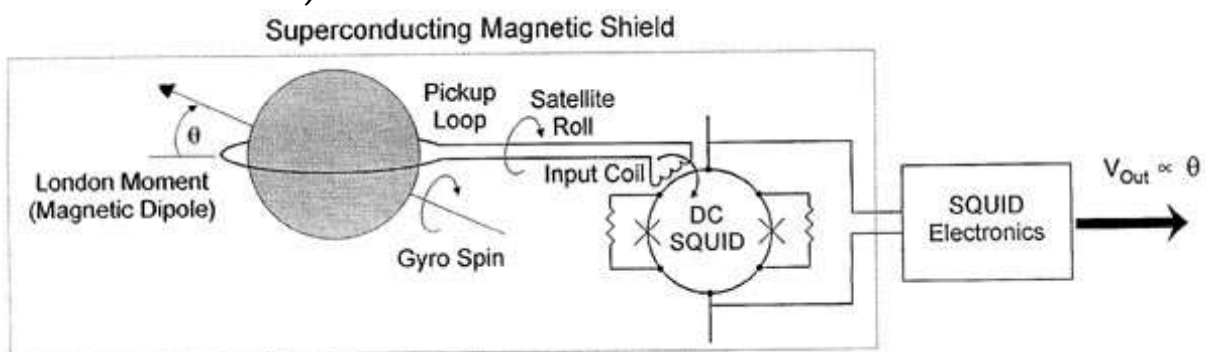
Les gyroscopes : Petites **boules de quartz** fondues de la taille d'une balle de ping pong, revêtues d'une couche de **nobium** (**supra conducteur** à cette température) , ils sont les **objets les plus ronds** et les plus homogènes que l'on trouve dans l'univers (à l'exception peut être des étoiles à neutrons). Ils sont en **lévitation électrostatique** dans une coquille munie d'électrodes (faible tension)

La vitesse de rotation **10 000 tr/mn** est communiquée (en vol par **un jet sonique d'hélium gazeux** (ensuite pompé)). Compte tenu du vide cette vitesse ne varierait pas de plus de **1% en 1000 ans**.



Vue du Gyroscop (en quartz non métallisé) et de sa coquille en quartz

Le système de lecture (le moins perturbant possible) de la position de l'axe du gyroscop se fait par **SQUID**. (Superconductivity Quantum Interference Device)



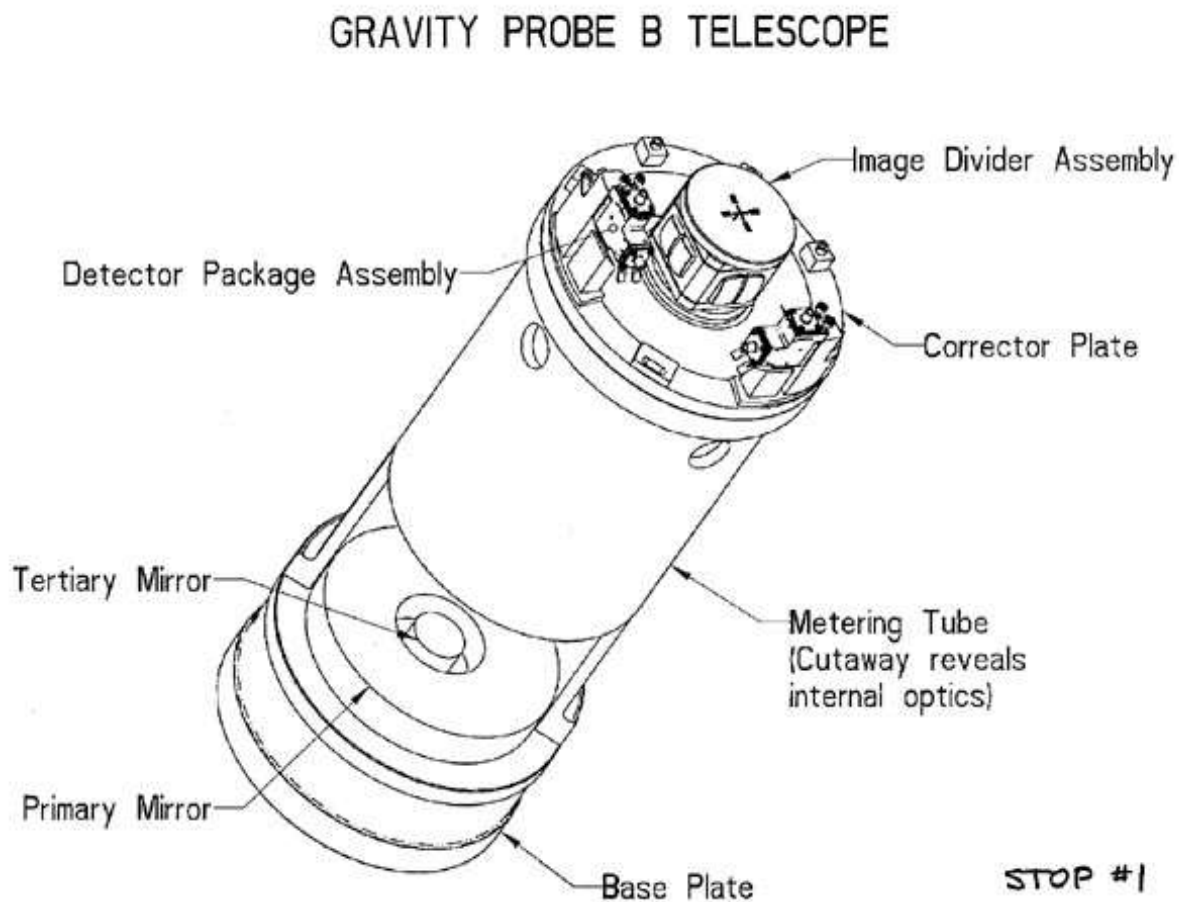
Principe de la lecture d'une variation de position de l'axe de rotation

