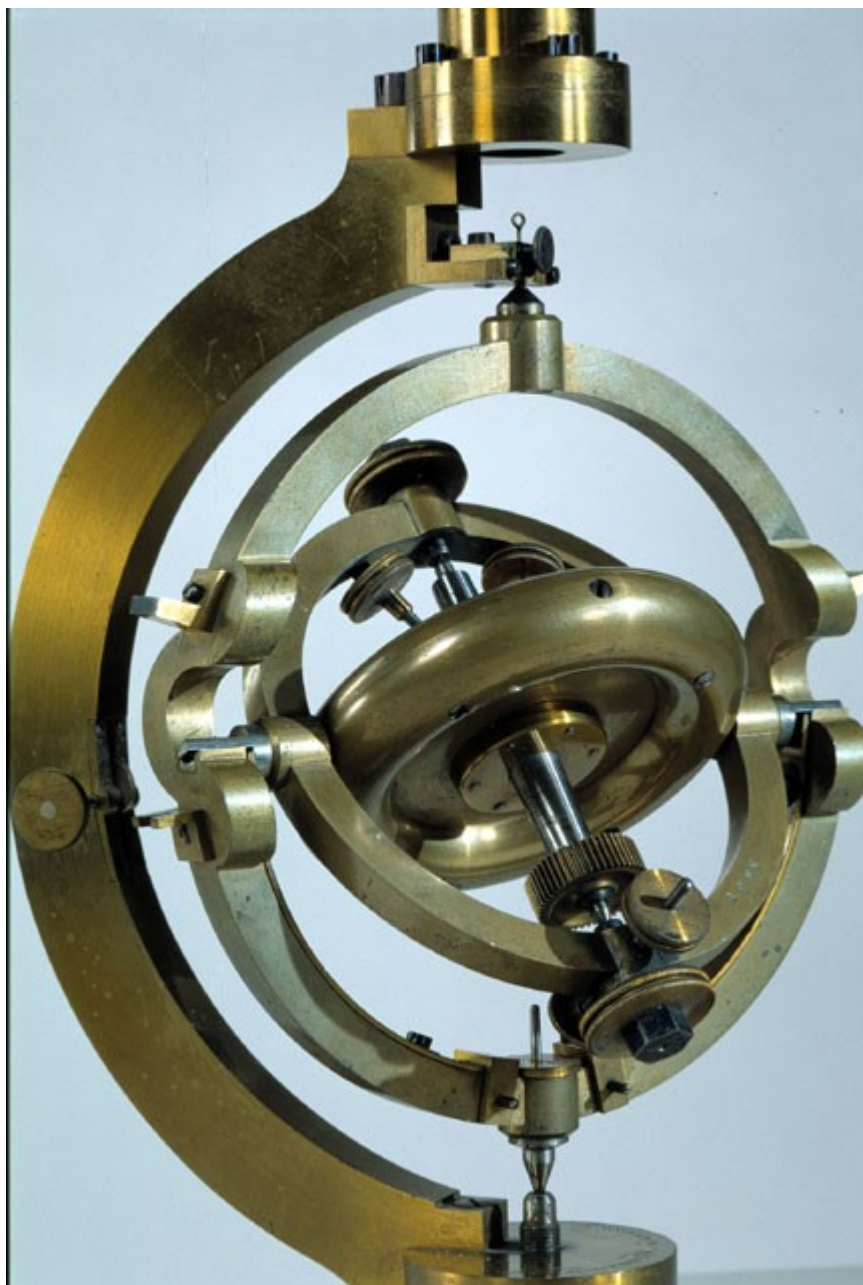


# Le Gyroscope de Foucault

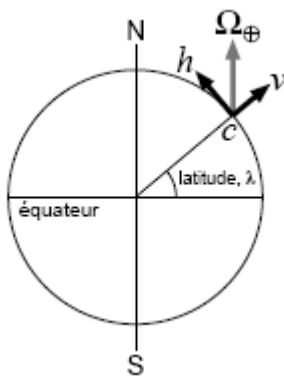


## Pourquoi un tel appareil ?

Foucault avait déjà fortement marqué les esprits avec son pendule, première démonstration acceptable par la communauté scientifique (bien que fortement empirique) mais un facteur empêchait une compréhension immédiate de la part du plus grand nombre et de Foucault lui-même comme celui-ci le reconnaissait. Ce facteur est le sinus de la latitude qui intervient dans le fonctionnement général du pendule et surtout dans sa mise en équations.

