



SUR LE MOUVEMENT DU PENDULE DE FOUCAULT ET DU PENDULE D'ALLAIS LORS DE L'ÉCLIPSE DE SOLEIL DU 3 OCTOBRE 2005

*En l'honneur du Professeur Maurice Allais,
Lauréat du Prix Nobel*

Ieronim MIHĂILĂ, Nicolae MARCOV, Varujan PAMBUCCIAN,

Université de Bucarest, Faculté de Mathématique et Informatique, Str. Academiei 14, 010014 Bucarest, Roumanie
Auteur correspondant: Ieronim MIHĂILĂ, e-mail: mihaila@math.math.unibuc.ro

During the solar eclipse of 3 October 2005, the Allais effect was studied at University of Bucharest, using a Foucault pendulum and an Allais pendulum. The motion of the oscillation plane of the first pendulum was slower during the eclipse, the deviation of the observed curve of the azimuth from the calculated curve reaching approximately 1.1° in the neighbourhood of the maximum of the eclipse. On the other hand, during the eclipse the angular velocity of the oscillation plane of the Allais pendulum was variable. After the beginning of the eclipse the velocity decreased, reaching the minimum value of $2^\circ / 15 \text{ min}$ in the neighbourhood of the maximum, and afterwards increased and became again the velocity of $2.6^\circ / 15 \text{ min}$ corresponding to the Foucault effect. Thus the Allais effect was confirmed.

Key words: Foucault effect, Allais effect, eclipse, gravitation.

1. INTRODUCTION

Le Professeur Maurice Allais, en observant le mouvement d'un pendule court sous l'action de la pesanteur et de la rotation terrestre, a mis en évidence une décroissance de l'effet de Foucault lors de l'éclipse de Soleil du 30 juin 1954 [1]. Il a nommé cet effet "l'effet d'éclipse". Ultérieurement l'effet a reçu la dénomination de "l'effet d'Allais". L'effet a été de nouveau observé lors de l'éclipse de Soleil du 2 octobre 1959, les résultats obtenus étant donnés dans son ouvrage *L'Anisotropie de l'Espace* [2]. Dans cet ouvrage sont analysés les résultats obtenus par des observations continues effectuées de 1954 à 1960 avec le pendule court. Ces observations ont mis en évidence une variation périodique de l'azimut du plan d'oscillation, laquelle se superpose sur l'effet de Foucault. On peut nommer cet effet *l'effet d'Allais au sens large*, à l'encontre de l'effet d'éclipse, qui peut être dénommé *l'effet d'Allais au sens restreint*.

L'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 a offert une nouvelle possibilité d'observer l'effet d'éclipse. Dans ce but NASA a proposé un programme d'observation et le Professeur Maurice Allais a rédigé un Mémoire consacré tant à la réalisation des observations du mouvement du pendule de Foucault lors de l'éclipse qu'à la répétition des expériences effectuées avec le pendule court [3]. Dans ce mémoire, le Professeur Maurice Allais, partant des équations du mouvement perturbé du pendule, déduites dans son ouvrage mentionné, a établi un critère concernant la dépendance de la vitesse angulaire du plan d'oscillation (le critère l/α^2 , l étant la longueur et α l'amplitude en radians). D'après ce critère l'effet d'Allais est mieux mis en évidence par le pendule court. Un tel pendule a été le pendule utilisé dans ses expériences. Il a été un pendule d'une longueur d'environ un mètre, suspendu par une bille (pendule paraconique ou pendule d'Allais). Lors de l'éclipse nous avons utilisé le pendule de Foucault [6], parce que nous n'avons pas disposé d'un pendule paraconique. En fait, aucun observateur de l'effet lors de l'éclipse du 11 août 1999 n'a disposé d'un tel pendule.

Au Colloque sur *Les anomalies du mouvement du pendule*, Paris, le 28 septembre 2001, a été avancée la proposition de réaliser deux pendules d'Allais en Roumanie pour étudier l'effet d'Allais au sens large par des observations continues effectuées simultanément au Planétarium de Suceava et à l'Université de Bucarest. Par de tel procédé on peut confirmer les résultats obtenus par les observations effectuées simultanément à Saint-Germain et à Bougival [2,4,5]. Ces pendules ont été réalisés d'après les plans du Professeur Maurice Allais et ont été installés en 2002. Le pendule d'Allais de l'Université de Bucarest a été amélioré et mis au point (de 2002 à 2004) par le premier auteur.

