

ARTICLE DE FOND, RÉALISATION

QUATOR PLANETIS CIRCUM IOVIS : MEDICEA SIDERA

Pierre Le Fur (MPSI, Institut Supérieur d'Électronique et du Numérique Toulon,
formateur académique en astronomie –Nice)

Résumé : *Suivons les traces de Galilée en étudiant ses observations sur les quatre satellites médicéens de Jupiter telles qu'elles furent décrites dans le "sidereus nuncius". Nous montrerons qu'à partir de ces relevés on peut retrouver certaines lois ignorées du savant Toscan. Enfin nous proposerons la construction d'un "Jovilab" qualitatif, sorte de tables d'éphémérides de positions de ces quatre satellites.*

Si, en l'an de grâce 2009, nous souhaitons fêter dignement l'Année Mondiale de l'Astronomie, la lecture de "*sidereus nuncius*", œuvre étincelante de Galileo Galilei, s'impose à nous. Elle constitue l'allumette déclenchant l'incendie qui embrasa la physique aristotélicienne et ses partisans religieux.

Cette œuvre peut être facilement consultée sur le site de l'Université de Strasbourg à l'adresse [10]. La force et la simplicité de cet ouvrage apparaît d'emblée, même si l'on ignore tout du latin... Les gravures intégrées au texte nous suggèrent autant le contenu des découvertes décrites par Galilée que le génie de son interprétation. L'élément central de cet ouvrage reste la découverte des "*quatre planètes autour de Jupiter : les astres Médicéens*", observés en janvier 1610.

Par la suite, Galilée n'a cessé d'améliorer sa lunette et ses accessoires afin d'obtenir des observations quantitatives aussi précises que possible. Au-delà de la révolution copernicienne confirmée par l'observation d'astres ne tournant pas autour de la Terre, il comprit rapidement l'intérêt que pouvait constituer l'obtention d'éphémérides. Ce système de lunes orbitant autour de Jupiter pouvait constituer une sorte d'horloge universelle, valable pour les différents points de la Terre, pourvu que l'astre soit visible. L'application à la mesure de la longitude des bateaux, grandeur jusqu'alors

quasi impossible à déterminer, aurait été immédiate par simple différence entre l'heure solaire locale et cette "heure universelle jovienne"; cela aurait constitué une deuxième révolution, moins intellectuelle mais économiquement et militairement exceptionnelle.

Les observations récoltées par Galilée pendant les années qui suivirent la publication de "*sidereus nuncius*" lui permettront d'obtenir un outil de prévisions de la position de ces satellites : le Jovilab.

Je vous propose de suivre les traces de Galilée ; d'examiner ses observations médicéennes ; de montrer comment on peut retrouver certaines lois ignorées par notre savant Toscan et finir par construire un « Jovilab » qualitatif.

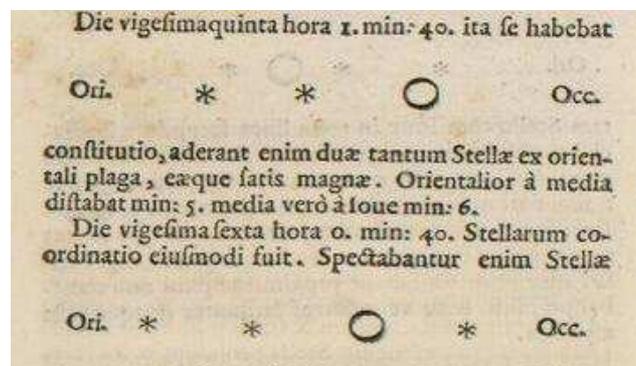


Fig 1 : extrait de "*sidereus nuncius*"

Des observations joviennes de Galilée en mars 1613

Cherchons sur Internet les données nécessaires à notre travail. La Bibliothèque Nationale de France nous propose de nombreuses images en particulier à l'adresse [1].

Nous accédons à une série de dessins juxtaposés où jour après jour, voire heure après heure, Io, Europe, Ganymède et Callisto dansent autour de l'astre central (fig. 2).

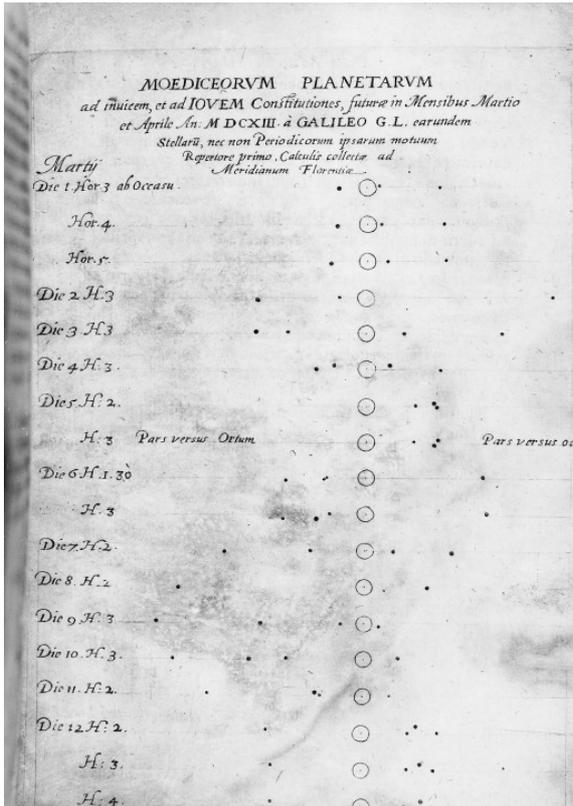


Fig 2 : Une page d'observation en 1613 [7]