Effectivement le pendule voit la période de rotation du plan qui le contient évoluer en fonction de la latitude à laquelle il est situé. Au lieu des 24 heures attendues on obtient cette période de rotation apparemment évidente multipliée par un facteur égal à l'inverse du sinus de la latitude. Ainsi, la période sera bien de 23h56 mais uniquement aux pôles (la latitude  $\gamma$  étant de  $90^\circ$  son sinus  $\gamma$  sera égal à 1) ; de même plus l'on se rapprochera de l'Equateur plus on obtiendra une période longue (allant par exemple jusqu'à 1070h à Singapour où la latitude est de  $1,3^\circ$ ).

Une explication sera donnée par Liouville (1809-1882) :



Le mathématicien décompose le vecteur rotation de la Terre  $\Omega_{\oplus}$  au lieu  $c$  en ses décomposantes selon la verticale  $\nu$  et selon l'horizontale  $h$  (par rapport au sol). Le vecteur  $\Omega_{\oplus}$  est un vecteur constant mais ses composantes varient selon la latitude  $\lambda$  du lieu  $c$ , la composante  $\nu$  variant proportionnellement au sinus de  $\lambda$ . Or le pendule voit son plan d'oscillation varier dans le plan dirigé par  $\nu$  d'où la dépendance en  $\sin \lambda$  de la période du pendule.

Il fallait donc un dispositif plus simple et différent du pendule qui pouvait comme ce dernier apporter la preuve immédiate de la rotation terrestre. Pour cela Foucault s'est fortement inspiré d'un appareil construit par l'allemand Bohnenberger.

Quelques pistes avaient déjà été explorées dès le XVIII<sup>e</sup> siècle notamment grâce à des disques mis en rotation mais il s'agissait uniquement de créer un horizon artificiel stable en mer, L'appareil de Bohnenberger quant à lui met en évidence les mouvements de précession des équinoxes et de nutation, mouvements qui seront détaillés par après. Cet instrument a été construit en 1810 bien avant Foucault donc, d'autres appareils ayant été construits dans l'intervalle séparant cette date de l'époque du scientifique. Certains avaient déjà avancé l'idée d'une possible démonstration de la rotation terrestre sans qu'aucun développement véritable n'ait jamais vu le jour.

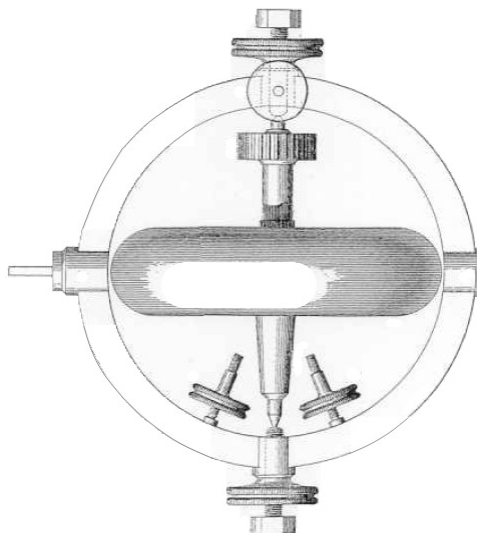
Il pourrait au premier abord sembler que le travail fut facile pour Foucault par la suite mais cet appareil, non seulement destiné à un autre usage, était loin d'être idéal du simple point de vue expérimental. Foucault se devait donc de l'améliorer et de l'adapter à ses visées.



*Appareil de Bohnenberger*

## L'utilisation du gyroscope

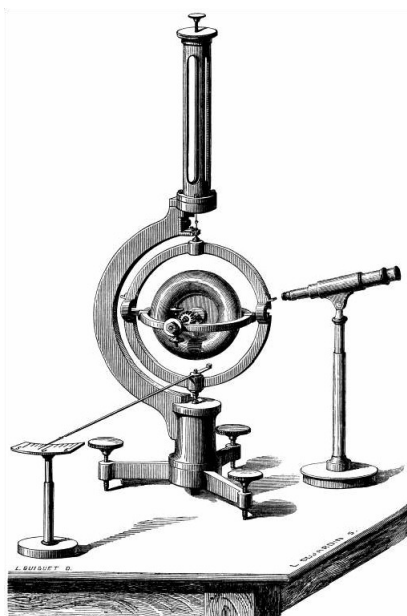
L'utilité principale du gyroscope est donc une preuve encore plus immédiate et aisée à appréhender de la rotation de la Terre (il s'agit de l'expérience dite de déviation), reste à savoir comment. Il faut pour cela définir précisément ce qu'est le gyroscope. Il s'agit d'un tore (une surface fermée en forme d'anneau, cf. illustration 1) en bronze traversé par un axe d'acier que l'on insère dans un cardan (un anneau en métal en fait).



