TÉLÉDÉTECTION AÉROSPATIALE ET PENDULE DE FOUCAULT

René VERREAULT et Sonia LAMONTAGNE

Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi,
555, boulevard de l'Université, Saguenay (Québec), Canada G7H 2B1
Téléphone : 418-545-5011, poste 5207; courriel : René_Verreault@uqac.ca ; sonia.lamontagne@gmail.com

Soumis le 12 janvier 2007 ; révisé le 20 mars 2007 ; accepté le 19 juin 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 507-524

Résumé

Pendant la décennie 1980, la région Saguenay – Lac-Saint-Jean, au Québec, a servi de berceau au développement d'un type particulier de télédétection, qui consistait à capter par imagerie aérienne des réseaux d'artéfacts servant de transducteurs pour la répartition de diverses grandeurs à mesurer. Ainsi, une méthode aérienne de télédétection active dite « anémographique » a rendu possible, à l'échelle d'une bleuetière de quelques kilomètres carrés, une étude des patrons compliqués de drainage d'air froid à 1 m au-dessus du sol, lors d'inversions thermiques nocturnes. Dans ce cas, les transducteurs anémométriques prenaient la forme de girouettes spéciales, munies chacune de quatre réflecteurs catadioptriques. La photographie aérienne nocturne à la lampe éclair de ces transducteurs permettait d'imager les patrons instantanés de drainage d'air froid (vitesse et direction) sur une superficie de 1 km^2 à partir d'altitudes atteignant 2 500 m. Dans la décennie 1990, l'avènement de la vidéographie aérienne numérique et sa faible compétitivité d'alors face à la définition des pellicules photographiques ont suscité un intérêt pour un logiciel convertissant la redondance temporelle d'information en une résolution spatiale de l'ordre du sous pixel, mais il n'a pas eu de suite dans la littérature. On convint cependant en 2001 de l'appliquer au problème d'une expérience qui n'avait jamais bien fonctionné en 32 ans d'histoire de la physique à l'UQAC, l'expérience classique du pendule de Foucault. Les hauteurs de la cathédrale furent mises à contribution, de même que le positionnement du pendule par vidéographie numérique de repères rétroréfléchissants sur sa surface, à partir de la voûte de la cathédrale. Finalement, les apparentes erreurs expérimentales du passé se sont avérées de réels effets gravitationnels explicables partiellement par la topographie locale. Le positionnement instantané du pendule de façon significative à ± 0,05 pixel près a permis de mesurer avec précision des variations de vitesse de précession du plan d'oscillation corrélées, d'une part, avec la marée dans le Saguenay, d'autre part, avec la répartition de la masse rocheuse autour de la cathédrale et, enfin, avec le couplage spin-orbite lorsqu'on laisse la masse osciller lentement en torsion. Les résultats détaillés d'une expérimentation sur une durée de 12 h sont rapportés et discutés ici. Le pendule de Chicoutimi s'avère être le premier pendule de Foucault de courte durée au monde capable de mesurer des effets de marée luni-solaire. Lors de l'éclipse annulaire de soleil du 22 septembre 2006, dans une tentative de détecter l'effet d'Allais, phénomène encore inexpliqué qui échappe à la relativité générale, le pendule, y inclus une tour de suspension rigide conçue localement, a été transporté par cargo aérien puis installé sur le campus Saint-Denis de l'Université des Antilles et de la Guyane, à Cayenne. Toutefois, les résultats de cette expédition ne sont pas encore analysés.

Mots clés : Vidéographie aérienne ; métrologie ; résolution sous pixel ; pendule de Foucault ; effet d'Allais ; gravitation.

AEROSPATIAL REMOTE SENSING AND FOUCAULT PENDULUM

Abstract

During the 1980 decade, the Saguenay – Lac-Saint-Jean region, in Québec, was host to a remote sensing development of a particular type, namely the survey, from an airborne platform, of a network of artefacts used as transducers for the measurement of spatially distributed parameters. In this manner, during nocturnal temperature inversions, a study of complicated cold air drainage patterns, 1 m above ground in a blueberry field covering a few square kilometres, was made possible by an active airborne remote sensing method called « anemography ». In this case, special weather vanes, each provided with four retroreflecting discs, were used as transducers. Through nocturnal aerial flash photography of these transducers from altitudes reaching 2 500 m, instantaneous cold air drainage patterns (speed and direction) over a 1 km^2 area were obtained. In the 1990's, as an effort to compensate for the lack of spatial resolution, as compared to photography, of the newly emerging digital airborne videography, the possibility of transforming by software the redundant temporal information into subpixel spatial resolution was found interesting, but there was no

follow-up on this issue in the litterature. However, is was recognized that, through the use of this method, the classical Foucault pendulum experiment could be given some sort of revival. That experiment had never performed really well in the 32-year history of physics teaching at UQAC. Therefore, the heights of the cathedral and the remote sensing of pendulum positions through digital videography of tiny self-adhesive retroreflectors were put to contribution. In conclusion, the so-called experimental errors of the past proved to be actual gravitational effects partially explained by local topography. Thanks to an instantaneous positioning of the pendulum significant to ± 0,05 pixel, precise measurements of fluctuations in the precession speed of the oscillating plane could be ascertained as correlated to the tides in Saguenay River, to the rock distribution around the cathedral and finally to spin-orbit coupling when the mass is allowed to slowly oscillate in torsion. The detailed results of a 12-hour experiment are reported here and discussed. The Chicoutimi pendulum proved to be the first Foucault pendulum of short duration in the world capable of measuring luni-solar tide effects. During the annular solar eclipse of September 22, 2006, in an attempt to detect the Allais effect, an as yet unexplained phenomenon which eludes general relativity, the pendulum including a custom-designed rigid suspension tower was flown by air cargo and installed on the Saint-Denis campus of the Université des Antilles et de la Guyane, at Cayenne. However, the results of this journey have not yet been analyzed.

Key words : Aerial videography ; Metrology ; Subpixel resolution ; Foucault pendulum ; Allais effect ; Gravitation.

1. INTRODUCTION

Pendant la décennie 1980, la région Saguenay – Lac-Saint-Jean, au Québec, a servi de berceau au développement d'un type particulier de télédétection qui consistait à capter par imagerie aérienne des réseaux d'artéfacts servant de transducteurs pour la répartition de diverses grandeurs à mesurer. L'utilisation de survols thermographiques nocturnes et diurnes par Lemieux et Labonté (1984) dans les bleuetières du Lac-Saint-Jean s'était avérée un outil puissant pour compléter dans le plan horizontal les profils verticaux de température et de vent fournis alors par deux tours micrométéorologiques. Comme ces tours à plusieurs kilodollars pièce étaient tout aussi bien inappropriées pour livrer les patrons de drainage nocturne d'air froid dans les premiers mètres de la couche limite atmosphérique, à moins de les multiplier et de dépasser de beaucoup le budget du projet, l'idée d'imager, au moment opportun, un réseau de girouettes légères par télédétection s'imposa d'elle-même (Verreault *et al*., 1985). Dans ce cas, les transducteurs anémométriques prenaient la forme de structures articulées orientables, déformables par de faibles brises et munies d'un certain nombre de réflecteurs catadioptriques mobiles (voir aussi Lemieux *et al*., 1994). La photographie aérienne nocturne à la lampe éclair de ces transducteurs permettait d'imager les patrons instantanés de drainage d'air froid (vitesse et direction) sur 1 km^2 à partir d'altitudes atteignant 2 500 m.

Dans la décennie 1990, l'avènement de la vidéographie aérienne numérique et sa faible compétitivité d'alors face à la résolution des pellicules photographiques ont suscité un intérêt pour des logiciels convertissant la redondance temporelle d'information en une précision de l'ordre du sous pixel. Un développement dans ce sens s'est amorcé à Chicoutimi (Verreault *et al*., 1995) où, pour une séquence d'images donnée par un capteur vidéographique matriciel, un algorithme applicable à une cible en mouvement (par exemple le terrain qui défile sous l'avion) a démontré une augmentation de résolution d'un facteur de 5.

En 2001, on convint donc d'appliquer cet algorithme au problème d'une manipulation de laboratoire qui n'avait jamais trop bien fonctionné en 32 ans d'histoire du baccalauréat en physique à l'UQAC, l'expérience classique du pendule de Foucault.

Une masse suspendue à un fil est mise en oscillation dans un plan. Selon le principe d'inertie, ce plan d'oscillation demeure fixe par rapport aux étoiles alors que la Terre tourne sous le pendule. Il s'ensuit, pour l'observateur, une rotation apparente (précession) du plan d'oscillation par rapport au plancher. Pour la latitude de Chicoutimi, cette précession doit faire un tour complet en 32 h, soit à la vitesse angulaire très constante de 11,25 °/h. Cependant, la vitesse de précession mesurée accusait souvent une erreur de ± 15 % et l'oscillation de la masse, au lieu de se projeter sur une droite au plancher, dégénérait en une trace elliptique déjà après quelques minutes. Ce dernier défaut se corrige par un très long fil. Quant à l'erreur de vitesse de précession, seule une grande précision dans les mesures de position du pendule pouvait la juguler. C'est donc dans cette perspective que, pour l'édition 2001 de l'expérience du pendule de Foucault à l'UQAC, 150 ans après l'édition originale par Jean-Bernard-Léon Foucault au Panthéon de Paris, les hauteurs de la cathédrale de Chicoutimi furent mises à contribution, de même que le positionnement par vidéographie numérique à partir de la voûte, en imageant des repères lumineux rétroréfléchissants fixés sur le pendule.

Dans cet article, on se propose de montrer comment la vidéographie d'artéfacts à distance est exploitée pour mesurer avec précision les mouvements subtils du pendule. Les divers algorithmes utilisés dans le traitement d'images seront aussi décrits en détail. Une prospective sera présentée sur le potentiel de ce type de pendule pour mesurer l'effet d'Allais (1997).

2. SITE EXPÉRIMENTAL

Sur la figure 1, on montre le voisinage de la cathédrale en pierres, dans l'arrondissement de Chicoutimi de la ville de Saguenay, au Québec. Le pendule, dont la masse est à 32 m d'altitude, est identifié par le X encerclé sur le croquis de l'édifice. La berge du Saguenay est visible à 325 m plus au nord. La rivière est le siège de marées d'environ 4,5 m à cette période de l'année (le 6 juin 2001). À partir des isohypses, on remarque le relief granitique du fjord qui monte vers le sud-est à proximité du pendule, avec une pente moyenne de 15 %. Cette montée culmine en un plateau de 70 m d'altitude, à 500 m au sud-est.