La finesse et la précision du contenu de ces pages, écrites en 1613, montrent une évolution sensible des techniques d'observation par rapport aux premiers croquis du "Sidereus" en 1610 (fig.1): Galilée ajoute un micromètre extérieur à sa lunette (fig. 3) [1]. La simplicité du principe et son efficacité sont admirables.

Il observe Jupiter d'un œil et de l'autre, il lit une règle graduée, perpendiculaire au tube optique, éclairée par une lanterne. Les images se superposent dans le cerveau ; il fait alors coulisser la règle (d) jusqu'à ce que le diamètre de Jupiter occupe un intervalle unitaire de la graduation du régllet (environ 4mm de large à un mètre de

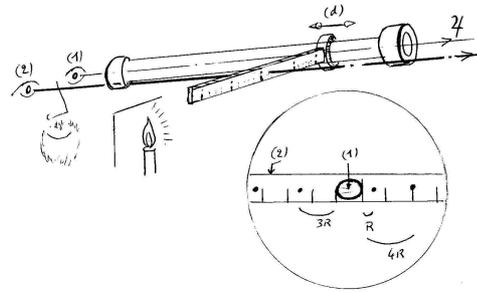


Fig 3 : Le micromètre de Galilée (schéma auteur)

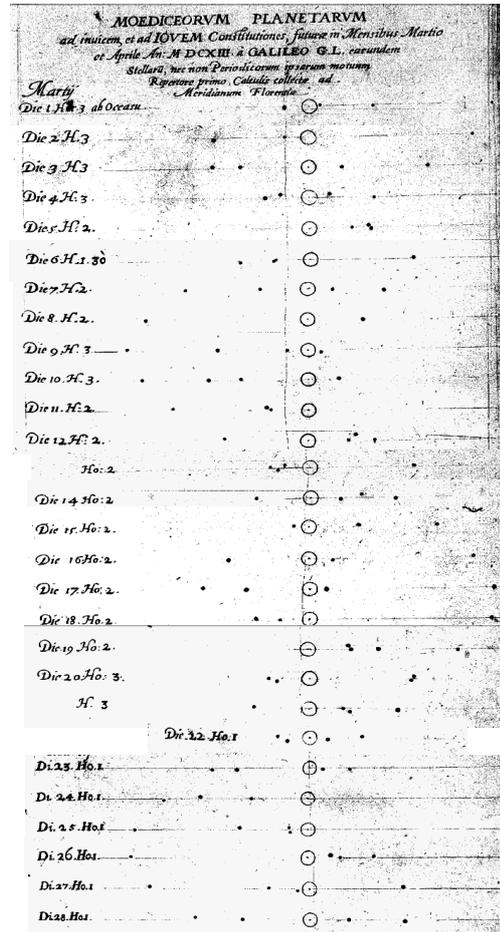


Fig 4 : série d'observations quotidiennes mars 1613

distance). L'unité de base est ainsi 2R, deux fois le rayon de la planète géante ! Il repère alors la position des satellites (fig. 2).

Notons que les indications horaires se réduisent à une précision d'une heure ; il ne disposait évidemment pas de "chronomètre", ce qui justifie cette méthode micrométrique [2].

Pour le mois de mars 1613, on peut ainsi constituer, par découpage de 3 pages, une série complète d'observations quotidiennes, (fig. 4), disponible sur le site de la BNF à l'adresse [8], pages 151, 153 et 155.

Déterminations des couples (périodes T/rayons a)

Au premier regard (fig. 5), les "trajectoires" de deux lunes apparaissent facilement dans ce diagramme {rayon, temps}: Callisto (d'amplitude maximale) et Ganymède dessinent deux sinusoïdes dont les périodes T et les amplitudes a se déterminent par lecture directe.

