

1610-2010 : La saga des satellites galiléens...

X – Les observations physiques : rayons, magnitudes, masses, nature des satellites

Dès la découverte des satellites par Galilée, la principale préoccupation des astronomes sera de comprendre le mouvement des satellites et de construire des éphémérides précises, d'autant que leur utilité n'est pas à prouver : ces éphémérides permettent de mesurer les longitudes terrestres, ce qui est stratégique au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. Cependant, on cherche à mesurer leurs tailles, leurs masses (et donc leurs densités), la nature de leur surface et leur rotation autour de leur axe. Déjà, Galilée suppose une rotation synchrone (comme la Lune face à la Terre) qui sera confirmée par J.D. Cassini en 1678, Maraldi en 1713 et W. Herschel en 1797 tout simplement en constatant que leur variation de luminosité a la même période que leur révolution autour de Jupiter. Pour déterminer leur taille, on va s'efforcer d'observer un diamètre apparent. C'est une chose difficile avec des petits instruments ayant un pouvoir de résolution faible et on va plutôt chercher à mesurer la durée de sortie de l'ombre de Jupiter dont on déduira le diamètre en utilisant la vitesse du satellite. Ce n'est qu'avec l'augmentation de la taille des lunettes au XIX^{ème} siècle que l'on pourra envisager une mesure directe au micromètre. La table suivante donne les valeurs des diamètres apparents mesurés depuis la découverte.

Les diamètres des satellites (en secondes de degré)

- diamètres déterminés au début par la durée de sortie de l'ombre, car instruments insuffisants pour voir un diamètre apparent (résolution ~ 0,5 " alors que les diamètres sont proches de 1")

source	Io	Europe	Ganymède	Callisto
Cassini 1693 (éclipses)	1,92	1,97	2,06	1,96
Maraldi 1734 (transits)	2	2	2,2	2
Herschel 1797 (transits)		0,9	1,6	
Schröter 1798 (transits)	1,16	0,93	1,73	1,18
Struve 1829 (micromètre)	1,015	0,911	1,488	1,273
Secchi 1856 (micromètre de jour)	0,985	1,054	1,609	1,496
Engelman 1871 (occultations)	1,081	0,910	1,537	1,282
Pickering 1879 (photométrie)	0,924	0,866	1,096	0,651
<i>Voyager/Galileo</i>	<i>0,964</i>	<i>0,828</i>	<i>1,394</i>	<i>1,277</i>

Les progrès de la mécanique céleste vont permettre, dès la fin du XVIII^{ème} siècle, de calculer les masses des satellites grâce aux perturbations mutuelles. La table suivante donne les valeurs des masses ainsi déterminées.

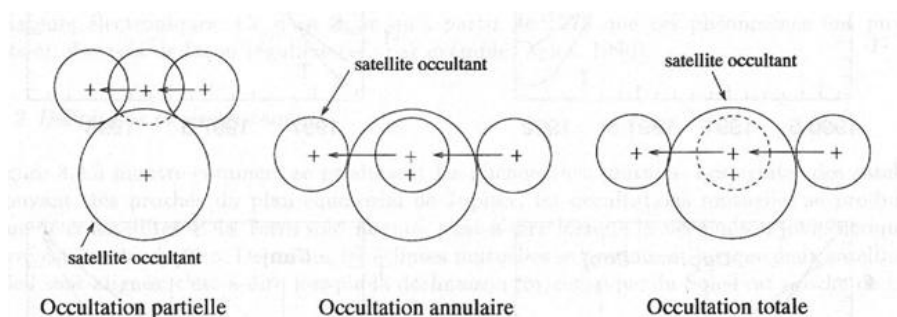
Les masses des satellites

(en 10^{-5} masse de Jupiter)

	I - Io	II - Europe	III - Ganymède	IV - Callisto
Bailly 1766	4,247	2,11	7,624	5
Lagrange 1766	6,869	2,417	6,869	14
Laplace 1805	1,73281	2,32355	8,84972	4,26591
Damoiseau 1836	1,6877	2,322696	8,84370	4,24751
Sampson 1910	4,500	2,540	7,990	4,500
De Sitter 1931	3,810	2,480	8,170	5,090
<i>aujourd'hui 2010</i>	<i>4,7</i>	<i>2,5</i>	<i>7,8</i>	<i>5,7</i>