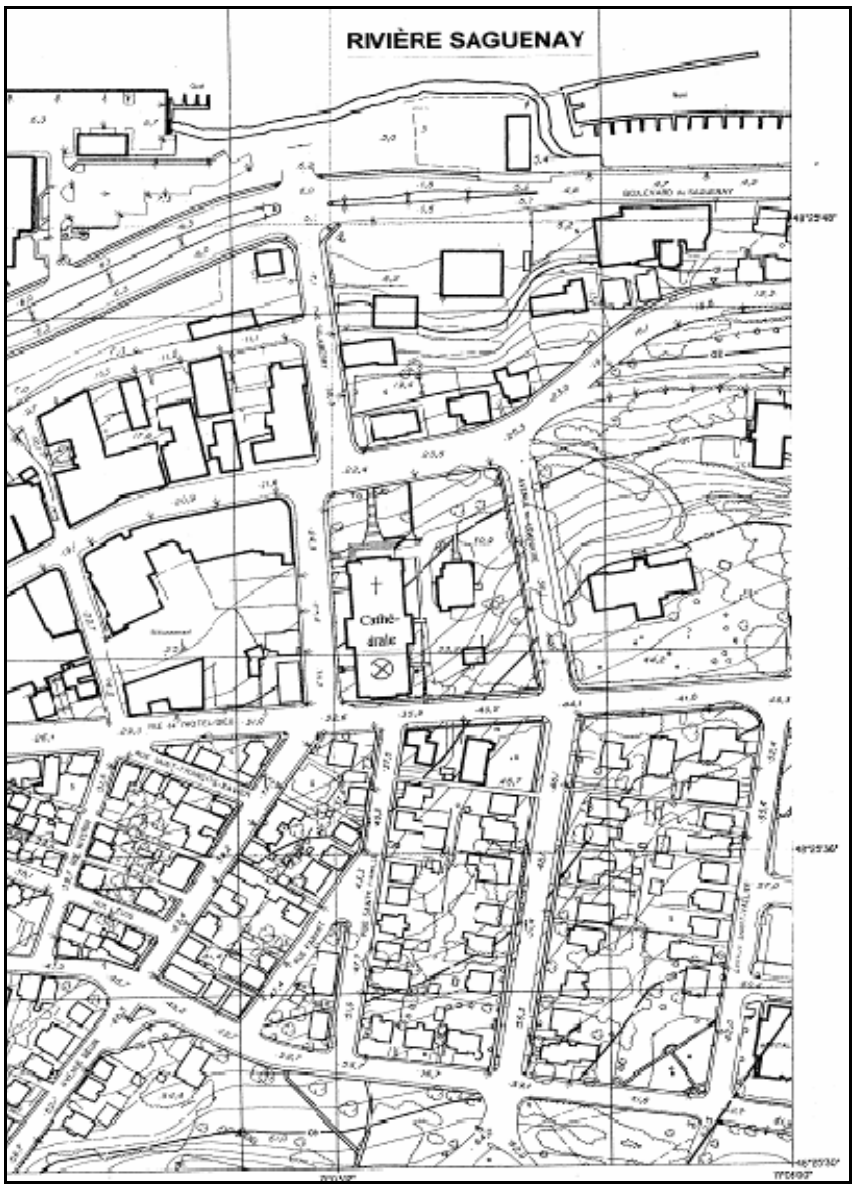


Figure 1 : Reproduction partielle d'une carte planimétrique et topographique (en mètres) à une échelle originale de 1 : 10 000 de la ville de Saguenay (arrondissement de Chicoutimi). Dans la cathédrale, le X encerclé situe l'axe du pendule *Partial view of an original scale of 1 : 10 000 planimetric and topographic map (in meters) of the city of Saguenay (Chicoutimi borough). In the cathedral, the pendulum axis is marked by the encircled X.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le pendule de Foucault utilisé dans ce projet est du type non entretenu. Il ne comporte aucune source d'énergie autre que l'énergie potentielle gravitationnelle emmagasinée lorsqu'il est initialement écarté de sa position de repos avant le lancement. On cherche donc à contrer le plus possible les causes d'amortissement, en utilisant notamment une suspension extrêmement stable, un fil fin, long et élastique, une masse dense et lisse ayant le moins de traînée aérodynamique possible. Ce type de pendule est ainsi exempt des perturbations engendrées par les inévitables asymétries d'un excitateur électro-mécanique.

Dans la version de 2001, une sphère de plomb originalement plutôt rugueuse a reçu un traitement de surface à l'époxy puis une peinture au fini brillant. Dans la version de 2006, un carénage a été réalisé en boulonnant, face à face, deux miroirs paraboliques en aluminium anodisé de 30 cm de diamètre. On a expérimenté soit avec la sphère de 2001 enveloppée de ce carénage, soit avec du plomb coulé dans tout l'espace interne du carénage. La décélération aérodynamique étant inversement proportionnelle à la masse, ce dernier modèle permet des mesures étalées sur plus d'une journée sans perturbation d'excitateur.

3.1. Montage

Le schéma d'installation du pendule est illustré à la figure 2. Un fil d'acier (corde de clavecin), dont les extrémités sont serties dans deux mandrins, est fixé tant à la structure d'une arche de la cathédrale qu'à la masse de plomb oscillante. Le fil est choisi de telle façon, qu'à la sortie du mandrin supérieur fixe, la flexion à l'amplitude maximale demeure dans les limites élastiques du matériau. D'une longueur libre d'environ 17,3 m, il traverse le plafond par une ouverture juste suffisante pour ne pas limiter son mouvement et pour garantir à une caméra CCD placée le plus près possible du point de suspension, un champ de vision correspondant à la course du pendule. Sur le tableau 1, figurent les principales caractéristiques de deux versions de ce pendule. Sauf indication contraire, les résultats présentés ici s'appliquent à la version de 2001.

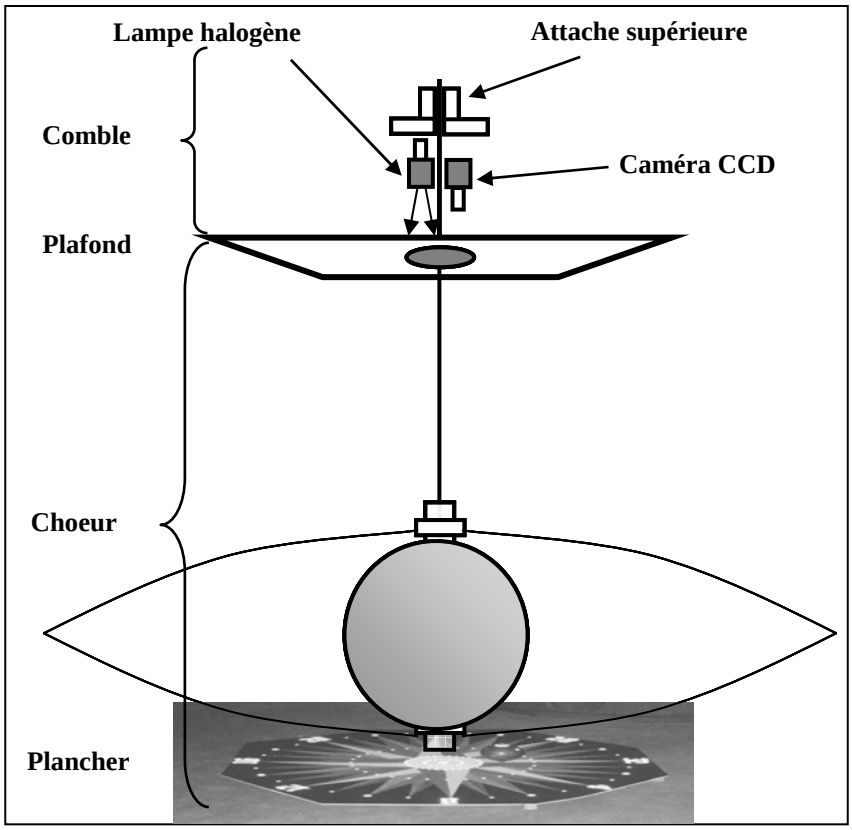


Figure 2 : Schéma de montage du pendule. Le fil est fixé aux deux extrémités dans des mandrins. L'enveloppe de forme lenticulaire englobant la sphère symbolise un carénage aérodynamique optionnel en aluminium anodisé. *Sketch of the pendulum installation. The wire is fixed in a chuck at both ends. The lenticular shape around the sphere represents an optional aerodynamic fairing made of anodized aluminium.*

Le lancement du pendule se fait selon la méthode originale de Léon Foucault. La masse est d'abord stabilisée dans une position écartée de la verticale, à l'aide d'un fil à coudre très fin sous-tendu entre un statif et l'attache de lancement montrée sur la figure 3. Lorsque le feu d'une allumette brûle le fil, la dernière image immobile dans la séquence vidéographique marque le temps zéro à 1/60^{e} s près. Le temps écoulé se mesure ensuite par le temps codé de la caméra, au rythme standard de 29,97 images/s. Sur la figure 3, on montre aussi la disposition des repères rétroréfléchissants, qui servent à situer le centre de masse de la sphère et son azimut en rotation sur elle-même (*spin*) autour du fil d'acier. Les repères 1 et 2 sont constitués de disques en pellicule autocollante, de type 3M Scotchlite® jaune de 3 mm de diamètre, situés de part et d'autre d'un anneau central fait du même matériau. Ils sont éclairés par une ampoule à halogène 50 W placée près du point de suspension et de la caméra. Sous le pendule, le plancher est tapissé d'une rose des vents à 32 pointes, munie elle aussi d'un réseau de repères rétroréfléchissants, qui définissent le système de coordonnées solidaire du plancher. Ils servent à étalonner non seulement le mouvement de la masse, mais aussi la dérive du point de suspension due aux déformations de l'édifice et aux variations de la composante horizontale de l'accélération gravitationnelle.

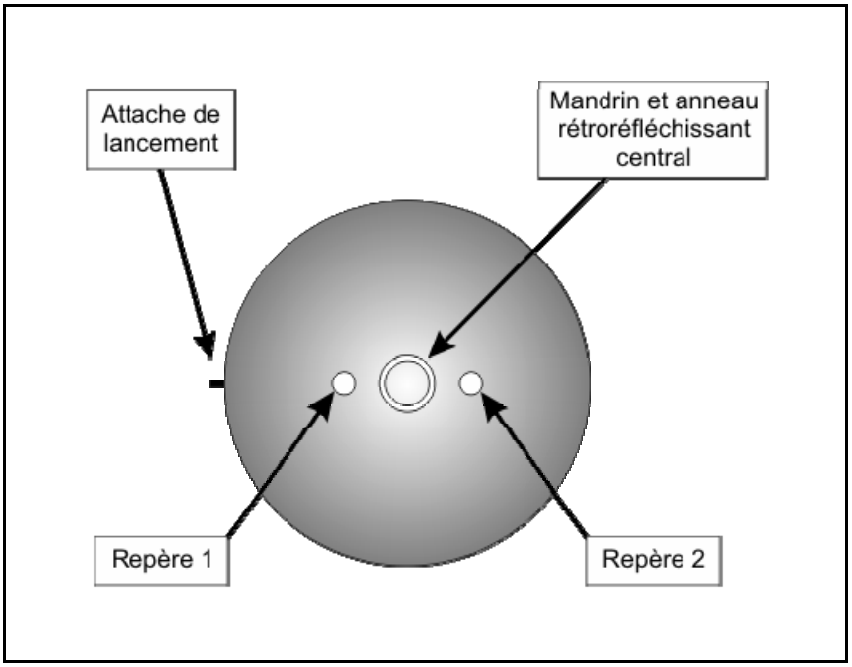


Figure 3 : Positionnement des repères rétroréfléchissants utilisés par le traitement d'images, en rapport avec l'attache de lancement, dans une vue du dessus de la masse. *Positioning of the retroreflecting reference marks used in the image processing, referred to the launching attachment, in a top view of the mass.*

3.2. Traitement d'images

L'imagerie est obtenue avec une caméra industrielle CCD à haute résolution de type Watec 902C ou Sony XC-75, selon les versions. Le pixel de terrain valant 1,83 mm, l'image d'un repère catadioptrique numérisée sur 8 bits donne une distribution du signal typique de celle de la figure 4. Sur une croix de 5 x 5 pixels englobant le maximum, l'ajustement de deux polynômes de degré 4 permet de situer le maximum à une fraction de pixel près. En fonction de cet algorithme, un bruit typique de numérisation de ± 2 niveaux de gris entraîne une indétermination de localisation de ± 0,05 pixel.