*Illustration 1: tore dans son cardan*

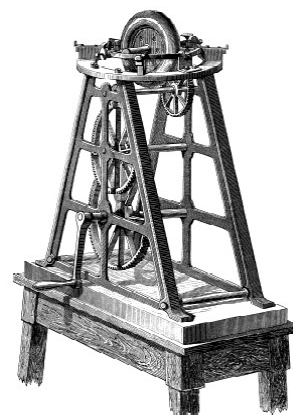
On peut dès lors remarquer que le gyroscope tourne vers l'Ouest (sur le schéma ci-dessus dans le sens trigonométrique) ce qui prouve bien que son mouvement se fait sous l'effet de la rotation terrestre (puisque la Terre tourne d'Ouest en Est).

Le gyroscope en rotation (le cardan l'entourant étant dans le plan horizontal) est ensuite placé sur son support qui consiste en un deuxième cardan cette fois-ci vertical suspendu à un fil sans torsion et maintenu sans oscillations car bloqué dans une encoche par le bas sur le support global autrement dit la structure proprement dite (cf. illustration 3).



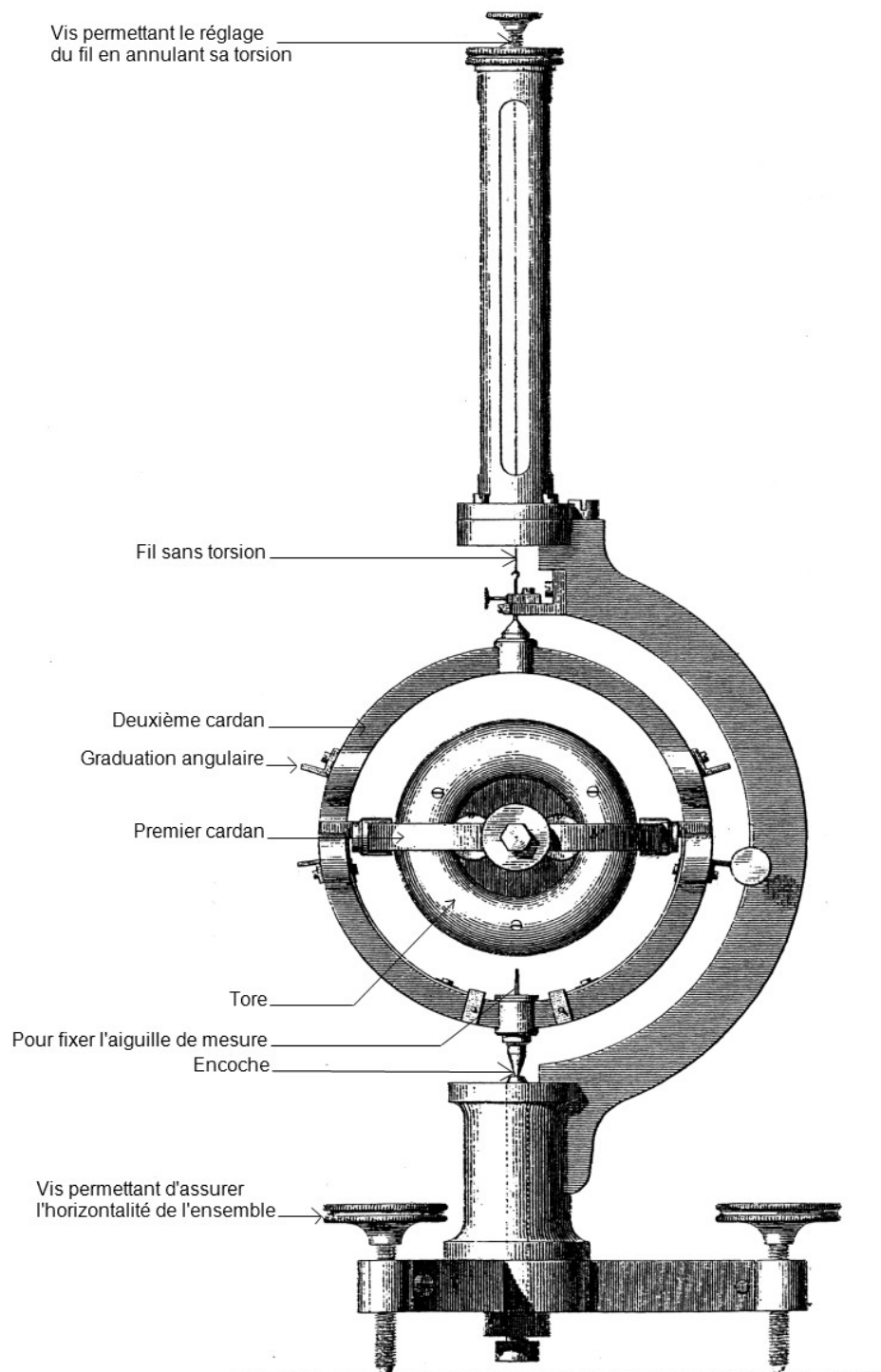
*Illustration 3: Appareils de mesure*

Le reste de l'appareil sert à maintenir le gyroscope et à lui permettre de conserver le mouvement caractéristique recherché. Pour commencer la manipulation il faut tout d'abord donner une vitesse de rotation au gyroscope en utilisant un système à engrenages inclus dans un socle (illustration 2) sur le dessus duquel on fixe l'ensemble représenté à gauche grâce à des vis. Le mouvement transféré grâce à la manivelle permet de procurer au tore une vitesse de rotation de l'ordre de 150 à 200 tours par seconde ce qui est une prouesse pour l'époque, (et permet d'ailleurs d'élever la durée de l'opération à une dizaine de minutes ce qui est suffisant pour la démonstration et la prise de mesures) c'est-à-dire 1852, année de présentation du gyroscope à l'Académie des Sciences .