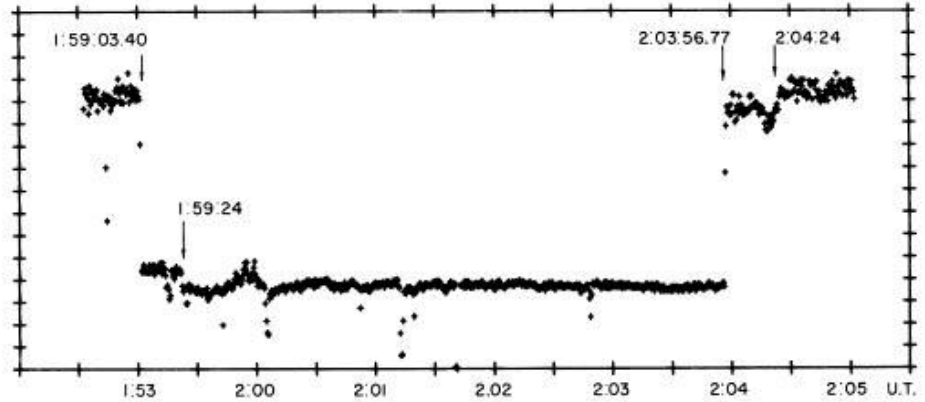
Après les travaux de grande ampleur du XIX^{ème} siècle concernant la mécanique céleste et les observations nombreuses réalisées à cette époque, l'étude dynamique des satellites galiléens va connaître un temps d'arrêt dans les années 1920 : on estime ne pas pouvoir aller plus loin (on pense avoir une précision de l'ordre de 800km sur leurs positions) et on va s'intéresser à leur nature. Les magnitudes des satellites ont été mesurées au XIX^{ème} siècle. En 1806, Flaugergues donne les valeurs suivants : III=1; I=0,62; II=0,57; IV=0,54 et en 1877, Zenger donne : III=1; II=0,97; I=0,96; IV=0,82 (d'après leur apparition au crépuscule). Aujourd'hui les magnitudes estimées à l'opposition sont (en V): I=5,02; II=5,29; III=4,61; IV=5,65.

L'astrophysique qui étudie les rayonnements émis par les astres prend alors son essor. L'augmentation de la puissance des instruments va permettre de tenter de voir des détails à la surface des satellites. Malheureusement l'observation ne peut être que visuelle et les satellites ont un diamètre apparent bien faible. On peut mesurer par contre la quantité de lumière réfléchi par les satellites et on constate qu'ils sont particulièrement brillants, surtout Io et Europe. La mesure de cette lumière se fait par effet photoélectrique et on peut étudier sa variation dans le temps. On mettra ainsi en évidence la rotation synchrone des satellites (ils présentent toujours la même face à Jupiter). La détermination de leur densité va faire appel aux études dynamiques. C'est en mesurant les perturbations mutuelles des satellites les uns sur les autres que l'on déterminera leurs masses et, de là, leur densité. Les mesures réalisées en 1928 se sont révélées faites avec une erreur de 20%, ce qui est très honorable vue la difficulté. Dans les années 1950 les techniques s'améliorent, les mesures sont plus précises. Les diamètres seront déterminés lors des occultations par la Lune, des occultations d'étoiles ou des occultations mutuelles.