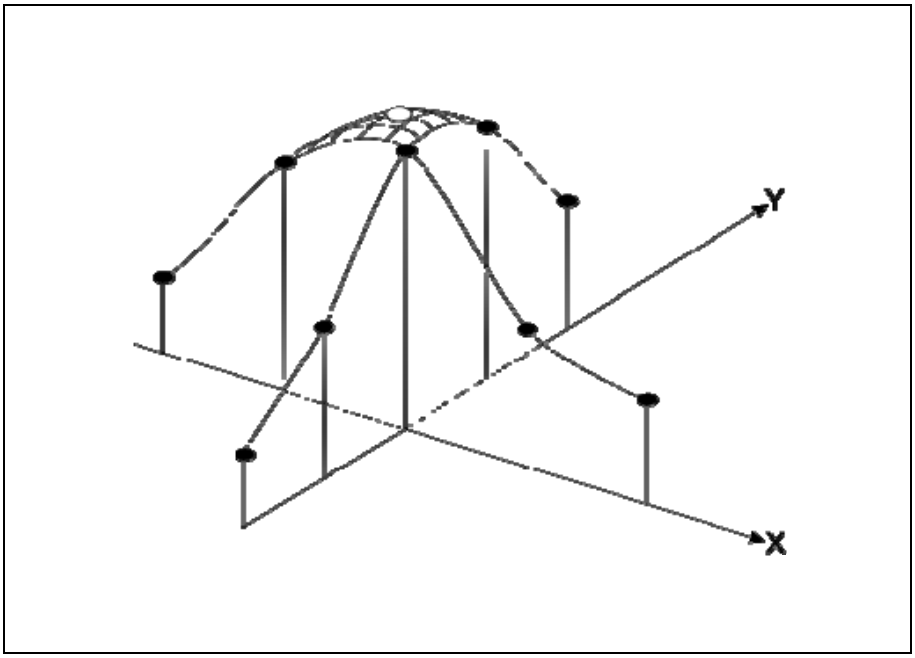


Figure 4 : Répartition typique de l'éclairement dans l'image d'un repèrerétroréfléchissant en fonction d'une croix de 5 x 5 pixels. L'ajustement bidirectionnel de deux polynômes de puissance 4 par la méthode des moindres carrés donne l'adresse du maximum à une fraction de pixel près. *Typical light intensity distribution along a 5 x 5 pixel cross in the image of a retroreflecting reference mark. The address of the maximum within a fraction of a pixel is obtained by the bidirectional least-square fitting of two 4th power polynomials to the data.*

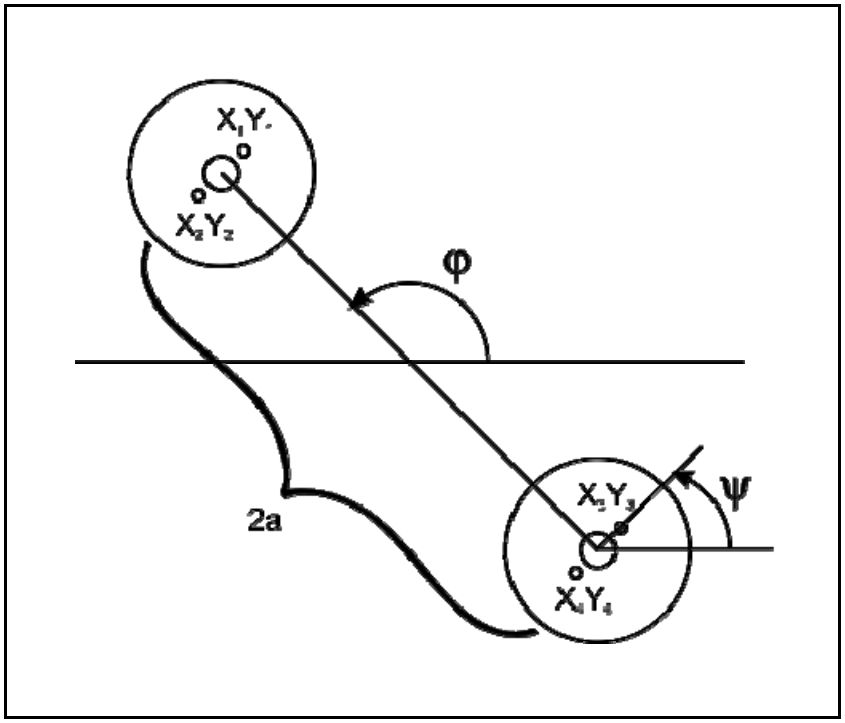


Figure 5 : Méthode de détermination de l'amplitude *a* et de l'azimut φ de l'oscillation, ainsi que de l'azimut de spin ψ de la sphère, à partir des deux positions extrêmes d'une demi-oscillation. *Determination method for the amplitude a and the azimuth φ of the oscillation, and for the azimuth of spin ψ of the sphere, from the two extreme positions of a half-oscillation.*

Pour des mesures de l'amplitude *a* et de l'azimut φ de l'oscillation, les deux positions extrêmes d'une demi-période sont utilisées, comme on le montre sur la figure 5. Pour déterminer un extrême, un bord de l'anneau rétroréfléchissant central est analysé dans une séquence de 16 images, incluant l'extrême. À une adresse de pixel fixe sur le bord faisant face à l'axe vertical du pendule, le signal décroît à mesure que la sphère s'éloigne. Le minimum de ce signal détermine de façon non équivoque l'image la plus éloignée dans la séquence, de même que son instant à ±1/60^{e} s. À partir des coordonnées des repères latéraux de la sphère, l'amplitude est donnée par :

$$a\ (\text{pixel}) = \frac{1}{4}\sqrt{\left[F_y{}^2\left(y_4 + y_3 - y_2 - y_1\right)^2 + \left(x_1 + x_2 - x_3 - x_4\right)^2\right]}, \qquad \text{(équation 1)}$$

où F_y est un facteur d'aspect tenant compte de ce que le pixel physique du capteur est rectangulaire dans le format vidéographique du Comité du système de télévision nationale (NTSC) .

Quant à l'azimut d'oscillation, il vaut :

$$\varphi = \tan^{-1}\left[-\frac{F_y\left(y_1 + y_2 - y_3 - y_4\right)}{\left(x_1 + x_2 - x_3 - x_4\right)}\right], \qquad \text{(équation 2)}$$

où le signe (-) devant la fraction vient de ce que, dans un fichier d'images vidéographiques, la coordonnée *y* est positive vers le bas alors qu'on la définit positive vers le haut à l'écran et sur le terrain.

De même, l'azimut de la sphère en éventuelle rotation sur elle-même est donné par :

$$\psi = \tan^{-1}\left[-\frac{F_y\left(y_1 - y_2\right)}{\left(x_1 - x_2\right)}\right]. \qquad \text{(équation 3)}$$

Dans la version de 2001, la numérisation a été faite à partir d'un enregistrement analogue des images. Le bruit additionnel de lecture analogue a conduit à une estimation réaliste de ± 0,2 pixel sur *x* et sur *y*. La combinaison statistique de ces erreurs à travers les formules mentionnées ci-dessus donne les valeurs suivantes pour les demi-axes d'ellipse et les angles : $\Delta a = 0{,}1$ pixel, $\Delta b = 0{,}06$ pixel, $\Delta\varphi = 0{,}05$ °, $\Delta\psi = 0{,}5$ °. On verra sur les courbes de résultats que ces estimations sont compatibles avec les résidus d'ajustement des formules théoriques pour l'azimut d'oscillation.

Une autre grandeur d'importance est l'ellipticité de l'orbite du pendule, caractérisée par le rapport du petit axe 2*b* sur le grand axe 2*a*. Bien que le pendule de Foucault soit approximativement basé sur une oscillation dans un plan, il s'agit rigoureusement d'une ellipse très allongée dans le repère inertiel des étoiles fixes. Dans le repère tournant de la Terre, l'effet de la rotation de la Terre se traduit par l'apparition de l'accélération de Coriolis transversale au plan d'oscillation. Ainsi, pendant le premier quart de période, la masse qui progresse vers la verticale du point de suspension rate cette verticale par quelques dizaines de micromètres à la droite dans l'hémisphère Nord (et à la gauche dans l'hémisphère Sud). Cet écart constitue, d'une part, le demi-axe *b* de l'ellipse très allongée du référentiel inertiel et, d'autre part, le rayon du cercle central de la figure polycuspide (figure 6), décrite par la masse dans le référentiel tournant. Cette pseudo-ellipticité de Foucault vaut, pour le pendule de la version de 2001 :

$$\frac{b_F}{a} = \frac{\pi}{2}\frac{\Omega \sin \lambda}{\omega_0} = 0{,}00011, \qquad \text{(équation 4)}$$

où Ω est la vitesse angulaire de rotation de la Terre ; λ est la latitude du pendule ; ω_0 est la fréquence angulaire d'oscillation (pulsation).

En valeur absolue, le demi-axe de l'effet Foucault b_F faisait 28 µm initialement et 2,3 µm après 12 h, ce qui n'est pas perceptible à l'œil.