Dans cette Note nous présentons les résultats obtenus lors de l'éclipse de 3 octobre 2005, à l'Université de Bucarest, avec le pendule de Foucault et le pendule d'Allais.

2. LES PENDULES ET LES MÉTHODES D'OBSERVATION

Le pendule de Foucault est un pendule utilisé antérieurement, tant lors de l'éclipse du 11 août 1999 que lors de l'éclipse du 31 mai 2003. Il est constitué d'une sphère de fonte de 12,5 cm de diamètre et d'un fil d'acier de 0,6 mm de diamètre. La suspension du pendule est une suspension à la Cardan. Le poids de la sphère est d'environ 7,3 kg et la longueur du pendule est d'environ 14,21 m. Le pendule a été installé, ainsi que dans le cas des éclipses mentionnées, dans la même cage d'escalier de la Faculté de Mathématique et Informatique de l'Université de Bucarest.

Le pendule d'Allais utilisé est un pendule dissymétrique constitué par un disque de bronze vertical de 7,5 kg et de 17 cm de diamètre, fixé sur une tige tabulaire suspendue à un étrier aussi de

bronze, reposant sur une bille d'acier de 6,3 mm de diamètre. Le poids total du pendule est d'environ 12 kg. La distance du centre de la bille au centre du disque est de 134,5 cm, la distance jusqu'à la pointe d'aiguille du pendule étant de 148,5 cm. Le support du pendule est un support circulaire évidé tournant de duralumin de 21 cm de diamètre, réalisé d'après le plan proposé en 2001 par le Professeur Maurice Allais. Le pendule est installé dans le voisinage de la cage d'escalier, dans un laboratoire adjacent.

Pour mesurer l'azimut du plan d'oscillation a été utilisée pour chaque pendule une alidade centrée sur l'axe du pendule au repos et possédant un système d'axes rectangulaires et un carroyage. L'alidade a une fenêtre qui permet de mesurer l'azimut sur une couronne circulaire divisée en degrés. Par ce système l'azimut est déterminé avec une erreur de l'ordre du dixième de degré. D'autre part, le carroyage permet de mesurer les deux demi-axes de l'ellipse décrite par l'intersection de l'axe du pendule avec la face supérieure de l'alidade. Chaque pendule a été lâché en brûlant un fil.

La période d'oscillation a été déterminée seulement pour le pendule de Foucault, en utilisant la méthode appliquée dans le cas de l'éclipse du 31 mai 2003. Pendant les déterminations la cage d'escalier a été fermée et son gradient de température a été périodiquement contrôlé.

Le pendule de Foucault a été lâché toutes les 60 minutes avec une amplitude linéaire initiale d'environ 35 cm, par conséquent avec une amplitude angulaire d'environ $1,4^\circ$. L'azimut a été compté dans le sens rétrograde à partir du Sud. Les trois séries d'observations d'azimut ont été enchaînées.

Le pendule d'Allais a été lâché toutes les 20 minutes, avec une amplitude linéaire initiale d'environ 14 cm, c'est-à-dire avec une amplitude angulaire d'environ 6° . Au bout de 15 minutes le pendule était arrêté. Cinq minutes après il était lâché à nouveau. Le support circulaire a été maintenu fixe, l'appendice du support étant orienté vers la direction d'azimut 70° , direction perpendiculaire sur le plan initial d'oscillation du pendule de Foucault. Pour simplifier, cette direction a été considérée comme l'origine d'azimut, compté aussi dans le sens rétrograde.

Quoique dans les expériences du Professeur Maurice Allais, effectuées avec le pendule paraconique, les séries d'observations d'azimut étaient enchaînées, le pendule étant lâché à nouveau dans le plan du dernier azimut observé, nous avons préféré de lâcher le pendule d'Allais dans le même azimut (70°). D'autre part, les observations ont été effectuées en utilisant la même bille.

3. RÉSULTATS

À Bucarest l'éclipse a commencé à 11^h 15^m temps local (c'est-à-dire 8^h 15^m TU) et s'est terminée à 13^h 51^m, le maximum étant à 12^h 32^m. À l'instant du maximum de l'éclipse la hauteur du Soleil a été de 41° et son recouvrement a été de 37%. D'autre part, le Soleil est passé au méridien du lieu à 13^h 05^m.