*Illustration 2: Chaîne d'engrenages*

On laisse alors le gyroscope à son mouvement de rotation, celui-ci étant très stable de par la forme même de l'objet (le tore voit la plupart de sa masse éloignée de son axe de rotation propre) et on constate la rotation décrite plus haut, mouvement qui entraîne la rotation du deuxième . Si le gyroscope était parfait, on constaterait que sa période de rotation vaut 23h56 soit la même que pour la Terre. Comme cela n'est pas le cas il faut pouvoir quantifier le mouvement du gyroscope d'une autre manière. Pour ce faire deux méthodes étaient utilisées par Foucault : il utilisait soit une longue aiguille qu'il plaçait au niveau d'une deuxième, verticale, sous le tore et dont il faisait reposer l'autre extrémité sur une plaquette en carton graduée, cette méthode rendant plus visible le déplacement du gyroscope, celui-ci ayant un mouvement très lent ; il pouvait également observer au microscope une échelle graduée en dixièmes de degré placée sur le deuxième cardan qui tournait autour de l'axe vertical (cf. illustration 4).



*Illustration 4: Vue d'ensemble du gyroscope*

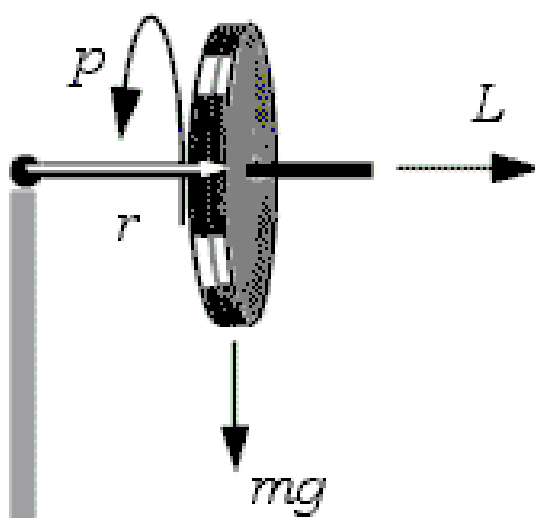
## Autres applications

Cette expérience n'est pas la seule qui peut être réalisée grâce au gyroscope bien qu'elle soit probablement la plus intéressante du point de vue purement théorique.