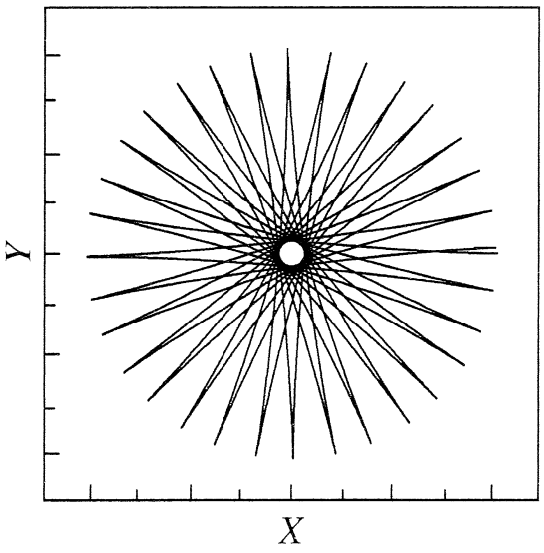


Figure 6 : Trajectoire polycuspide du pendule de Foucault dans le référentiel tournant lorsque les conditions initiales sont idéales, d'après Baker et Blackburn (2006). *Polycuspid path of the Foucault pendulum in the rotating reference frame with ideal initial conditions, following Baker and Blackburn (2006).*

Toutefois, aussi bien un manque de soin lors du processus de lancement que l'anharmonicité inhérente à tout pendule aux grandes amplitudes, ont comme résultat de générer des orbites elliptiques observables dans le référentiel tournant. Ces ellipses s'accompagnent automatiquement d'une précession du grand axe dans le même sens que le sens de parcours de la masse sur l'orbite. Non seulement cette précession parasite, appelée effet Airy, masque grandement la précession de Foucault : elle peut même, dans certains cas, laisser croire que le sens de rotation de la Terre est inversé (Kamerlingh-Onnes, 1879 ; Hecht, 1983 ; Schulz-Dubois, 1970). D'après les auteurs cités, pour un pendule de longueur *l* et de période T_0, cette vitesse de précession parasite est proportionnelle l'aire de l'ellipse πab, soit :

$$\omega_p = \frac{3\pi ab}{4T_0 l^2}. \qquad \text{(équation 5)}$$

Dans le cas du pendule de Chicoutimi, l'ampleur de cette éventuelle perturbation a été évaluée grâce à des mesures précises du demi-axe *b*. La procédure consiste à saisir deux séquences à 30 images/s dans l'aller-retour d'une même oscillation, d'abord au premier passage près de la verticale, puis au passage de retour. L'algorithme ajuste deux droites aux segments de trajectoire de part et d'autre de la verticale, puis calcule la distance entre ces droites sur une perpendiculaire coupant la verticale en question. Les ellipses observées dans l'expérience de 2001 seront discutées à la section 4.

3.3. Traitement statistique

Les positions du pendule résultant du traitement d'images sont mises en graphiques et analysées statistiquement à l'aide du logiciel KaleidaGraph®. Ce logiciel comprend un puissant algorithme d'ajustement de courbes non linéaires avec neuf paramètres ajustables, combinés dans une formule au choix de l'utilisateur. On verra dans la section 4 des applications sous forme de combinaisons données d'amplitudes, de phases et de périodes dans une série de fonctions trigonométriques, ou encore sous forme de combinaisons d'amplitudes.

Une particularité du logiciel KaleidaGraph® est l'accès facile aux erreurs standard d'estimation pour chacun des paramètres. Cela renseigne non seulement sur la précision de détermination de chaque paramètre, mais aussi sur la sensibilité de l'ajustement à chacun de ces paramètres pendant le processus. On peut ainsi choisir les paramètres les plus pertinents et éliminer ceux qui ne sont pas significatifs. C'est l'équivalent de la décomposition, en télédétection, des plans spectraux en composantes principales.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans les résultats présentés, on décrit en détail l'évolution de la précession du pendule en regard de contributions théoriquement expliquables et de contributions pour lesquelles les théories connues de la gravitation ne s'appliquent pas. La précession est analysée à l'aide de séries trigonométriques ajustées aux données expérimentales par la méthode des moindres carrés.

4.1. Précession

Sur la figure 7, on montre l'évolution de l'angle de précession, c'est-à-dire la différence entre l'azimut instantané de l'oscillation et l'azimut initial. Le mouvement du pendule a été mesuré période par période pendant les 13 premières minutes et, pour le reste, des séquences de deux ou trois périodes consécutives ont été saisies à intervalles d'une demi-heure ou d'une heure. L'allure générale est assez voisine de la droite théorique expliquée exclusivement par la vitesse très constante de rotation de la Terre. Les écarts sont illustrés plus en détail sur la figure 8 sous la forme d'une déviation azimutale (ou avance azimutale, lorsque négative). Ils atteignent presque 3 ° en avance après 6 h, pour se résorber ensuite et devenir un retard de 1,5 ° après 12 h. Cependant, l'écart maximal dépassant par un facteur 60 l'écart type des mesures, ces différences, si faibles soient-elles, ne peuvent aucunement être attribuées aux erreurs d'expérimentation.

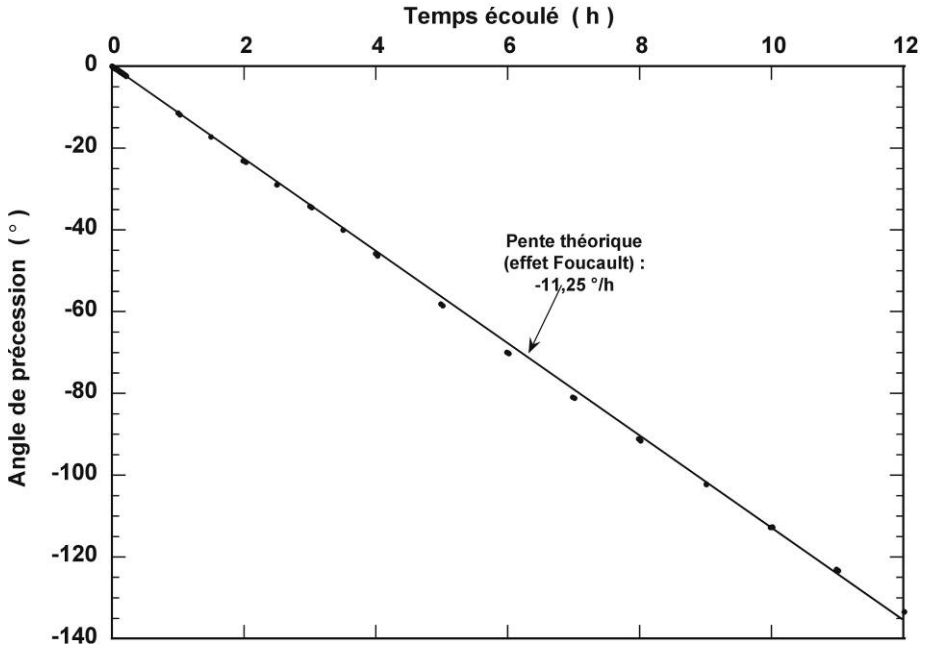


Figure 7 : Évolution de la précession sur 12 h en regard du taux commandé par la rotation de la Terre (effet Foucault). *Evolution of the precession over 12 h compared to the rate due to the rotation of the Earth (Foucault effect).*

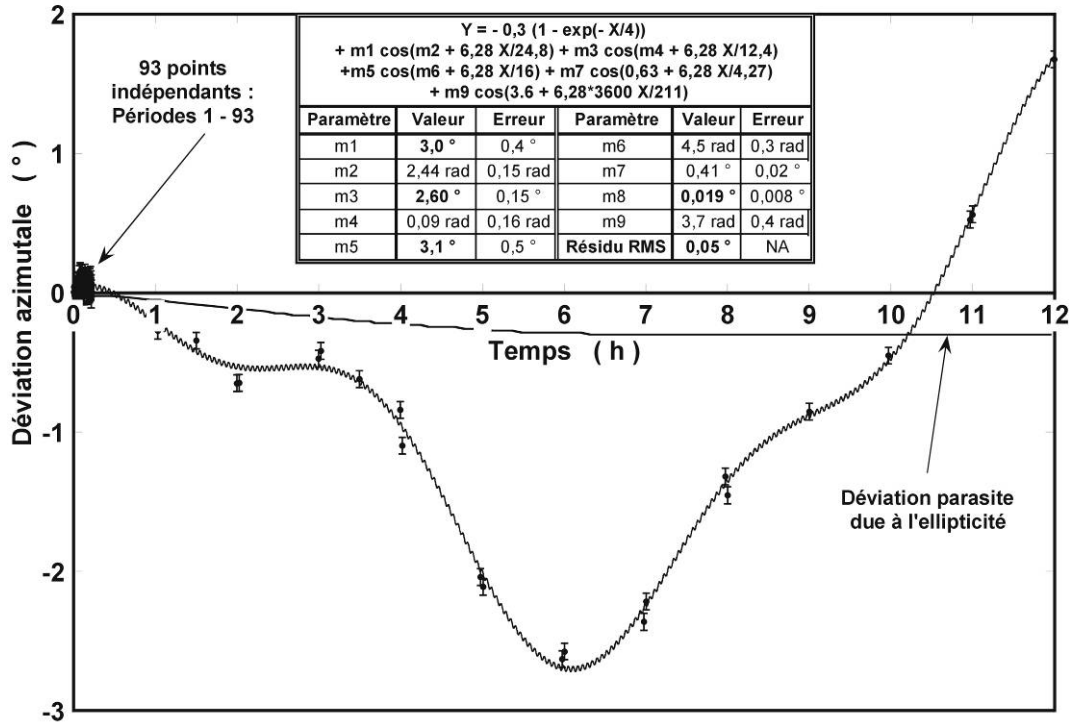


Figure 8 : Déviation de l'angle de précession en fonction du temps par rapport à la valeur prévue selon l'effet Foucault. Les valeurs négatives correspondent à une avance de précession. En utilisant 134 points expérimentaux, un ajustement de fonctions trigonométriques minimisant le χ^2 fait ressortir significativement plusieurs périodes. La période de plus grande amplitude (variable *m7* = 3,5 °) vaut 32 h, soit la durée d'une révolution complète de la surface du sol. La deuxième amplitude en importance (*m1* = 2,3 °) est associée à une période de 12,4 h, qui coïncide avec la composante principale de la marée dans le Saguenay. Deux autres cycles de périodes respectives 16 h et 4,27 h sont aussi détectés de façon nette. Enfin, une oscillation rapide en précession affiche une période de 211 min et une amplitude significative de 0,02 ° (variable *m9*). La courbe en trait fin légèrement en dessous de l'axe du temps représente une déviation parasite associée à la faible ellipticité de l'orbite (effet Airy). Cette courbe devrait en fait être considérée comme la vraie référence des déviations azimutales inexpliquées de la précession. *Precession angle deviation as a function of time, compared to the value predicted by the Foucault effect. Several periods come out significantly when fitting trigonometric functions with minimum χ2 to a set of 134 experimental points. The component with the largest amplitude (variable m7 = 3,5 °) has a period of 32 h, which is the duration of a complete revolution of the ground surface. The second largest amplitude (m1 = 2,3 °) has a period of 12,4 h, which coincides with the principal component of the tide in the Saguenay river. Two other cycles with the respective periods 16 h and 4,27 h have also been neatly detected. Finally, a rapid precession oscillation shows a period of 211 min and a significant amplitude of 0,02 ° (variable m9). The thin curve slightly below the time axis represents a parasitic azimuth deviation due to the small orbit ellipticity (Airy effect). This curve should in fact be considered as the true reference for unexplained precession angle deviations.*

Le spectre de puissance de la série temporelle des données saisies fait nettement ressortir une harmonique de la rotation apparente du sol (la variable *m5* de l'équation d'ajustement sur la figure 8) et deux harmoniques de périodes identiques à celles de la marée dans la rivière Saguenay (variables *m1* et *m3*). Une cinquième période de 4,27 h est aussi détectée significativement avec une amplitude de 0,41 ± 0,02 °, bien qu'elle soit indépendante de la marée.