La durée d'observation a été de 4 h pour le pendule de Foucault, de 11^h à 15^h, et de 5 h 15 min pour le pendule d'Allais, de 10^h 45^m à 16^h. De plus, pour l'étude de l'évolution de la période d'oscillation du pendule de Foucault, nous avons déterminé la période tant lundi lors de l'éclipse que dimanche et mardi en dehors de l'éclipse. Dans cette Note nous présentons les résultats concernant l'azimut.

Théoriquement l'azimut du plan d'oscillation du pendule de Foucault est une fonction linéaire de temps

$$A(t) = A_0 + \omega_\varphi (t - t_0), \quad (1)$$

A_0 étant l'azimut au moment initial t_0 et ω_φ la vitesse angulaire, $\omega_\varphi = \omega \sin \varphi$, où ω est la vitesse angulaire de rotation de la Terre et φ est la latitude astronomique du lieu. Pour Bucarest $\varphi = 44^\circ 25'$ et on obtient $\omega_\varphi = 10,527^\circ/\text{h}$.

En fait, sur l'effet de Foucault, donné par la vitesse constante ω_φ , se superpose l'effet d'Airy, donné par la vitesse angulaire

$$\frac{dA}{dt} = \frac{3}{8} p \alpha \beta, \quad (2)$$

où $p = 2\pi/T$, T étant la période d'oscillation, et α et β sont le grand et le petit demi-axe en radians de la trajectoire elliptique décrite par l'axe du pendule sur le plan horizontal.

La formation d'ellipses est due à diverses causes, parmi lesquelles on peut mentionner l'influence de l'anisotropie du support et probablement l'influence gravitationnelle du Soleil et de la Lune.

Les résultats obtenus à l'aide du pendule de Foucault sont donnés dans le tableau 1. Le tableau contient l'azimut observé (A_o), l'azimut calculé par la formule (1) (A_c), la différence $\Delta A = A_o - A_c$. Pour marquer l'effet d'Airy le tableau contient aussi les deux demi-axes de l'ellipse décrite par l'axe du pendule sur le plan de l'alidade. Le sens du mouvement sur l'ellipse est donné par d (sens direct) et r (sens rétrograde). D'autre part, les courbes de l'azimut sont représentées dans la figure 1.

On constate que pendant l'éclipse le mouvement du plan d'oscillation a été plus lent, la déviation ΔA a atteint sa valeur maximum, d'environ 1,1°, dans le voisinage du maximum de l'éclipse. Ce résultat concorde avec nos résultats obtenus lors des éclipses du 11 août 1999 et du 31 mai 2003 [6,7] et avec les résultats obtenus par le Professeur Maurice Allais lors des éclipses de Soleil du 30 juin 1954 et du 2 octobre 1959. Nous mentionnons aussi que cette déviation concorde avec l'amplitude de l'effet d'Allais au sens large obtenue par les deux expériences réalisées simultanément à Saint-Germain et à Bougival dans des conditions identiques.

Les données pour le pendule d'Allais sont contenues dans le tableau 2. Il contient l'azimut A , mesuré dans le sens rétrograde à partir de la direction donnée par l'azimut 70°. Le tableau contient seulement le demi-axe a . Le demi-axe b est resté petit, de l'ordre de 0,1 mm. La valeur d'azimut à la fin de chaque observation de 15 minutes donne la vitesse angulaire $\Delta A^\circ / \Delta t = A^\circ / 15 \text{ min}$. Les valeurs de la vitesse sont données dans le tableau 3. La valeur théorique qui correspond à l'effet de Foucault est de 2,63° / 15 min. Le graphique de la vitesse est donné dans la fig. 2, dans laquelle la ligne horizontale correspond à l'effet de Foucault. La valeur qui correspond à l'instant 14^h a été éliminée, parce que la bille a subi un petit déplacement sur la plaque portante. Les lâchers suivants ont été effectués après le centrage de la bille.