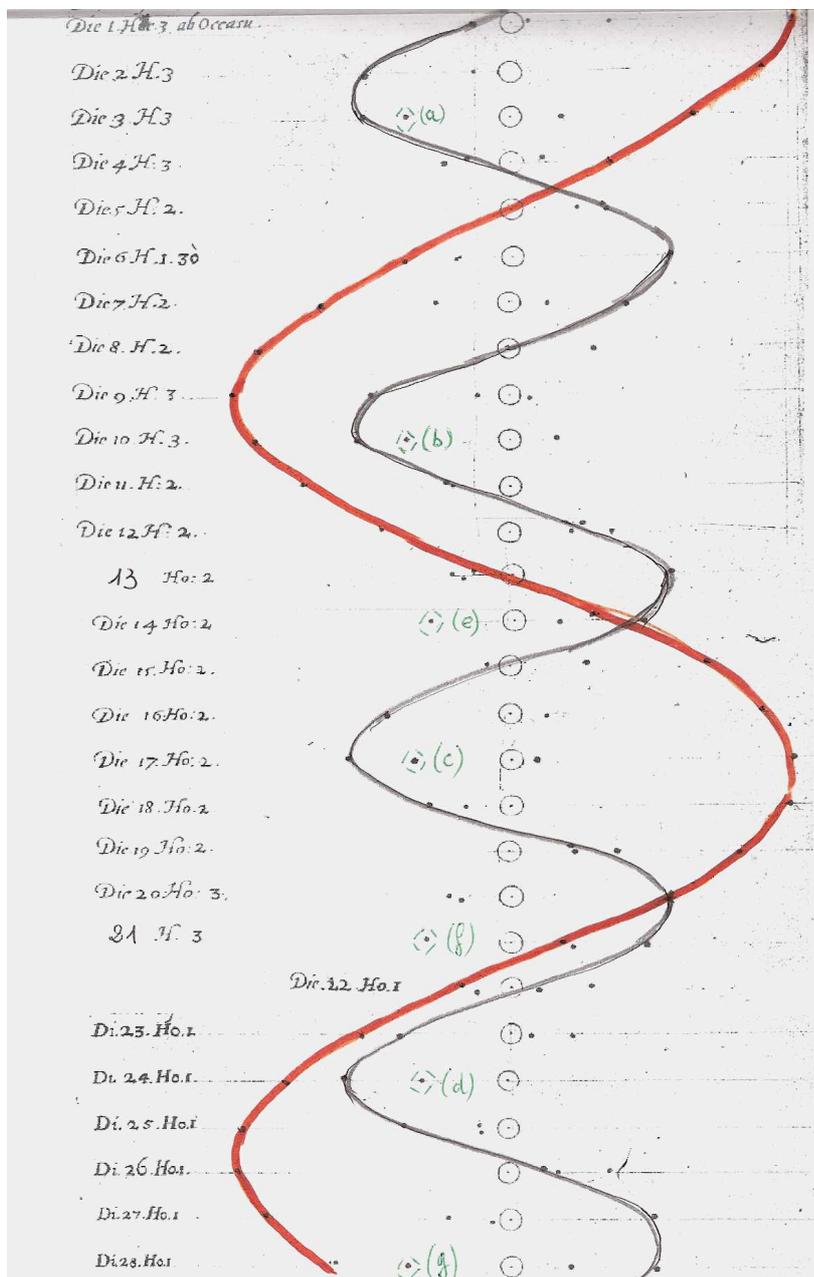


Fig 5 : Tracé des « sinusoïdes » du mouvement apparent de Callisto (en rouge), puis Ganymède

(a), (b), (c), (d), (e), (f) et (g). semblent correspondre à l'élongation maximale ouest d'Europe; il y a donc 7 périodes entre (a) et (g).

Notons que la valeur du rayon orbital a est mesurée par la valeur expérimentale la plus grande.

Satellite	T (jours)	a
Callisto	16,8	58
Ganymède	7,23	33
Europe	3,57	21

T est mesurée dans le référentiel Terre/Jupiter.

T est assimilée à une valeur sidérale...

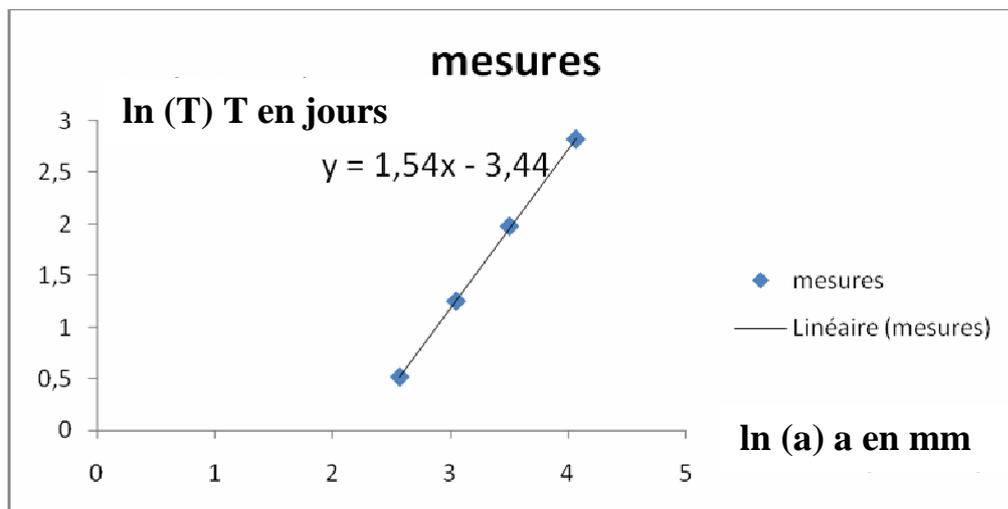
Les mouvements réels sont donc circulaires et uniformes, l'hypothèse elliptique de Kepler est inutile. Pour Europe, il est encore possible de faire la mesure de la période en repérant des élongations maximales. Pour Io, de rayon orbital minimum, aucune mesure sérieuse de T ne peut être envisagée.