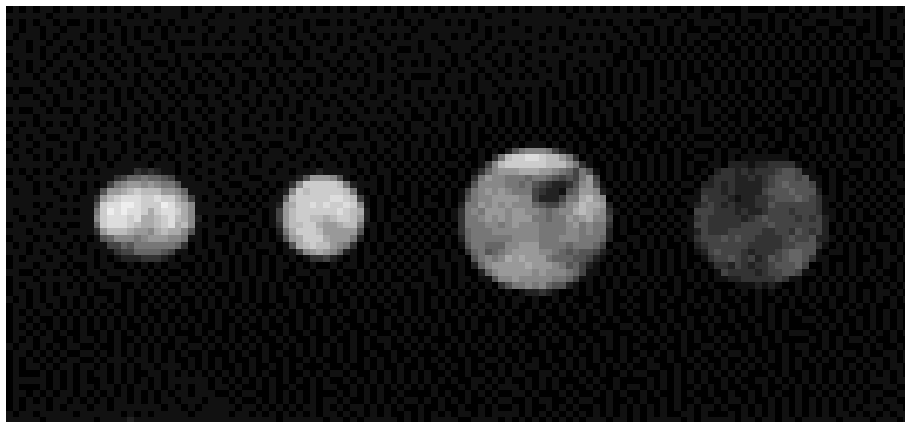
Plusieurs observations d'occultations mutuelles permettent d'en déduire les diamètres des satellites.

FIG. 2. General representation of occultation data showing level changes due to the faint companion of β Sco C. Note the large reduction in terrestrial scintillation noise during β Sco C's obscuration by Io. This appears due to both the expected factor due to statistical noise (\sqrt{n}) and the finite diameter of Io.



En 1971, Io va occulter une étoile très brillante (β Scorpion) : l'interruption de la courbe de lumière donne la durée de l'occultation et une corde du diamètre d'Io.

Photométrie, polarimétrie et spectrophotométrie se développent. On mesure les couleurs, on recherche des atmosphères. Dans les années 1960, on suggère l'existence d'eau à la surface d'Europe et de Ganymède; on remarque la brillance élevée d'Io dans le rouge, un excès d'émission dans l'infrarouge et certains auteurs vont même jusqu'à envisager du volcanisme engendré par les puissants effets de marée de Jupiter sur Io.



Dessins des surfaces des quatre satellites galiléens par A. Dollfus (1962)

Io

La proximité de Jupiter influence fortement Io : avant même que la sonde Voyager envoie les images spectaculaires que nous connaissons, certains avaient suggéré que les forces de marée de Jupiter sur la surface de Io pouvaient la déformer suffisamment pour créer un volcanisme actif. Les observations infrarouges révélaient également que la surface de ce satellite était plus chaude que prévu.

Les photos de Voyager ont effectivement révélé neuf volcans extrêmement actifs, certains éjectant de la matière jusqu'à 300 kilomètres d'altitude. Outre les forces de marée de Jupiter, les perturbations gravitationnelles d'Europe et de Ganymède déforment la surface de Io d'une centaine de mètres (à titre de comparaison, la Lune et le Soleil n'ont un effet que de quelques dizaines de centimètres sur

la Terre) et l'on comprend le réchauffement de la surface. La température de surface est de 130K (-143°C) et celle des volcans ou des points chauds est de 290K (+17°C). Cependant, le flux de chaleur émis par Io provient-il exclusivement de la dissipation d'énergie engendrée par les effets de marée ou bien Io est-il en train de se refroidir.

Io est composé de roches contenant un peu de fer, sa surface, recouverte de soufre et de dioxyde de soufre, présente, outre des volcans, des points chauds et des épanchements de lave, un relief montagneux pouvant atteindre 10 kilomètres d'altitude. L'intérieur du satellite est probablement composé d'un noyau fer-nickel entouré d'un manteau rocheux comme les mesures de la sonde Galileo le laisse penser.

Io interagit de plus violemment avec la magnétosphère de Jupiter qui arrache de la matière (une tonne par seconde!) qui va former un tore autour de Jupiter.

Europe :

Bien que différent d'Io, Europe présente cependant également des caractéristiques étonnantes : c'est un corps sans relief dont la surface est faite d'une croûte de glace d'eau d'une épaisseur probable de 5 kilomètres sous laquelle il serait possible de trouver un océan d'une profondeur de 50 kilomètres (ou de la glace chaude en convection ?). Plus profondément se trouve un manteau rocheux puis un noyau fer-nickel.

La surface d'Europe ne présente aucun relief marquant. On note aussi l'absence de cratères. Les impacts météoritiques ont cependant éjecté de la matière plus sombre présente en surface. Les cratères sont probablement comblés rapidement par des éruptions de glace jaillissant des fractures de cette banquise, créées, elles-aussi par des forces de marée.