Les éphémérides de la marée de Chicoutimi sur une série temporelle de 10 jours, incluant la date de l'expérience, ont été analysées. Les résultats colligés, présentés sur la figure 9, montrent une composante principale de période 12,39 (variable *m3*) et d'amplitude 2,27 m, elle-même 2^e harmonique d'une fondamentale, dont l'amplitude est de 0,42 m (variable *m1*). Le dernier facteur de l'équation d'ajustement reflète de plus une modulation, dont la période est de 708 h (29.5 jours). Ces périodes correspondent exactement aux données astronomiques lunaires.

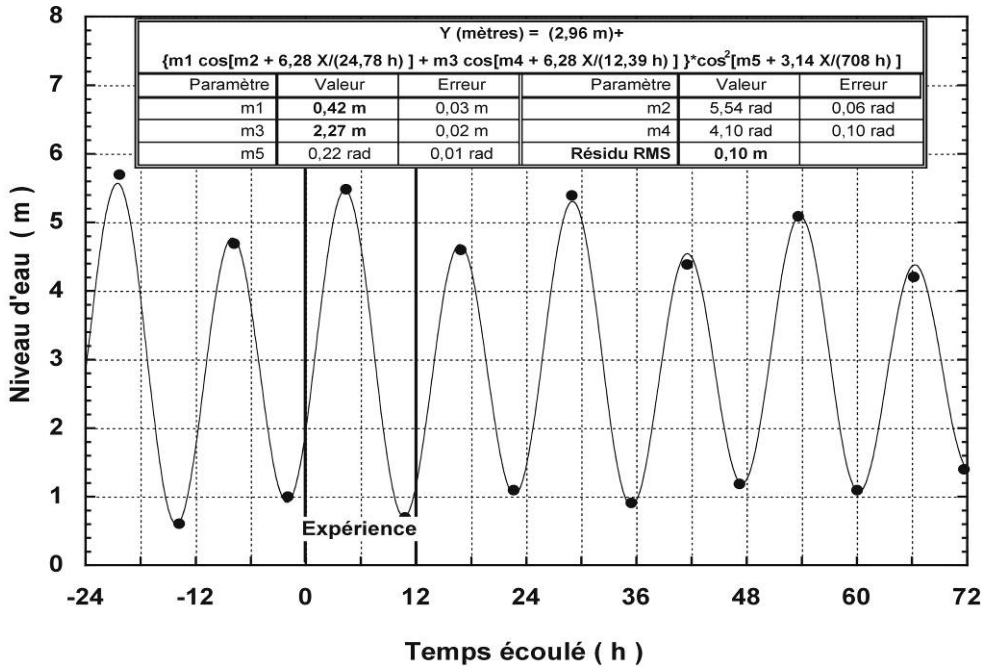


Figure 9 : Évolution de la marée dans la rivière Saguenay à Chicoutimi, un jour avant et trois jours après le début de l'expérience de 2001. Les principales composantes de Fourier ont les amplitudes 2,23 m, 0,42 m et 0,12 m. Leurs périodes respectives sont 12,4 h, 24,8 h et 4,13 h. L'équation est établie sur une série temporelle totale couvrant 10 jours, dont 7 avant le début de l'expérience. *Evolution of the tide in the Saguenay river at Chicoutimi, one day before and three days after the onset of the 2001 experiment. The principal Fourier components have the amplitudes 2,23 m, 0,42 m and 0,12 m. Their respective periods are 12,4 h, 24,8 h et 4,13 h. The equation has been established from a time series covering 10 days, with 7 of them before the onset of the experiment.*

Pour analyser les éventuels effets gravitationnels de la lame d'eau de 4,7 m d'épaisseur apparue dans le Saguenay pendant l'expérience, on doit noter que les forces sur le pendule sont proportionnelles aux masses d'eau, donc aux amplitudes de la marée. Les déplacements du pendule en précession, eux, sont proportionnels aux accélérations angulaires intégrées deux fois par rapport au temps, de sorte que chaque composante d'accélération voit son amplitude multipliée par le carré de la période. Ainsi, les composantes de la marée, qui sont dans les rapports 0,42 : 2,27, devraient donner des composantes de déviation de précession dans les rapports $0{,}42*24{,}8^2 : 2{,}27*12{,}4^2$, soit 0,74 : 1. c'est-à-dire du même ordre de grandeur.

Expérimentalement, les deux premières harmoniques synchrones avec la marée ont été confirmées en précession (variables *m1* et *m3* dans l'ajustement sur la figure 8), leurs amplitudes respectives étant du même ordre de grandeur, respectivement 3,0 ° et 2,6 °. De plus, la 2^e harmonique de la fréquence angulaire de précession (période de 16 h) ressort aussi très nettement, avec une amplitude du même ordre : *m5* = 3,1 ° .

4.2. Vitesse de précession

En adaptant et en dérivant l'équation d'ajustement de la figure 8, on obtient une expression pour la vitesse de précession en fonction du temps, tel qu'illustré sur la figure 10. On note des fluctuations de vitesse de précession atteignant 2,25 °/h, soit ± 20 %. Un intérêt particulier de cette courbe de vitesse angulaire réside dans son potentiel pour cerner les causes possibles des fluctuations. En effet, les zones de fortes pentes négatives indiquent que des couples de forces accélératrices de la précession agissent, alors que les zones de fortes pentes positives indiquent que des couples de freinage agissent.

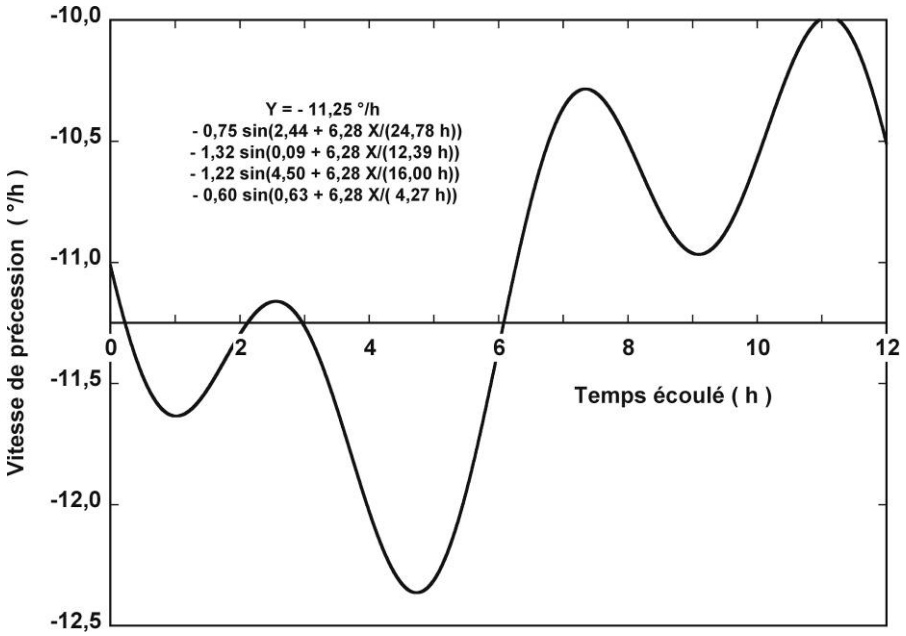


Figure 10 : Vitesse de précession en fonction du temps, abstraction faite de la composante haute fréquence de la figure 8. *Precession speed as a function of time, not including the high frequency component of figure 8.*

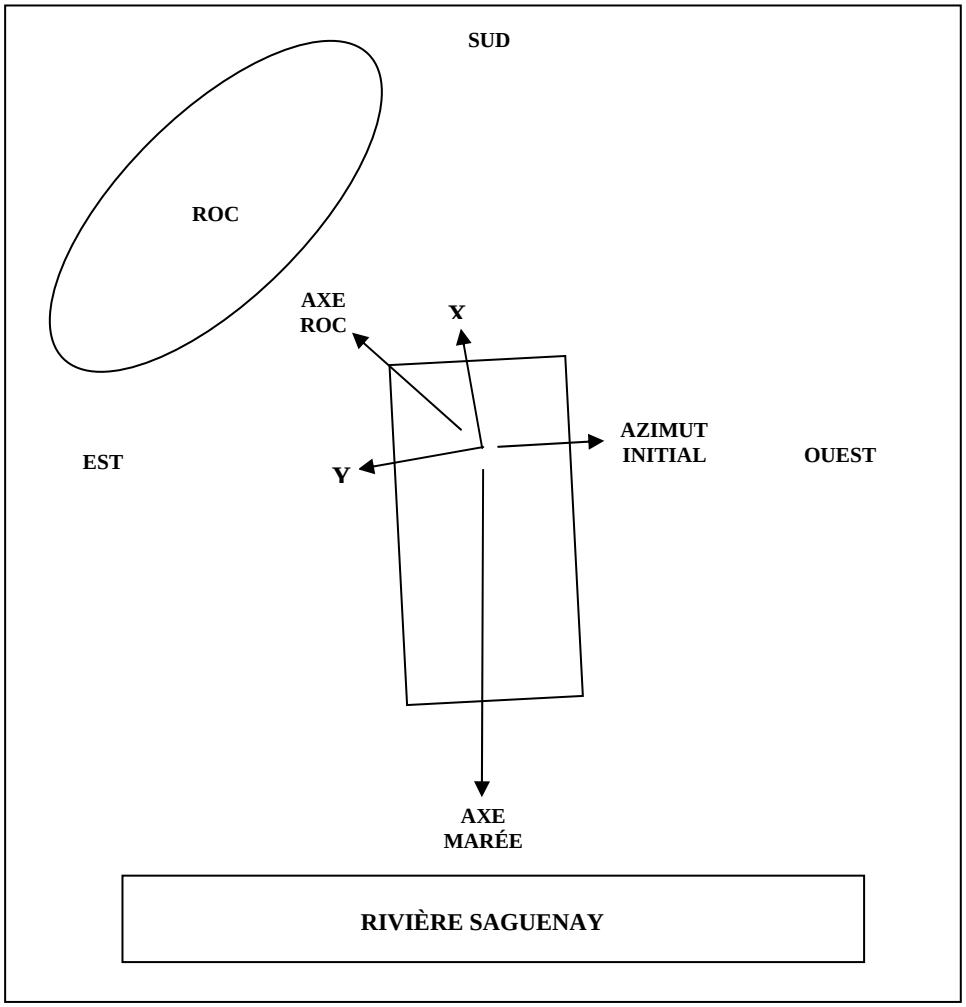


Figure 11 : Répartition des masses d'eau et de roc susceptibles d'influencer le pendule. Les axes XY sont ceux de l'imagerie (N.B. : il y a rotation de 180 ° par rapport à la figure 1). *Spatial distribution of the water and rock masses, which might influence the pendulum. The XY-axes pertain to the imagery. (N.B. : there is a flip of 180 ° with respect to figure 1).*

4.3. Effets gravitationnels

Les effets gravitationnels calculables sont des forces attractives agissant sur la position moyenne de la masse (point de repos) et des moments tournants, ou couples, agissant sur la précession (effets de marée). À part la Lune, les masses voisines du pendule sont le granit du fjord, l'apport d'eau dans le Saguenay et peut-être, dans une moindre mesure, les murs de pierre de la cathédrale.