Le Télescope: Réaliser un pointage à **0,1 milliarcseconde**, **1000 fois mieux** que le pouvoir séparateur des meilleurs télescopes n'est pas une mince affaire.

Comme le reste il fait d'un bloc de quartz fondu, son ouverture est de **15 cm** environ, sa focale de **3,75 m** (s'agissant d'un Cassegrain sa longueur est de **35 cm**)

Pour la mesure, il utilise une technique différentielle (séparation du faisceau en 2, et séparation de chaque image par un prisme en deux demi disques, chaque paire de demi images transmise à des photodétecteurs qui génèrent un signal proportionnel au déplacement). Il utilise « l'aberration astronomique » pour calibrer ses mesures.

La source IM Pegasus a été choisie pour sa luminosité et la connaissance très précise (**0,0002 sec-arc/an**) qu'on a de sa position et dérive par rapport à un référentiel extragalactique (Campagne de mesures par interférométrie avec le **VLBI**).



Précautions particulières : L'orbite étant « polaire » le satellite est particulièrement exposé aux agressions des rayonnements (hors de la protection du bouclier magnétique terrestre). Il a déjà subi et supporté avec succès ce genre d'épreuve au cours de sa courte période de pré-activité.

Notes

[1] En fait, comme l'univers n'est pas du tout homogène et isotrope localement, même si cet effet est faible localement pour la Terre et même le Soleil, la **géodésique** va subir **localement** d'infimes déformations par rapport à la géodésique d'un univers parfaitement homogène et isotrope.

Cet aspect du problème sera explicité dans la fin du document.

Insistons sur le fait que c'est bien la **géodésique qui est localement déformée** par rapport à la géodésique si l'univers était homogène et isotrope. La perturbation du mouvement du pendule, dispositif inertiel, est liée au fait que le pendule suit cette géodésique déformée localement.

Ceci peut être observé comme l'expérience « Gravity Probe-B » le montre (avec des gyroscopes) . Bien entendu, compte-tenu de la faiblesse de la perturbation, le dispositif inertiel doit être quasi-parfait et très sensible.

[2] L'inertie cette capacité des corps de résister à un changement d'état, un état inertiel se caractérisant par le fait que, ponctuellement, aucune contrainte n'est ressentie.

[3] La géométrie locale n'est pas celle de l'univers global, par exemple autour de la Terre ce serait une géométrie décrite par la métrique de Schwarzschild avec un effet Lense-Thirring pour sa rotation.

[4] Pour l'effet géodétique, cela a été mesuré (et confirmé) avec une bonne précision, pour l'effet Lense-Thirring la précision est médiocre du fait de l'extrême faiblesse de la perturbation. Il semble que les auteurs de l'expérience aient un peu surestimé les performances des gyroscopes (réputés 10 fois plus performants que ce qui existait alors) qui ont été limités pour mesurer l'effet Lense-Thirring.

Bien entendu c'est parce que cet effet est très petit pour un astre comme la Terre, mais pour des étoiles à neutrons et encore plus pour des trous noirs de Kerr, où il existe une ergosphère, region entraînant inexorablement en rotation tous les éléments physiques y compris les photons, cet effet Lense-Thirring devient très important.

Certains ont même mis en doute la validité de la mesure, obtenue après de nombreux calculs destinés à éliminer les effets indésirables.

Publié, par J. FRIC

le 14 octobre 2026