Ganymède :

Ganymède est le plus gros des satellites galiléens. Sa densité plus faible suggère un gros noyau rocheux entouré d'un manteau de glace et de silicates. La croûte de surface est rocheuse mais contient aussi de la glace d'eau. Les mesures de champ magnétique réalisées par Galileo suggèrent un important océan d'eau salée sous la croûte de surface.

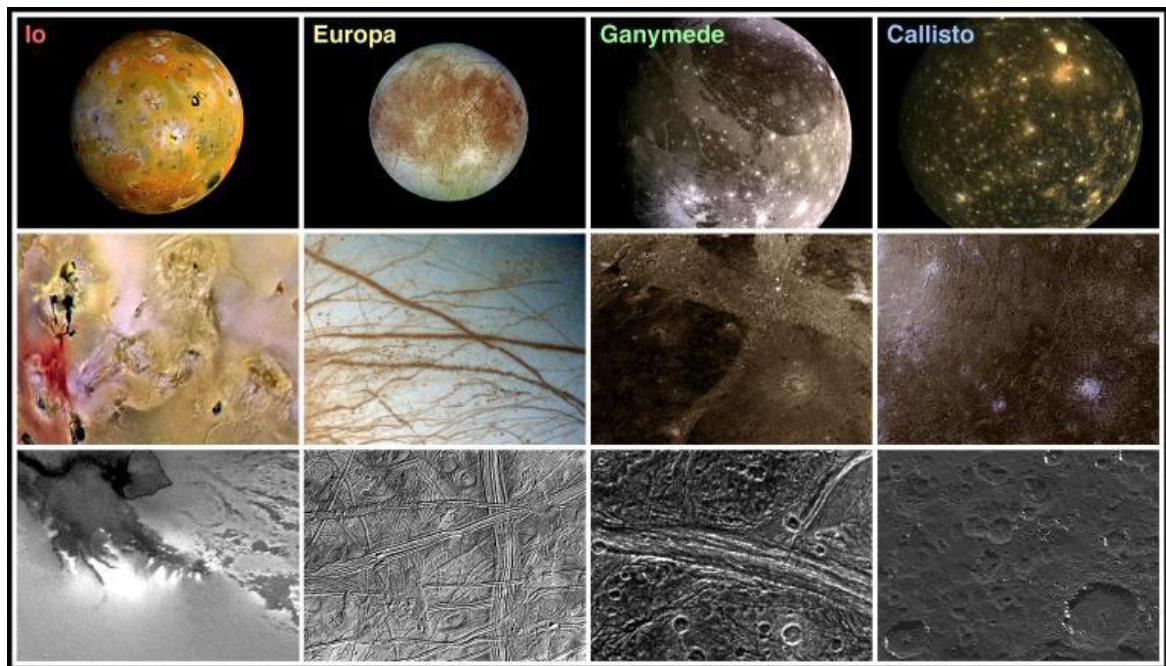
La surface de Ganymède présente un relief important de vallées, de montagnes, et de cratères ayant éjecté de la glace du sous-sol. La température de surface varie de 90 à 160K (-113 à -183°C).

Callisto :

Callisto se caractérise par une surface très ancienne (4 milliards d'années!) présentant un nombre de cratères considérable (la plus grande densité de tous les corps du système solaire). Cette surface est composée de roches et de glaces et ne présente pas de reliefs importants. Les cratères d'impact sont entourés d'anneaux concentriques et la glace éjectée lors de ces impacts forme des zones claires sur la surface.

La faible densité de Callisto et les mesures de Galileo laissent penser que la croûte a 200 kilomètres d'épaisseur au-dessus d'un océan de 10 kilomètres de profondeur entourant un noyau intérieur qui ne présente pas une conformation uniforme.

Les images suivantes montrent l'aspect des satellites et de leurs surfaces vues par Galileo.



Nous consacrerons notre dernière rubrique sur la saga des satellites galiléens aux derniers résultats obtenus sur la connaissance de ces satellites et aux projets les concernant.