Loi de Kepler sous forme logarithmique

Que peut-on faire de ces trois couples (rayon apparent a, période T) ?

L'histoire nous apprend que Kepler correspondait avec Galilée et que ce dernier avait reçu un exemplaire de l'"*astronomie nouvelle*" [3]. Il semblerait que Galilée avait retenu de cet ouvrage très mathématique l'idée copernicienne d'un Soleil central complétée par le caractère elliptique des trajectoires planétaires. La fameuse troisième loi de Kepler $T^2/a^3 = \text{constante}$ ne fut établie et publiée dans l'"*harmonie du monde*" que plus tard, vers 1618. Galilée aurait-il pu la vérifier expérimentalement ?

Pour le savoir, utilisons les logarithmes "inventés" par John Napier (1550-1617) quelques années auparavant. La troisième loi s'écrirait alors $\ln(T) = 3/2 \ln(a) + \text{constante}$. Proposons de tracer la relation expérimentale $\ln(T)$ en fonction de $\ln(a)$ avec les résultats des mesures précédentes (fig. 6).



Une relation linéaire de pente 1,54 apparaît soit un écart de 3% avec 3/2 la valeur attendue. Galilée aurait pu vérifier la troisième loi de Kepler.

Fig 6 : relation expérimentale entre $\ln(T)$ et $\ln(a)$. Le point correspondant à Io (2,56, 0,52) a été rajouté en calculant T par l'utilisation de la loi expérimentale établie pour Callisto, Ganymède et Europe et par la mesure de l'ordre de grandeur du rayon a, à partir de l'observation des élongations maximales.

Détermination de la masse de Jupiter à partir de données sur Callisto

Plusieurs dizaines d'années plus tard, après les travaux de Newton, la détermination des dimensions du système solaire et la mesure de la constante de gravitation universelle par Cavendish, il devenait possible de déterminer la masse de Jupiter :

$$T^2/a^3 = \text{constante} = 4\pi^2/(GM_{\text{Jupiter}})$$

En utilisant pour Callisto une valeur actuelle de $a = 1880 \cdot 10^6$ m et la période $T = 16,8$ jours (il faudrait utiliser la période sidérale, peu différente) mesurée avec les observations de Galilée on trouve 311 masses terrestres soit un écart de 2% avec la valeur en vigueur actuellement 317,9 masses terrestres [4]. Notons que l'incertitude relative sur la masse est deux fois celle sur la période.

Comparaison avec les valeurs récentes

La figure 7 montre que l'écart avec les valeurs modernes [4] est très faible (l'échelle des rayons étant de 58 mm pour $a_{\text{Callisto}} = 1880 \cdot 10^6$ m = $1,88 \cdot 10^9$ m).

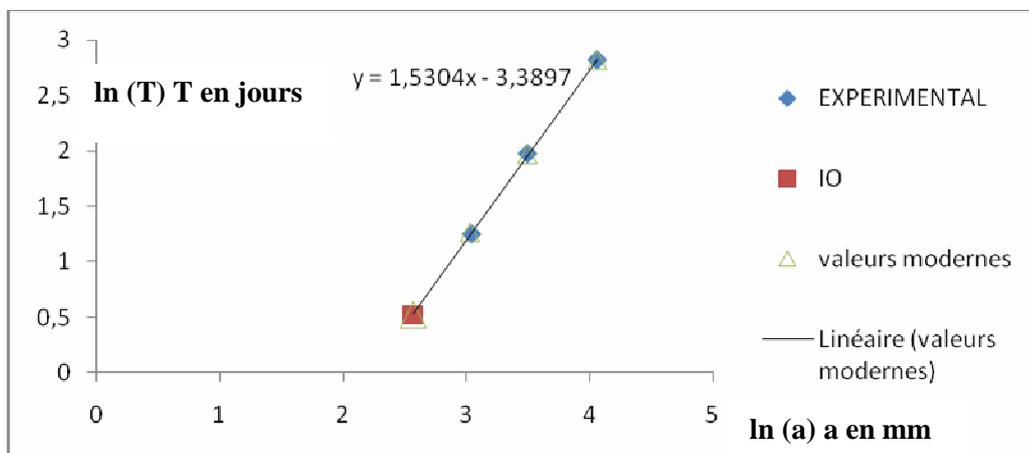
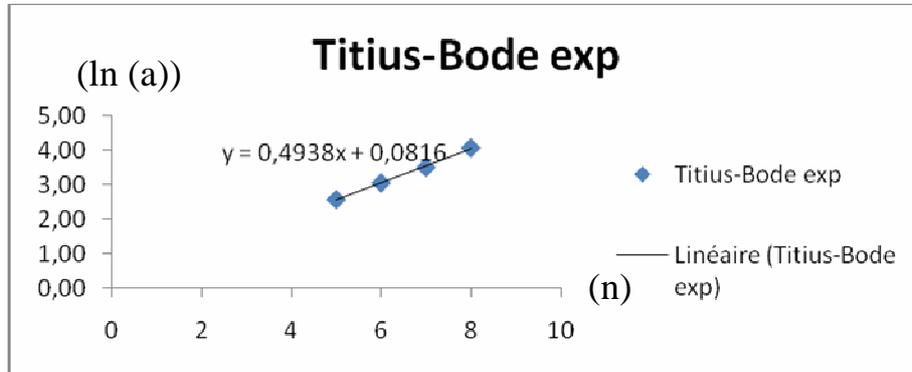