4.3.1. Attraction horizontale

L'effet maximal de la Lune sur le point de repos du pendule est une oscillation dans le sens est-ouest (approximativement 0Y) avec une excursion pic à pic de 0,1 mm et une période de 24,8 h. C'est environ un ordre de grandeur plus petit que l'influence des masses environnantes.

Sur la figure 11, la disposition de certaines masses importantes au voisinage de la cathédrale est schématisée. Au premier plan figure le massif de granit (roc), dont le gradient topographique est orienté à 135 ° de l'azimut de lancement du pendule. De plus, si l'incrément d'eau du Saguenay peut jouer un rôle, ce serait selon la direction de l'axe marée, à l'azimut - 90 ° par rapport à l'azimut initial. Au premier ordre, l'effet de ces masses est de modifier la verticale du lieu, de façon permanente pour la masse rocheuse et de façon périodique pour la marée. Le calcul prévoit donc une oscillation du point de repos du pendule, selon l'axe X, de 1,4 mm pic à pic avec une période de 12,4 h. Sur la figure 12, on montre l'évolution du point de repos au cours de l'expérience. L'ajustement d'un cosinus de période 12,4 h donne, dans les faits, une fluctuation selon l'axe X de 0,8 mm pic à pic avec l'extrême négatif à 4 h, soit bel et bien au moment de la marée haute.

Par contre, sur la figure 12, on constate une oscillation semblable selon l'axe Y, déphasée de 90 °. Le point de repos a effectivement parcouru un cercle de rayon 0,4 mm en 12 h. On a pu estimer que la dilatation thermique différentielle des murs de la cathédrale pendant l'insolation de l'avant-midi devrait faire reculer le point de suspension de 1 mm vers les Y négatifs, pour une différence de température de la pierre de 5 °C. Il faudrait une expérience de plus longue durée pour confirmer ce fait, mais il est tout de même intéressant de constater que la précision du traitement d'images permet de mesurer des phénomènes aussi subtils.

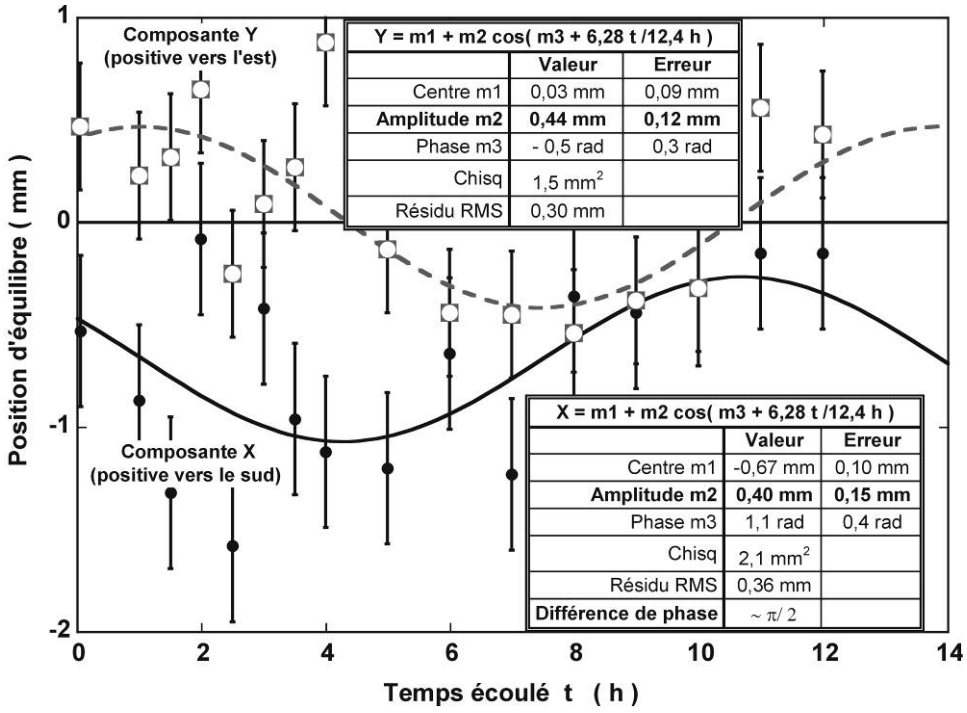


Figure 12 : Déplacement quasi-circulaire de la position de repos du pendule au cours de l'expérience, tel qu'illustré par le déphasage entre les composantes X et Y. *Quasicircular displacement of the pendulum equilibrium position throughout the experiment, as illustrated through the phase difference between the X- and Y-components.*

4.3.2. Effet de marée

L'effet de marée est un effet gravitationnel du second ordre qui consiste en l'attraction horizontale différentielle exercée sur le pendule lors d'une oscillation pour ses deux positions extrêmes, respectivement rapprochée et éloignée par rapport à la masse agissante.

Considérant l'effet du Saguenay comme agissant dans la direction de « l'axe marée » (figure 11), l'attraction horizontale sera identique pour toute l'oscillation si le pendule occupe l'azimut initial, car la sphère demeure à distance constante du Saguenay. Cependant, s'il oscille dans la direction allant de - 45 ° à + 135 °, il est plus attiré par l'eau qu'au point de repos lorsqu'il passe du côté du Saguenay et moins attiré par l'eau qu'au point de repos (i.e. comparativement repoussé) lorsqu'il passe du côté opposé. Ces forces différentielles (couple attraction-répulsion) créent un couple accélérateur de la précession dans le sens horaire. Par contre, si le pendule occupe les azimuts de + 45 ° et de - 135 °, on a l'effet inverse et on obtient un couple freineur de la précession horaire. Si l'oscillation est aux azimuts ± 90 °, c'est-à-dire selon l'axe marée, l'effet de la marée n'agit pas sur la précession, mais a plutôt tendance à étirer l'amplitude (ou réduire l'amortissement). Ainsi, l'effet de l'apport d'eau dans le Saguenay par la marée devrait être maximal à marée haute et devrait disparaître à marée basse. Notons que l'idée d'associer les fluctuations de précession à la marée dans le Saguenay plutôt que directement à la Lune vient de ce que des estimations théoriques donnent des forces différentielles un million de fois plus faibles pour la Lune (Allais, 1999) que pour le Saguenay, en plus du fait que la Lune agit rarement seulement à l'horizontale.

Quant à la masse rocheuse vers l'azimut 135 °, des considérations semblables laissent supposer que son effet sur la précession sera nul lorsque le pendule oscille selon l'axe dirigé vers la masse rocheuse ou perpendiculairement à cet axe. Il sera accélérateur de la précession horaire pour des oscillations voisines de la direction 0 - 180 ° et freineur pour des oscillations voisines de la direction de l'axe de la marée. Compte tenu de la plus grande proximité de cette masse rocheuse et de sa plus grande masse volumique en comparaison avec l'eau du Saguenay, son effet devrait être prépondérant et non variable dans le temps. Il dépend donc uniquement de l'azimut du pendule et doit montrer deux crêtes accélératrices pendant un cycle de précession complet de 32 h. On l'associe donc à la période de 16 h détectée dans la série temporelle de la figure 8.

Sur la figure 10, on peut vérifier assez bien que, 4 h après le lancement, le pendule étant à l'azimut - 45 ° (figure 7), l'effet de la masse rocheuse doit être nul et que la forte accélération de précession horaire (négative) correspond à l'heure de la marée haute. Par ailleurs, l'accélération observée au moment du lancement, alors que l'effet du Saguenay est nul pour cet azimut, est tout à fait compatible avec le couple accélérateur généré par la masse rocheuse. On n'a pas pour l'instant d'explication pour un cycle trouble-fête bien marqué de période 4,27 h dont l'amplitude est environ 8 fois plus faible que celle de l'influence rocheuse. Cela suppose peut-être la présence d'harmoniques plus élevée que la 2^{e} dans le cycle de 32 h. Entre autres, le moment quadripolaire créé par les quatre murs de pierres de l'édifice n'a pas été étudié. Il pourrait être de nature à générer un cycle de 4 h. Bien qu'il s'agisse de masses beaucoup plus faibles que celles du granit et de la marée, la loi en $1/r^3$ des effets de marée et leur plus grande proximité du pendule pourrait faire en sorte que leur influence soit du même ordre de grandeur que celle de la masse rocheuse et du Saguenay.

4.4. Autres effets du second ordre

D'autres effets mineurs sont inhérents à la dynamique même du pendule de Foucault, notamment l'ellipticité de l'orbite causée par la non linéarité de ce système physique (effet Airy) et les perturbations occasionnées par les dimensions physiques de la masse oscillante, contrairement aux modèles mathématiques qui sont basés sur l'hypothèse d'une masse ponctuelle. La précision de mesure requise pour mettre en évidence les influences gravitationnelles étudiées ci-dessus rend ces considérations non triviales.

4.4.1. Ellipticité

Des mesures soignées du demi-axe *b* de la trajectoire, théoriquement elliptique, sont rapportées sur la figure 13. La valeur négative de *b* signifie une ellipse parcourue dans le sens horaire. La plus grande valeur absolue de 1,6 pixel après 3 h correspond à 3 mm, pour une amplitude *a* de 110 mm à ce moment. Compte tenu de l'amortissement de l'amplitude, le rapport *b/a*, communément utilisé pour caractériser l'ellipticité, atteint un extremum de - 3,7 % à 8 h du lancement, puis rejoint graduellement le zéro à la fin de l'expérience, alors que l'amplitude vaut encore environ 40 mm.