Une autre manipulation nommée inclinaison consiste à simuler la position de la terre dans l'espace grâce au gyroscope : après l'avoir équilibré sur le support (grâce à des masses courantes disposées sur le premier cardan) on le fait tourner de l'Ouest vers l'Est et on le pose sur le support en reposant sur le tranchant des couteaux situés sur le côté du premier cardan, le deuxième ayant été fixé dans un plan perpendiculaire à celui du méridien, obligeant le gyroscope dont les couteaux sont alors dirigés de l'Ouest vers l'Est à se déplacer dans le plan du méridien. Le tore s'incline alors de manière à représenter la position de la Terre dans l'espace (cf. photo de la première page), partageant la position de son axe et son sens de rotation. On peut également faire tourner le gyroscope dans l'autre sens mais l'inclinaison est alors bientôt limitée par la construction du support qui ne permet pas une meilleure position.

On peut également réaliser l'expérience de l'orientation en bloquant le premier cardan sur le deuxième de telle façon que son axe et donc celui du tore ne peuvent sortir du plan horizontal. En mettant alors en mouvement le gyroscope on constate qu'il réalise une série d'oscillations autour de l'axe du méridien, oscillations qui disparaissent dès que les frottements les ont absorbées en considérant que le tore tourne assez longtemps. Le gyroscope est alors stabilisé dans la direction du méridien. On peut dès lors remarquer que le gyroscope indique le Nord et peut remplacer la boussole, ce qui permettra des applications dans le domaine de la navigation ainsi que dans l'aéronautique à venir sous le nom de compas gyroscopique (dont le mouvement doit être entretenu par un moteur).

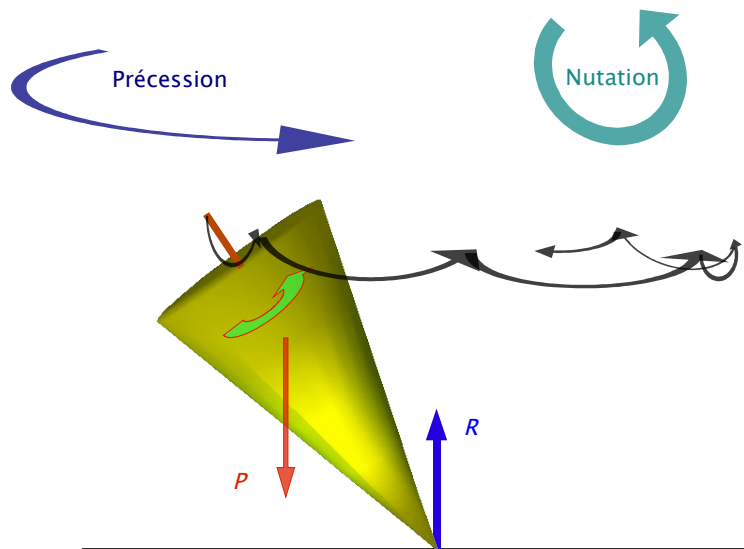
On peut également mettre en évidence le mouvement de précession (c'est-à-dire la modification de l'axe de rotation d'un objet, n'étant plus fixe cet axe générera un cône dans l'espace) en fixant un crochet au bout de l'axe qui traverse le tore et en faisant tourner celui-ci très rapidement. On attache alors ce crochet au sommet d'un support : le gyroscope a alors l'essentiel de sa masse située hors du point d'appui. On relève alors l'extrémité laissée libre du gyroscope et on la lâche, le gyroscope ne tombe pas mais l'axe qui le traverse devient le rayon du cercle décrit par l'extrémité libre du gyroscope sous l'effet de la précession jusqu'à ce qu'il tombe, la vitesse ayant fortement diminuée (cf. illustration 5).



*Illustration 5: Schéma simplifié de la démonstration de la précession*

## Le fonctionnement du gyroscope

Il faut tout d'abord savoir qu'une telle construction demande une grande précision, ce qui était plus ou moins le fort de Foucault mais son côté expérimentateur ne suffisait pas car c'était un appareil extrêmement compliqué à réaliser à l'époque et Foucault recherchait la personne qui pourrait l'assister pour sa construction. Il se tourna vers son collaborateur Gustave Froment qui l'avait déjà assisté pour le pendule. Celui-ci l'aidera à résoudre le principal problème du gyroscope qui consiste en la persistance des mouvements de précession et nutation déjà cités. En effet, ces mouvements, que subit la Terre (à cause du Soleil pour la précession, de la Lune pour la nutation), peuvent être subis par le gyroscope et ainsi cacher le mouvement de rotation de la Terre (cf. illustration 6). Foucault avait déjà préféré la forme torique plutôt qu'une masse conçue comme pour l'appareil de Bohnenberger pour la stabilité. Le mouvement doit en effet être le plus parfait possible. Foucault arrivera d'ailleurs à un appareil plus que satisfaisant.