Fig 7 : superposition des relations expérimentales et des valeurs modernes de $\ln(T)$ en fonction de $\ln(a)$. Les "valeurs modernes" sont sidérales.

Loi de Titius-Bode

En examinant les valeurs de $\ln(a)$ obtenues expérimentalement (fig. 8) on constate qu'elles sont en relation simple avec un nombre entier n : $\ln(a) \approx 0,5 n$. Le rayon des orbites des quatre satellites galiléens suit donc une progression géométrique $a \approx \exp.(0,5 n)$. C'est la loi empirique de Bode (1747-1726), résultat secondaire du processus de formation du système jovien (ou solaire)[4]. Galilée ne semble pas l'avoir découverte ; Kepler y aurait vu une autre "harmonie du monde"...



$\ln(a)$	n
4,06	8
3,50	7
3,04	6
2,56	5

Fig 8 : Évolution du logarithme des rayons orbitaux a suivant une progression géométrique

Le Jovilab

Nous venons de voir à quel point les observations de Galilée sont précises et tout à fait cohérentes avec les données modernes. Elles lui ont permis d'établir des tables d'éphémérides de position des satellites médicéens qu'il a matérialisées par le "Jovilab" [9], sorte d'horloge astronomique jovienne sans mécanisme moteur (fig. 9).

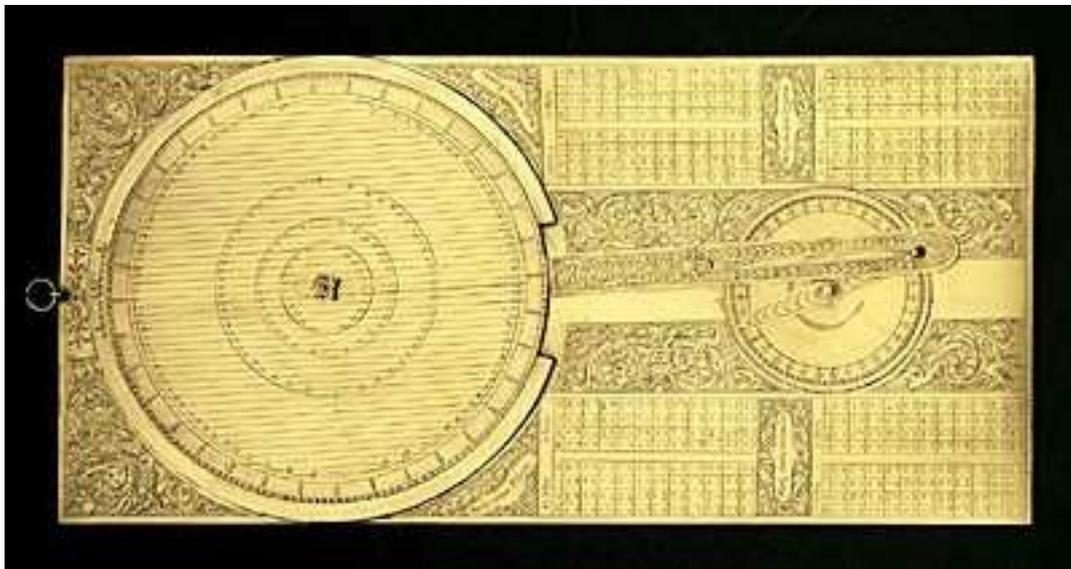
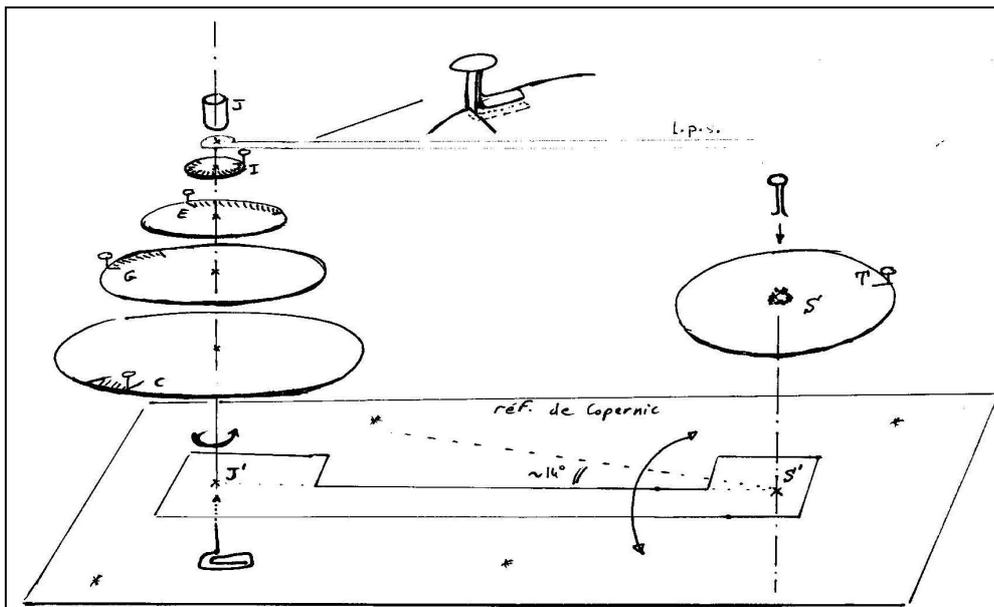