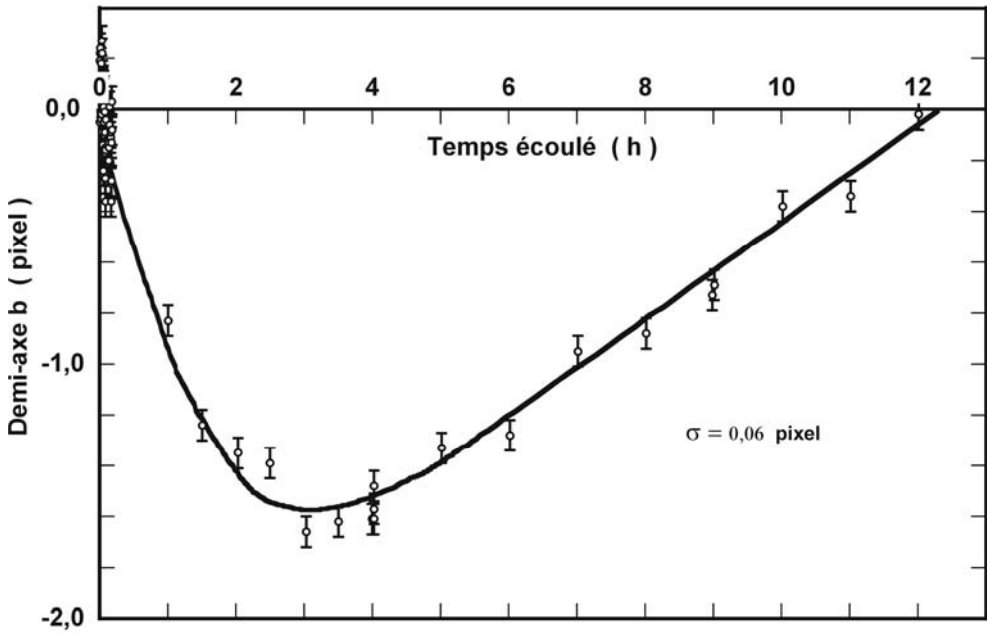


Figure 13 : Évolution du demi-axe mineur de l'orbite elliptique. *Evolution of the minor semi-axis of the elliptical orbit.*

Tel que décrit par l'équation 5, l'ellipticité est responsable d'une vitesse de précession parasite proportionnelle au produit *ab*, dans le sens du parcours de la masse sur la trajectoire. Cette vitesse de précession parasite culmine à –0,034 °/h, comme on peut le constater sur la figure 14. Il est bien évident que les fluctuations de vitesse de précession présentées sur la figure 10 sont de loin plus significatives que cette perturbation. Ce fait n'est pas étranger à la qualité du montage réalisé, liée à la longueur du fil et à l'isotropie de la suspension (Schulz-Dubois, 1970; Kamerlingh Onnes, 1879)

L'intégrale sur le temps de la vitesse de précession parasite est tracée sur la figure 8, sous la forme d'une courbe en trait fin en dessous de l'axe du temps. À la rigueur, cette courbe pourrait servir de nouvelle référence pour la mesure des déviations azimutales non expliquées, ce qui n'entraînerait d'ailleurs pas de changement qualitatif dans les interprétations mentionnées ci-dessus. La dérivée temporelle de la déviation azimutale, qui constitue la figure 10, est effectivement calculée par rapport à cette nouvelle référence.

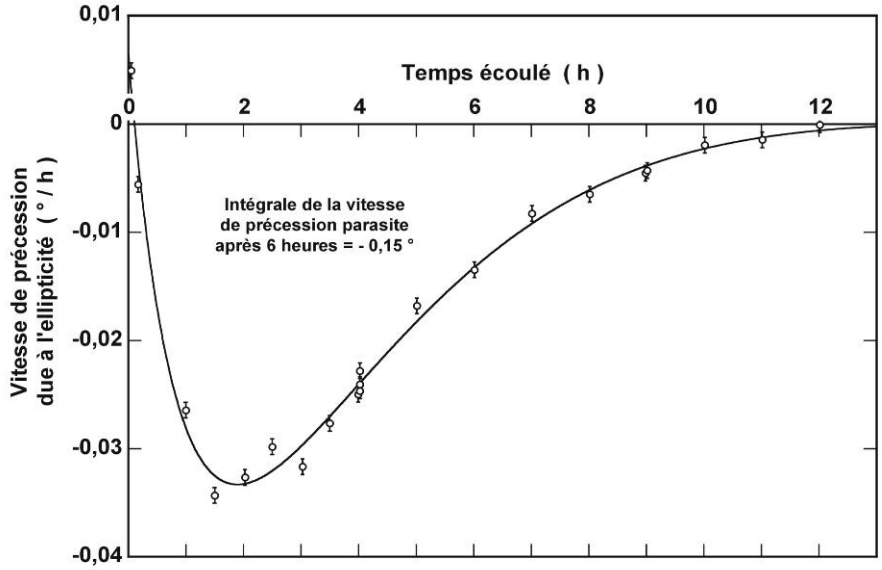
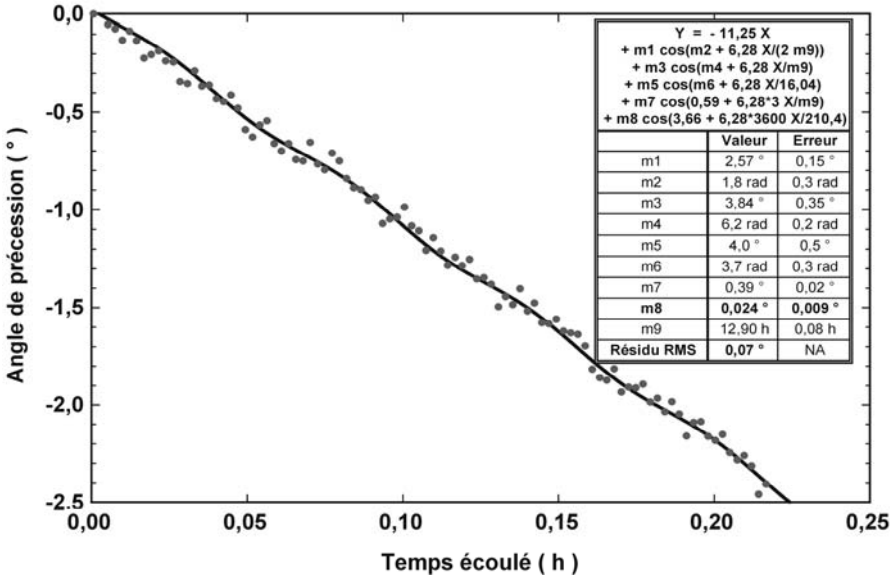


Figure 14 : Évolution du rapport *b/a* évalué en unités de la vitesse de précession parasite équivalente (effet Airy). *Evolution of the ratio b/a shown in units of the equivalent parasitic precession speed (Airy effect).*

4.4.2. Couplage spin-orbite

Les péripéties du lancement du pendule ont inclus quelques faux départs. Celui qui donna à la fois le bon fonctionnement de tous les appareils et une belle trajectoire rectiligne s'avéra, par inadvertance, avoir été lancé à partir d'une sphère pré-stabilisée à son support de départ avec un tour de torsion dans le fil de suspension. Il en résulta donc un mouvement de spin superposé aux oscillations normales. Une partie du traitement d'images servit à étudier ce spin et à vérifier s'il perturbait le comportement attendu du pendule. À cette fin, les azimuts de précession et de spin ont été mesurés systématiquement. En particulier, les azimuts des 93 premières périodes totalisant 13 min ont été mesurés sans interruption. La période de spin a ainsi pu être établie à 212 ± 2 s. Lors des ajustements de fonctions trigonométriques pour la durée totale de l'expérience (134 points de mesure), le logiciel d'ajustement a effectivement livré une oscillation dont l'amplitude vaut (0,019 ± 0,008) ° et la période (210,8 ± 0,3) s. Elle constitue la petite fluctuation rapide présentée sur la figure 8. Une série temporelle écourtée à 3 h a servi pour le cas plus détaillé présenté sur la figure 15. Malgré un plus petit échantillonnage, la statistique donne plus de poids aux 93 premières périodes. Cette analyse donne l'amplitude de (0,024 ± 0,009) ° et la période de (210,4 ± 0,5) s. Comme on peut le constater, le couplage spin-orbite, phénomène devenu banal aux énormes vitesses de la physique atomique, s'avère extrêmement subtil aux dimensions macroscopiques. Il a en effet fallu des mesures à l'échelle du sous pixel et une analyse statistique très poussée pour le mettre en évidence.



	Valeur	Erreur
m1	2,57 °	0,15 °
m2	1,8 rad	0,3 rad
m3	3,84 °	0,35 °
m4	6,2 rad	0,2 rad
m5	4,0 °	0,5 °
m6	3,7 rad	0,3 rad
m7	0,39 °	0,02 °
m8	**0,024 °**	**0,009 °**
m9	12,90 h	0,08 h
Résidu RMS	**0,07 °**	NA

Figure 15 : Évolution de l'angle de précession durant les 13 premières minutes. L'ajustement de courbe est basé sur les 93 premières périodes illustrées ici, plus 20 points additionnels différemment espacés couvrant les 3 premières heures. *Evolution of the precession angle during the first 13 min. The curve fitting is based on the first 93 periods shown here, plus 20 additional unevenly spaced periods over the first 3 h.*

5. PROSPECTIVE

L'application, au pendule de Foucault, de méthodes de mesure empruntées à la télédétection aérospatiale ouvre la voie à des mesures d'influences gravitationnelles minimes et probablement à de nouvelles remises en question des théories de la gravitation.

5.1. L'instrument et sa théorie

La haute performance atteinte avec le pendule de Chicoutimi laisse présager qu'il pourrait s'avérer un outil efficace pour la mesure d'autres effets gravitationnels subtils. Dans cette ligne de pensée, Braginsky *et al.* (1984) proposèrent l'utilisation d'un pendule de Foucault au pôle Sud pour détecter le champ gravitométrique prédit par la relativité générale. Nonobstant l'analyse de Pippard (1988), qui prônait l'inadéquation entre la technologie d'alors du pendule de Foucault et la réalisation de cette tâche au pôle Sud, Baker *et al.* (2001) ont brisé la glace en y faisant fonctionner sans prétention un pendule « de modeste précision ». Les résultats ne furent effectivement pas à la hauteur des attentes.

Le présent article ne fait pas mention du volet amortissement, qu'il a été possible d'étudier en détail avec le pendule de Chicoutimi. L'amplitude d'oscillation a évolué entre 140 et 40 pixels. Diverses théories sur l'amortissement du pendule de Foucault ont été comparées. La précision des mesures par traitement d'images a permis de distinguer, au niveau du calcul de perturbations du second ordre, entre quelques théories admises et une nouvelle théorie basée sur une formule plus simple, qui décrit rigoureusement les données expérimentales d'amplitude sur les 12 h de l'expérience, avec un résidu RMS de 0,1 pixel.