On constate que pendant l'éclipse la vitesse est variable, celle-ci étant plus petite que la vitesse qui correspond à l'effet de Foucault. Sa valeur minimum, d'environ 2° / 15 min, est atteinte dans le voisinage du maximum de l'éclipse. En conséquence, pendant l'éclipse le mouvement du plan d'oscillation est plus lent.

Ainsi l'existence de l'effet d'Allais a été confirmée de nouveau, en utilisant tant le pendule de Foucault que le pendule d'Allais.

Tableau 1 - Données pour le pendule de Foucault

t	A_0	A_c	ΔA	a (cm)	b (mm)	t	A_0	A_c	ΔA	a (cm)	b (mm)
11 ^h 00 ^m	-20,0°	-20,0°	0,0°	35,4	0,0	13 ^h 05 ^m	0,8°	1,9°	-1,1°	35,5	0,0
11 05	-19,1	-19,1	0,0	33,5	0,0	13 10	1,7	2,8	-1,1	33,8	0,0
11 10	-18,3	-18,3	0,0	31,8	0,0	13 15	2,6	3,7	-1,1	32,0	0,0
11 15	-17,4	-17,4	0,0	34,0	0,0	13 20	3,5	4,6	-1,1	35,0	0,5 r
11 20	-16,7	-16,5	-0,2	29,0	0,0	13 25	4,4	5,4	-1,0	29,0	0,5 r
11 25	-15,9	-15,6	-0,3	27,6	0,5 d	13 30	5,3	6,3	-1,0	27,8	0,5 r
11 30	-15,1	-14,7	-0,4	26,5	0,5 d	13 35	6,2	7,2	-1,0	26,4	0,5 r
11 35	-14,3	-13,9	-0,4	25,4	1,0 d	13 40	7,2	8,1	-0,9	25,4	1,0 r
11 40	-13,7	-13,0	-0,7	24,2	1,0 d	13 45	8,1	8,9	-0,8	24,4	1,5 r
11 45	-12,9	-12,1	-0,8	23,2	1,5 d	13 50	9,0	9,8	-0,8	23,4	1,5 r
11 50	-12,1	-11,2	-0,9	22,2	1,5 d	15 55	10,0	10,7	-0,7	22,4	2,0 r
11 55	-11,1	-10,4	-0,7	21,5	2,0 d	14 00	11,1	11,6	-0,5	21,7	2,5 r
12 00	-10,3	-9,5	-0,8	25,0	2,5 d	14 05	12,0	12,5	-0,5	35,2	0,0
12 05	-9,4	-8,6	-0,8	35,3	0,0	14 10	12,9	13,3	-0,4	33,3	0,0
12 10	-8,7	-7,7	-1,0	33,9	0,0	14 15	13,8	14,2	-0,4	31,6	0,0
12 15	-7,9	-6,8	-1,1	31,9	0,0	14 20	14,7	15,1	-0,4	30,3	0,0
12 20	-7,0	-6,0	-1,0	36,0	0,0	14 25	15,6	16,0	-0,4	29,0	0,0
12 25	-6,2	-5,1	-1,1	29,0	0,0	14 30	16,5	16,8	-0,3	27,7	0,0
12 30	-5,3	-4,2	-1,1	27,5	0,0	14 35	17,4	17,7	-0,3	26,4	0,5 r
12 35	-4,4	-3,3	-1,1	26,4	0,0	14 40	18,4	18,6	-0,2	25,3	0,5 r
12 40	-3,6	-2,5	-1,1	25,4	0,5 d	14 45	19,4	19,5	-0,1	24,0	0,5 r
12 45	-2,7	-1,6	-1,1	24,2	0,5 d	14 50	20,3	20,3	0,0	23,0	0,5 r
12 50	-1,8	-0,7	-1,1	23,2	0,5 d	14 55	21,2	21,2	0,0	22,2	0,5 r
12 55	-1,0	0,2	-1,2	22,4	0,5 d	15 00	22,2	22,1	0,1	21,5	0,5 r
13 00	-0,1	1,0	-1,1	21,4	1,0 d						