Figure 9 : [5]À gauche, Jupiter entouré de ces quatre satellites, à droite, le Soleil autour duquel orbite la Terre. Entre les deux, une tige rigide matérialisant la direction Terre -Jupiter.

Notre modeste réalisation en carton reste qualitative et diffère du Jovilab galiléen par la présence d'une simple languette plastique souple ("l.s.p.") permettant de matérialiser la direction Terre-Jupiter (fig. 10) en lieu et place d'une tige rigide visible sur le modèle original. D'autre part, on peut visualiser la révolution jovienne autour du Soleil par la présence d'un bras Jupiter-Soleil supplémentaire.



Diamètre des disques en mm	
Io	42
Europe	67
Ganymède	107
Callisto	188
Jupiter (bouchon)	14 mm

Secteur angulaire en ° / Jour	
Io	203
Europe	101
Ganymède	50,6
Callisto	21,6
longueur S'J' = 250 mm	

Fig 10 : variante cartonnée du jovilab

On ajoute une tige rigide S'J' permettant de matérialiser la révolution de Jupiter autour du Soleil et la « bielle » rigide Terre-Jupiter est remplacée par une languette plastique souple, mobile autour de l'axe JJ'. L'attache trombone pliée matérialisant l'axe J'J' glisse sur la base en carton matérialisant le référentiel de Copernic.

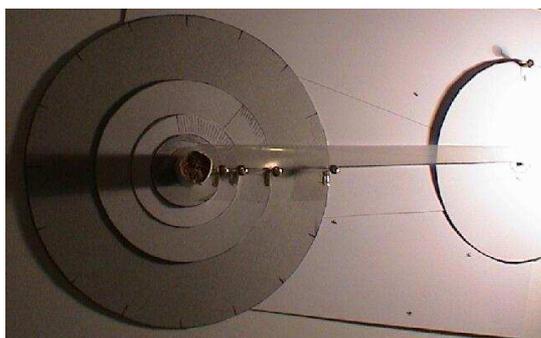
Les satellites et la Terre sont représentés par des attaches parisiennes pliées, solidaires des disques de carton, mais dépassant franchement de leur surface afin de porter une ombre.

Le tableau ci-dessus donne les dimensions de référence utilisées dans cette maquette. Sur chaque disque mobile médicéen, un secteur angulaire a été hachuré, pour figurer l'angle de rotation sidérale en un jour de temps terrestre. On pourra ainsi comparer les vitesses angulaires et les durées d'éclipse des différents satellites. De même, sur la base cartonnée (repère de Copernic) est dessiné un secteur angulaire d'environ 14° , représentant l'angle balayé par le rayon vecteur Soleil-Jupiter en 167 j environ soit 10 périodes sidérales de rotation de Callisto.

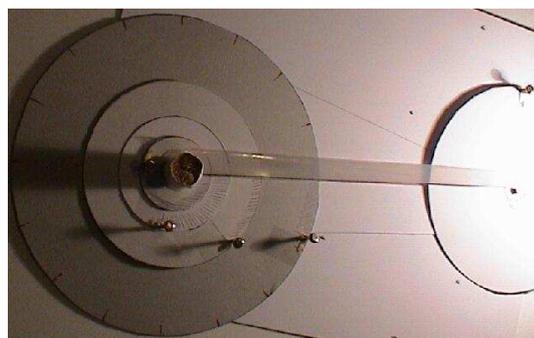
Les illustrations qui suivent permettent de montrer quelques-unes des nombreuses démonstrations réalisables avec ce dispositif. La languette plastique souple pourra aussi bien matérialiser la direction Jupiter-Soleil que Jupiter-Terre ou Jupiter-étoiles lointaines.