5.2. Effet d'Allais

En plus concret, Maurice Allais (1997, 1999) expérimentait de façon routinière en 1954 avec un pendule paraconique, une version particulière du pendule de Foucault, lorsqu'une éclipse partielle de Soleil passa près de Paris. Sa procédure consistait à relancer systématiquement le pendule à toutes les 20 min et à mesurer la précession accumulée pendant 14 min, tout en relançant le pendule à partir du nouvel azimut atteint la fois précédente, et ce jour et nuit sans interruption pendant un mois. Ce stratagème lui permettait, avec un pendule court (83 cm) générant des ellipses après quelques minutes, de simuler le comportement d'un pendule de Foucault non amorti pendant une expérience d'un mois, au lieu de quelques heures. Pour la latitude de Paris, l'azimut tournait d'environ 2 à 3 ° en 14 min. Or, pendant l'éclipse, la précession sur 14 min se mit à augmenter pour culminer à une dizaine de degrés au plus fort du phénomène, puis revenir à la normale une fois l'occultation terminée. Plusieurs tentatives par d'autres chercheurs pour reproduire, dans les décennies suivantes, ce qu'il a été convenu d'appeler l'effet d'Allais (Allais, 1999), eurent plus ou moins de succès. Des expériences parmi les plus récentes se sont déroulées en Roumanie (Mihaila *et al*., 2003, 2004). Bien que le phénomène n'ait pas encore trouvé d'explication à ce jour, une interprétation non conforme à la relativité générale stipule que le champ gravitationnel lunaire serait diminué lorsque la Lune occulte le Soleil (Duval, 2005). Expérimentant avec un microgravimètre, cet auteur rapporte une augmentation de (2,4 ± 0,5) µgal pour l'accélération gravitationnelle terrestre pendant l'occultation, lors de l'éclipse annulaire du 10 mai 1994 sur Montréal.

Par ailleurs, le mécanisme par lequel l'effet d'Allais agit sur un pendule de Foucault est encore nébuleux. Compte tenu de sa haute performance, le pendule de Chicoutimi devrait bien se qualifier comme instrument d'investigation, à condition d'être transportable. À ce jour, l'effet direct de la marée luni-solaire sur le pendule est réputé échapper à la détection par 8 ordres de grandeur (Allais, 1997, 1999). Nonobstant ces considérations, il importe de mentionner que les phénomènes rapportés dans le présent article, bien que corrélés avec les influences hydrographiques et topographiques mentionnées, manifestent des accélérations en précession qui s'avèrent encore entre 1 ordre et 2 ordres de grandeur plus fortes que les accélérations calculables par effet de marée, selon les lois connues de la gravitation. Par surcroît, Allais (1999) observe sans éclipse, à Paris, grâce à ses expérimentations qui durent 1 mois, des cycles lunaires de précession d'amplitude et de niveau de signification semblables à ceux de Chicoutimi, sans l'intervention de masse rocheuse ou de marée haute à proximité. Si son « effet de marée » satisfaisait aux lois de la gravitation, il faudrait que la masse de la Lune se situe à 3 000 km du pendule au lieu de 384 000 km ! Allais déclare lui-même, dans son rapport à la NASA, que le véritable "effet d'Allais" devrait être ce phénomène même, plutôt que son incrément lors d'une éclipse ! Un autre passage de ce rapport, dont les présents auteurs n'ont pris connaissance qu'en 2007, vaut la peine d'être cité ici (le soulignement est des auteurs) : « *No previous experimenter has ever investigated, or has ever attempted to investigate, the periodic structure of the movements of his pendulum, in particular its luni-solar components. The reason is twofold. Firstly, the theoreticians have always considered that the influences of the Sun and the Moon on the movement of a pendulum were too feeble to be detected experimentally. Secondly, all previous experiments have been limited to very limited durations of a few hours.* »

On peut donc être en droit de conclure que le pendule de Chicoutimi de 2001 est une première mondiale en ce qu'il constituerait le premier pendule de courte durée capable de détecter la marée luni-solaire, et ce grâce à l'utilisation d'un algorithme de traitement d'images développé pour la télédétection aérospatiale.

À l'été 2006, une nouvelle version du pendule de Chicoutimi a été mise en chantier (tableau 1) dans le but de rencontrer, sans trop de pression, l'éclipse totale qui débutera dans le Nord canadien le 1er août 2008. C'est plutôt tardivement qu'un des auteurs réalisa que l'éclipse annulaire du 22 septembre 2006, débutant en Guyane française avec le lever du Soleil, pourrait s'avérer un sujet de recherche intéressant. Comme les démarches pour opérer dans une tour d'assemblage de fusées (~ 80 m de hauteur) n'aboutissaient pas, le design d'une tour rigide démontable s'imposa. Le projet de la construction et de l'expédition fut donc réalisé en catastrophe en un mois avec, comme principale conséquence fâcheuse, une heure de retard pour la mise à feu des deux pendules simultanés lancés à 45 ° de différence d'azimut initial. La période d'expérimentation planifiée allait de O – 3 h à O + 3 h (O pour : occultation). Compte tenu des obligations professionnelles des auteurs, les données attendent encore sur disque dur que débute la phase d'analyse. L'expérience sera probablement classée "de modeste précision", mais elle aura surtout servi de banc d'essai pour la rigidité de la tour (figure 16) et la logistique des poursuites d'éclipses. Et qui sait ? Elle recèle peut-être une autre découverte…

Tableau 1 : Caractéristiques du pendule de la cathédrale de Chicoutimi dans sa version originale et dans une version plus récente. *Features of the pendulum of the Chicoutimi Cathedral in its original version and in a more recent version.*

Paramètre	Version de 2001	Version de 2006
Latitude nord	48,42767° (48° 25' 39,6")	48,42767° ± 0,00005°
Jour sidéral	23,934469 h	23,934469 h
Période de précession	31,9929 h	31,9929 h
Attache supérieure	Structure d'arche	Poutre faîtière
Masse	9,8 kg	56 kg
Carénage aérodynamique	Non	Oui
Longueur au centre de masse	(17,416 ± 0,005) m	20,3 m
Diamètre du fil	0,39 mm	1,0 mm
Amplitude initiale	0,84 °	0,8 °
Période d'oscillation	8,36 s	9,03 s
Durée de l'expérience	12 h	36 h



Figure 16 : Structure d'aluminium haute de 11 m abritant deux pendules de Foucault lors de l'éclipse annulaire du 22 septembre 2006, à Cayenne, Guyane française. *A 11 m high aluminum structure housing two Foucault pendulums during the annular eclipse of September 22nd 2006 in Cayenne, French Guyana.*

6. CONCLUSION

En définitive, la décision de reprendre une vieille expérience de physique a ouvert la voie à une série de trouvailles passionnantes. Les apparentes erreurs expérimentales du passé se sont avérées de réels effets gravitationnels dus probablement à la topographie locale. L'utilisation de caméras et de logiciels de traitement d'images développés pour la télédétection aérospatiale a permis le positionnement instantané du pendule de façon significative à ± 0,1 pixel. Il en est découlé des mesures précises des fluctuations de vitesse de précession corrélées, d'une part, avec la marée dans le Saguenay, d'autre part, avec la répartition des masses rocheuses autour de la cathédrale et, enfin, avec le couplage spin-orbite lorsqu'on laisse la masse osciller lentement en rotation sur elle-même. Lors de l'éclipse annulaire de soleil du 22 septembre 2006, dans une tentative de détecter l'effet d'Allais, ledit pendule, accompagné d'une structure autoportante légère et démontable, a été transporté par cargo aérien puis installé sur le campus Saint-Denis de l'Université des Antilles et de la Guyane, à Cayenne. Ce type d'expériences est appelé à être multiplié pour aider à la compréhension autant de la théorie du pendule de Foucault que du fonctionnement de l'Univers.

Références

Allais, M. (1997) L'anisotropie de l'Espace – La nécessaire révision de certains postulats des théories contemporaines. Les données de l'expérience. Éditions Clément Juglar, Paris, 757 p.

Allais, M. (1999) The "Allais Effect" and my experiments with the paraconical pendulum 1954-1960. A memoir prepared for NASA, 168 p., voir www.allais.info/allaisdox.htm (2007).

Baker, G.L. and Blackburn, J.A. (2006) The Pendulum : a Case Study in Physics. 2e impression, Oxford University Press, New York, 288 p.

Baker, R.A., Bird, J. and Town, M. (2001) South pole Foucault pendulum. http:/www.phys-astro.sonoma.edu/people/baker/South pole Foucault pendulum.html.

Braginsky, V.B., Polnarev, A.G. and Thorne, K.S. (1984) Foucault pendulum at the south pole : Proposal for an experiment to detect the earth's general relativistic gravitomagnetic field. Physical Review Letters, vol. 53, p. 863-866.

Duval, M. (2005) An experimental gravimetric result for the revival of corpuscular theory. Physics Essays, vol. 18, p. 53-62.

Hecht, K.T. (1983) The Crane Foucault pendulum : An exercise in action-angle variable perturbation theory. American Journal of Physics, vol. 51, no 2, p. 110-114.

Kamerlingh Onnes, H. (1879) Nieuwe bewijzen voor de aswenteling der aarde. Thèse de doctorat, Rijksuniversiteit, Groningen (Pays-Bas), 290 p.

Lemieux, G. et Labonté, M. (1984) La thermographie nocturne appliquée à l'étude du gel et au réaménagement des bleuetières de Lac-Saint-Jean, Québec. P. 545-552, *in* G. Guyot (réd.) IIe Colloque international sur les signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, 12-13 sept. 1983, INRA Publications (Les Colloques de l'INRA, no 23), Paris, 939 p.

Lemieux, G.-H., Perron, S., Gauthier, M. et Verreault, R. (1994) Étude microclimatique de la régénération en forêt boréale par télédétection thermographique et anémographique. P. 359-383, chap. 20, *in* F. Bonn (réd.) Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Presses de l'Université du Québec et ACCT, Québec et Paris, 480 p.

Mihaila, I., Marcov, N., Pambuccian, V. et Agop, M. (2003) Observation de l'effet d'Allais lors de l'éclipse de Soleil du 11 août 1999. Proceedings of the Romanian Academy, Series A, vol. 4, p. 3-7.

Mihaila, I., Marcov, N., Pambuccian, V. and Racoveanu, O. (2004) A new confirmation of the Allais effect during the solar eclipse of 31 may 2003. Proceedings of the Romanian Academy, Series A, vol. 5, p. 243-249.

Pippard, A.B. (1988) The parametricially maintained Foucault pendulum and its perturbations. Proceedings of the Royal Society (London), vol. A420, p. 81-91.

Schulz-Dubois, E.O. (1970) Foucault Pendulum Experiment by Kamerlingh-Onnes and Degenerate Perturbation Theory. American Journal of Physics, vol. 38, p. 173-188.

Verreault, R., Vachon, G., Lemieux, G.H., Labonté, M. et Perron, S. (1985) La télédétection anémo-thermographique par capteur aéroporté : une nouvelle méthode de cartographie micrométéorologique. P. 303-306, *in* T.D. Guyenne (réd.) 3e Colloque international sur les signatures spectrales d'objets en télédétection. Les Arcs, France, 16-20 décembre 1985, ESA, Noordwijck (Pays-Bas), (ESA SP-247), 580 p.

Verreault, R., Gagnon, F., McLaughlin, S. and Tremblay, L. (1995) Spatial Resolution Improvement of CCD Video Imagery. P. 115-128, *in* P. Mausel (réd.) Proceedings of the 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment. Terre Haute (Indiana), 1-3 mai 1995, ASPRS, Annapolis Junction (Maryland), 675 p.