Tableau 2 - Valeurs de l'azimut et de l'amplitude pour le pendule d'Allais

t	A°	a (cm)	t	A°	a (cm)	t	A°	a (cm)
10 ^h 45 ^m	0,0	14,4	12 ^h 35 ^m	1,4	12,9	14 ^h 25 ^m	0,0	14,6
10 50	0,9	13,6	12 40	2,0	12,3	14 30	0,9	13,8
10 55	1,8	12,9	12 45	0,0	14,5	14 35	1,8	13,1
11 00	2,6	12,3	12 50	0,7	13,7	14 40	2,6	12,5
11 05	0,0	14,4	12 55	1,6	13,0	14 45	0,0	14,5
11 10	0,9	13,6	13 00	2,4	12,4	14 50	0,9	13,7
11 15	1,8	12,9	13 05	0,0	14,6	14 55	1,9	13,0
11 20	2,9	12,3	13 10	0,8	13,8	15 00	2,9	12,4
11 25	0,0	14,3	13 15	1,7	13,1	15 05	0,0	14,9
11 30	0,9	13,5	13 20	2,8	12,5	15 10	0,9	14,1
11 35	1,8	12,8	13 25	0,0	14,8	15 15	1,8	13,4
11 40	2,7	12,2	13 30	0,8	14,0	15 20	2,7	12,8
11 45	0,0	14,4	13 35	1,6	13,3	15 25	0,0	14,5
11 50	0,8	13,6	13 40	2,5	12,7	15 30	0,8	13,7
11 55	1,2	12,9	13 45	0,0	14,6	15 35	1,7	13,0
12 00	2,0	12,3	13 50	0,9	13,8	15 40	2,7	12,4
12 05	0,0	14,4	13 55	1,5	13,1	15 45	0,0	14,7
12 10	0,8	13,6	14 00	2,0	12,5	15 50	0,8	13,9
12 15	1,5	12,9	14 05	0,0	14,3	15 55	1,7	13,2
12 20	2,2	12,3	14 10	0,9	13,5	16 00	2,6	12,6
12 25	0,0	14,4	14 15	1,7	12,8			
12 30	0,8	13,6	14 20	2,7	12,2			

Tableau 3- Variation de l'azimut pour le pendule d'Allais

t	$\Delta A^\circ / 15 \text{ min}$	t	$\Delta A^\circ / 15 \text{ min}$
11 ^h 00 ^m	2,6	13 ^h 40 ^m	2,5
11 20	2,9	14 00	2,0
11 40	2,7	14 20	2,7
12 00	2,0	14 40	2,6
12 20	2,2	15 00	2,9
12 40	2,0	15 20	2,7
13 00	2,4	15 40	2,7
13 20	2,8	16 00	2,6