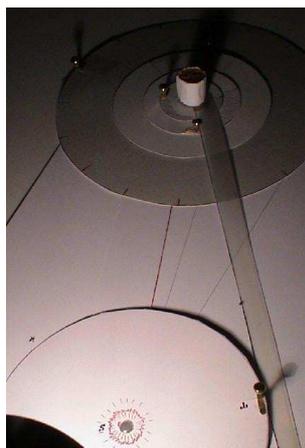
Fig 11 : réalisation pratique et mise en position par rapport à la lampe de bureau simulant le Soleil. Les ombres des satellites et de Jupiter sont visibles



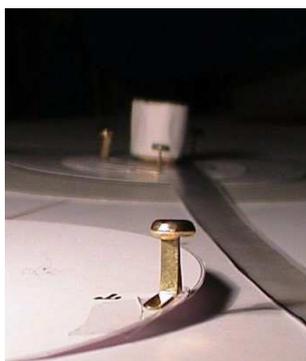
Les satellites prêts au départ...



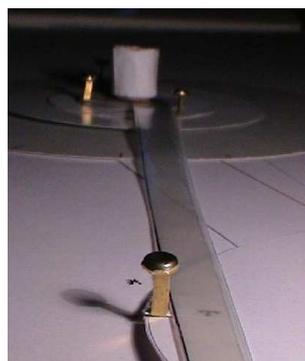
Io a gagné la course angulaire mais est déjà éclipsé.



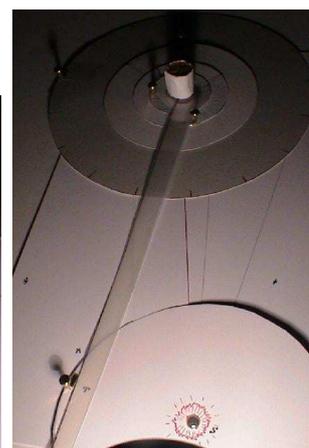
La Terre en quadrature Est



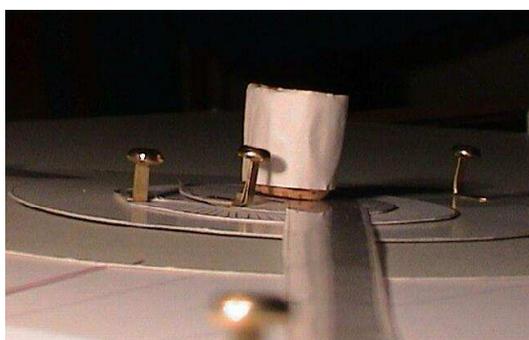
Europe passe devant Jupiter vu depuis la Terre



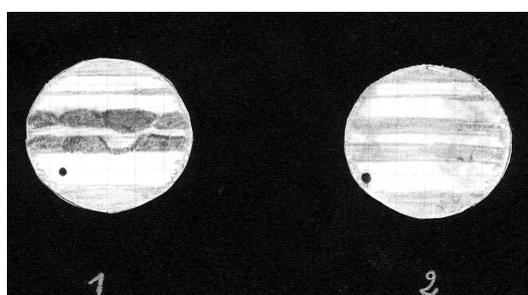
Europe ne passe pas devant Jupiter ... Et pourtant ...



... elle est dans la même position relativement à la ligne Soleil-Jupiter, mais la Terre est en quadrature Ouest



Io passe devant Jupiter, précédé de son ombre.



Deux observations de l'ombre d'Europe avec un télescope d'amateur de 100 mm, grossissement 112x. L'intervalle de temps vaut 12 min. (auteur)

Bien d'autres phénomènes peuvent être illustrés par ce jovialab simplifié : occultation d'un satellite qui passe derrière Jupiter, phénomènes mutuels...

On pourra estimer et comparer les ordres de grandeurs des durées d'éclipse ou de passage de l'ombre sur la planète (éclipse de Soleil sur Jupiter) comme les temps de passage dans la pénombre.

La différence entre les périodes synodique (par rapport au référentiel Soleil-Jupiter) et sidérale (référentiel Jupiter-étoiles) de Callisto ne se matérialise sur la maquette qu'au prix d'une accélération imaginaire d'un facteur 10 de la vitesse de révolution de Jupiter qui devient environ 14° pour 16,8 jours

Occultation :

Pour l'observateur, l'astre est caché par un autre astre (occultation d'une étoile par la Lune). Une éclipse de Soleil est en fait une occultation du Soleil par la Lune.