*Illustration 6: Précession et nutation*

Le gyroscope peut être assimilé à cette toupie puisqu'elle partage en gros le même mouvement de rotation. Or ce type de mouvement entraîne l'apparition de deux phénomènes appelés précession et nutation lorsque le corps étudié est soumis à un couple de force ce qui est le cas du gyroscope soumis à son poids ici représenté par le vecteur  $P$  et à la réaction du support, ici  $R$ .

La précession est un mouvement circulaire perpendiculaire au plan contenant  $P$  et  $R$  (donc parallèle au sol sur le schéma ci dessus). Ce mouvement s'inverse si le solide tourne dans l'autre sens.

Quant à la nutation, il s'agit d'une oscillation de faible amplitude autour de la position moyenne de l'axe de rotation.

Il faut donc que le poids et la réaction du support se compensent exactement pour pouvoir utiliser le gyroscope, c'est ce qu'ont réussi Foucault et Froment en annulant ces deux vecteurs grâce à un fil de soie sans torsion.

Ceci permet à l'axe de rotation de rester fixe dans le repère galiléen ce qui est la condition fondamentale de fonctionnement du gyroscope. Effectivement lorsqu'un corps qui n'est soumis à aucune force extérieure a un mouvement de rotation autour d'un de ses axes d'inertie principaux alors cet axe reste parallèle à lui-même si ce corps se déplace, cet axe restant libre de prendre n'importe quelle position dans l'espace. C'est ce que l'on constate avec le gyroscope, son mouvement relatif fait qu'il est apparemment en rotation et se déplace par rapport à ce qui l'entoure, comme les étoiles avec lesquelles il est d'ailleurs aligné alors qu'en réalité il n'a pas de mouvement absolu excepté celui qu'on lui a communiqué autour de l'axe qui le traverse. Sa période étant effectivement de la durée du jour sidéral.

Le principal intérêt du gyroscope est sa plus grande simplicité de fonctionnement et d'explication face au pendule étant donné que, contrairement à ce dernier, il n'a pas de trajectoire à mettre en équations, ce qui rend l'analyse de son mouvement beaucoup plus simple (puisqu'il ne s'agit que d'une rotation).

On peut toutefois mettre ce mouvement sous forme d'une équation simple en utilisant pour cela le moment :

$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{L}}{dt} \text{ avec } \vec{L} \text{ moment cinétique, or } \vec{L} = I \cdot \vec{\omega} \text{ avec :}$$

$\vec{\omega}$  : vecteur vitesse angulaire du gyroscope

$$I : \text{moment d'inertie} = \sum_i r_i^2 m_i$$

avec  $i$  points du solide,  $r_i$  distance du point  $i$  à l'axe de rotation du solide,  $m_i$  masse du point  $i$ .

$$\text{D'où : } \vec{\sigma} = \frac{d(I \cdot \vec{\omega})}{dt} = \frac{dI}{dt} \vec{\omega} + I \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Or  $\frac{dI}{dt} = 0$  car  $r_i, m_i$  ne varient pas pour le gyroscope (le tore garde évidemment sa forme et sa masse).

Finalement :  $\vec{\sigma} = I \vec{\alpha}$  avec  $\vec{\alpha}$  : accélération angulaire du gyroscope.

Il apparaît donc immédiatement que le gyroscope a un mouvement beaucoup plus aisé à mettre en forme que le pendule puisque seuls deux facteurs sont utilisés, cela permet d'éviter les équations cartésiennes ou polaires du pendule.



En conclusion, cette expérience connaîtra autant de succès dans le monde scientifique que celle du pendule bien que moins spectaculaire qu'un pendule de 68m de long, la « surprise » de la preuve de la rotation terrestre en moins. Foucault aura donc rempli son objectif en trouvant un moyen très simple de prouver cette rotation sans dénaturer l'expérience.