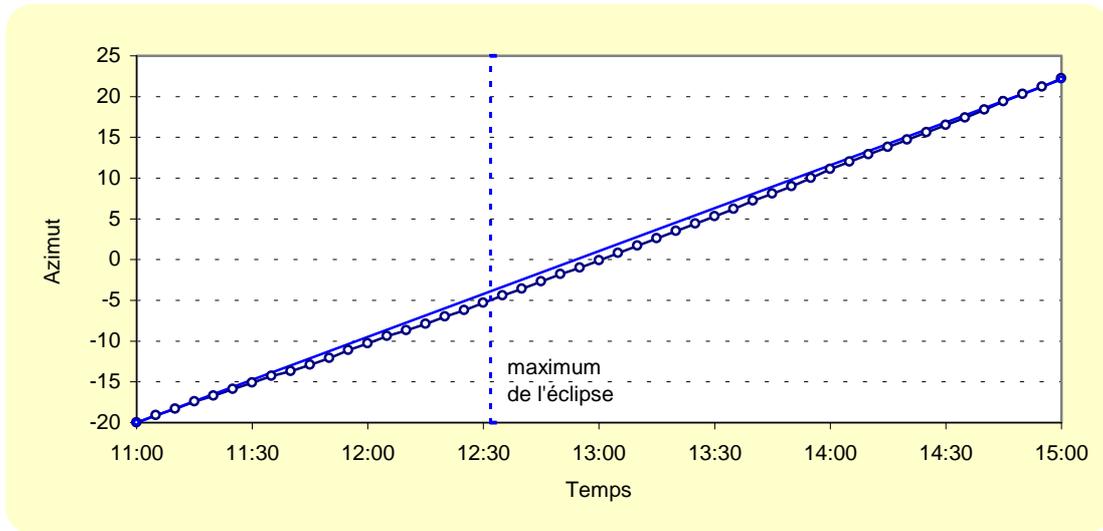


Fig. 1. Courbe de l'azimut pour le pendule de Foucault

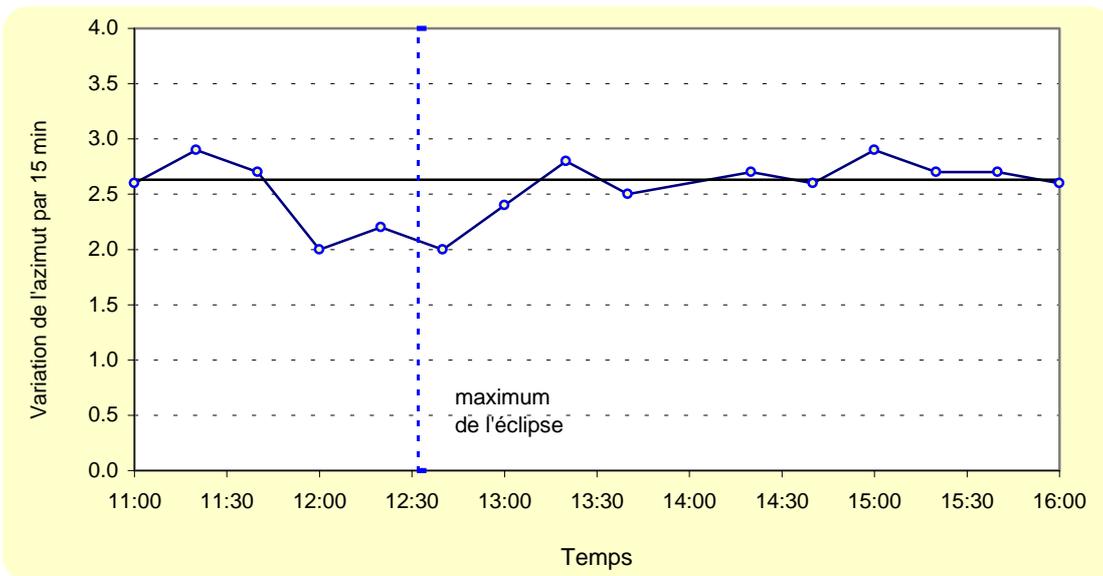


Fig. 2 Variation de l'azimut pour le pendule d'Allais.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Professeur Maurice Allais, lauréat du Prix Nobel, pour l'appréciation élogieuse de nos résultats, le Professeur Guy Berthault pour l'aide financière accordée pour la réalisation de notre pendule paraconique et l'Ingénieur conseil Henry Aujard pour son soutien constant. D'autre part, nous remercions la doctorande Diana Constantin pour son aide donnée pendant les observations décrites.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ALLAIS, M., *Mouvement du pendule paraconique et éclipse totale de Soleil du 30 juin 1954*, C. R. Acad. Sci. Paris, **245**, pp. 2001–2003, 1957.
2. ALLAIS, M., *L'Anisotropie de l'Espace*, Clément Juglar, Paris, 757 p., 1997.
3. ALLAIS, M., *"L'Allais effect" et mes expériences avec le pendule paraconique, 1954-1960*, Mémoire rédigé pour la NASA, Paris, 84 p., 1999.
4. ALLAIS, M., *Nouvelles expériences sur le pendule paraconique à support anisotrope*, C. R. Acad. Sci. Paris, **247**, pp. 1428-1431, 1958.
5. ALLAIS, M., *Structure périodique des mouvements du pendule paraconique à Bougival et Saint-Germain en juillet 1958*, C. R. Acad. Sci. Paris, **247**, pp. 2284-2287, 1958.
6. MIHĂILĂ, I., MARCOV, N., PAMBUCCIAN, V., AGOP, M., *Observation de l'effet d'Allais lors de l'éclipse de Soleil du 11 août 1999*, Proc. Ro. Acad., Series A, **4**, pp. 3–7, 2003.
7. MIHĂILĂ, I., MARCOV, N., PAMBUCCIAN, V., RACOVEANU, O., *A new confirmation of the Allais effect during the solar eclipse of 31 may 2003*, Proc. Ro. Acad., Series A, **5**, pp. 243–249, 2004.

Reçu le 31 mai 2006