Éclipse :

L'astre passe dans le cône d'ombre d'un autre astre. Contrairement à l'occultation, ce phénomène est indépendant de la position de l'observateur

Conclusion :

Sur le mode interrogatif... Parmi les phénomènes occultation, passage d'un satellite devant la planète, alignements mutuels, éclipses diverses, quels sont ceux dont la date ne dépend pas, à priori, de la position de la Terre autour du Soleil ? Quels sont donc les événements qui peuvent servir de référence simple à une horloge universelle basée sur la période synodique ?

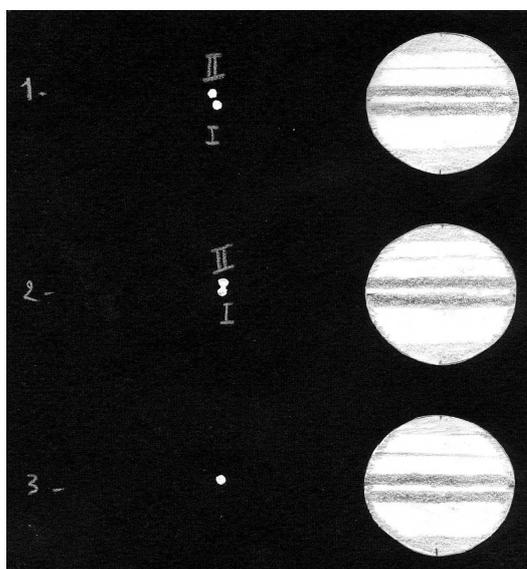
La réponse réside dans l'assimilation des phénomènes précédents (voir en fin de texte).

Plusieurs générations d'astronomes se sont succédées pour obtenir des éphémérides précises, bien que les mouvements soient quasi circulaires et uniformes. En particulier l'astronome Danois Römer, appelé à l'observatoire de Paris par Cassini (I) et Picard, se pencha sur le problème...

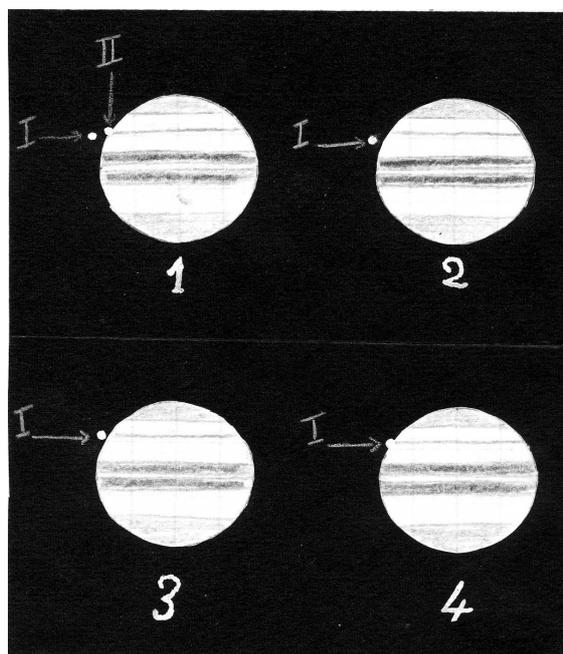
Et que découvrit-il en 1676 ?

Qu'il fallait tenir compte de la vitesse de la lumière ; mais c'est une autre histoire.

Laissons là Galilée, à ses rêves d'horloge-Jovialab, de casque-lunette "Celatone", de chaise d'observation antiroulis qui auraient pu lui amener la fortune auprès du roi d'Espagne.



*Occultation mutuelle d' Io et d'Europe.
Télescope d'amateur de 100 mm, grossissement
225x. L'intervalle de temps vaut 15 min. (auteur)*



*Occultations successives d' Io et d'Europe.
G=150 x, intervalle de temps 5 min. (auteur)*

L'horaire de ces phénomènes dépend directement de la position de la Terre.

Seuls les phénomènes d'éclipses en sont indépendants. Ils seront utilisés par Roemer pour mesurer la vitesse de la lumière.

[1] d'après Gorelli selon Istituto e Museo di Storia della Scienza à Florence.

[2] Jean Ripert Cahiers Clairaut n°25 été 84 p37 : "mesure de la masse de Jupiter avec un chronomètre."

[3] David Fossé, Ciel et Espace janvier 2009 n°464 p33, 34.

[4] bureau des longitudes "Les étoiles, Le système solaire" p60 et 80 Gauthier Villard 1979.

[5] site internet de l'IMSS. <http://www.imss.fi.it>

[7] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b2600270n>

[8] Istoria e dimonstrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti : compresse in tre lettere (Galileo Galilei)

Pages 151, 153, 155 ; <http://visualiseur.bnf.fr/CadresFenetre?O=NUMM-51265&M=chemindefer>

[9] <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94904n/f92.table>

P475 et suivantes

[10] <http://imbase-scd-ulp.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=47&pos=0>

[11] <http://gallica.bnf.fr/image?L=02600270&I=2>