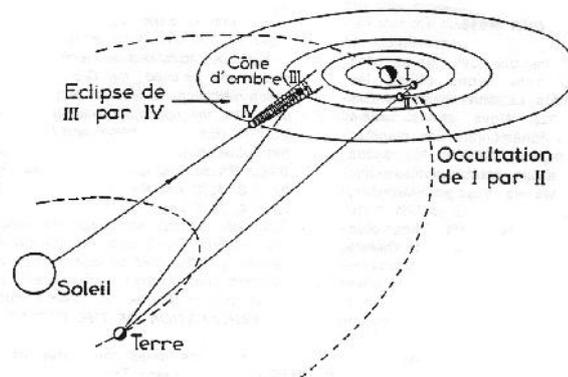


1610-2010 : La saga des satellites galiléens...

IX – Les phénomènes mutuels.

On a vu précédemment que les satellites galiléens offraient aux observateurs des éclipses et des occultations par le globe de Jupiter. Ces phénomènes ont eu un rôle majeur dans l'histoire de notre connaissance du système jovien mais ils trouvèrent leur limite lorsque la précision astrométrique des observations augmenta : l'atmosphère de Jupiter brouillait les observations. D'autres phénomènes ont été d'abord envisagés avant d'être observés : les phénomènes mutuels des satellites, c'est-à-dire les éclipses et occultations mutuelles entre satellites. Ces phénomènes sont dus aux positions relatives que prennent le Soleil, la Terre et deux satellites. La figure ci-dessous explique bien comment les phénomènes mutuels se produisent. Les satellites galiléens ont leurs orbites quasiment coplanaires. Ainsi, quand la Terre passe dans ce plan (i.e. quand la déclinaison jovicentrique de la Terre s'annule), les satellites s'occultent l'un l'autre. De même, quand le Soleil passe dans ce plan, (i.e. quand la déclinaison jovicentrique du Soleil s'annule), les satellites peuvent passer dans l'ombre les uns des autres : il y a éclipse mutuelle. Ces phénomènes, contrairement aux phénomènes "classiques" qui ont lieu en permanence, ne se produisent que tous les six ans au moment de l'équinoxe sur Jupiter: l'équinoxe, c'est le moment où le Soleil (et la Terre parce qu'elle en est très proche) est dans le plan équatorial jovien, plan des orbites des satellites. L'absence d'atmosphère sur les satellites galiléens fournit un signal peu bruité et permet une observation précise, et, outre l'instant du phénomène, une durée et une amplitude peuvent être mesurées si l'on dispose du matériel adéquat.



Crédit : D.T. Vu/IMCCE

Le système jovien pendant les phénomènes mutuels

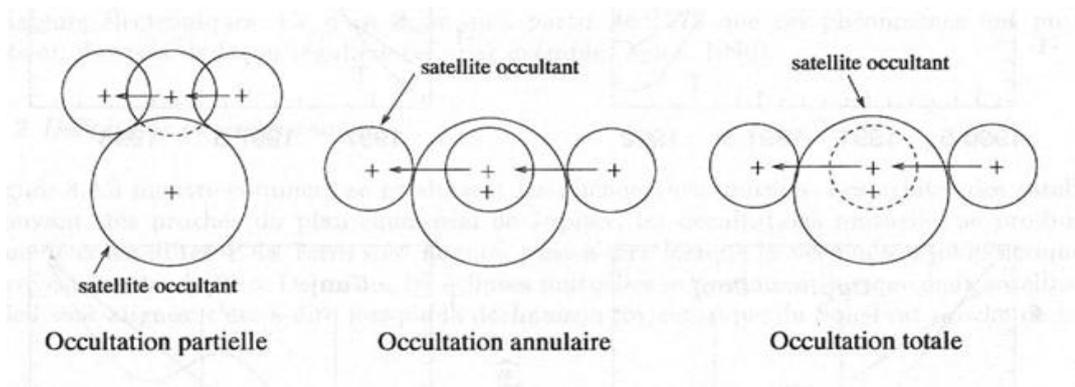
Les phénomènes sont possibles tant que ces déclinaisons restent proches de zéro. Bien entendu, il faut que Jupiter et le Soleil soient en opposition - c'est-à-dire que, vus de la Terre, Jupiter soit observable de nuit - pour que les phénomènes soient observables. Enfin, selon la déclinaison géocentrique de Jupiter, les observations sont plus favorables pour les observatoires de l'hémisphère Nord (déclinaison positive) ou Sud (déclinaison négative).

La prédiction des phénomènes mutuels

La prédiction des phénomènes mutuels est complexe. Si l'on est capable de définir les périodes propices (la Terre et le Soleil se trouvent dans le plan orbital des quatre satellites galiléens), chaque phénomène, sa date et son instant précis, est plus difficile à prévoir. En effet, les quatre satellites sont *presque* dans le même plan et il faut être capable de calculer les positions relatives très précises des satellites pour savoir s'il y a ou non occultation de deux satellites ou éclipse.

Si les satellites n'avaient pas un mouvement si perturbé, le calcul de prédiction serait simple : à chaque conjonction, un phénomène aurait lieu. Ce n'est pas le cas, et il faut prendre en compte tous les termes de la théorie du mouvement des satellites : seule l'utilisation de calculateurs électroniques a permis que ces calculs puissent être effectués avec précision. Toutefois, certains écarts pourront apparaître entre prédiction et observation. Leur analyse permettra l'amélioration du modèle théorique de mouvement des satellites.

On détermine qu'il y a phénomène lorsque la distance apparente entre deux satellites est inférieure à la somme des rayons apparents (vue de la Terre pour les occultations et vue du Soleil pour les éclipses). Les phénomènes peuvent être partiels, totaux ou annulaires (comme pour la Lune). Dans le cas des éclipses, il peut y avoir aussi éclipse par la pénombre seule, mais ce type de phénomène n'est pas toujours détectable.



La géométrie d'une occultation mutuelle: on ne distingue pas ces figures depuis la Terre mais la courbe de variation de flux photométrique observé permet de les reconstruire.

Les observations

La rareté et la grande précision de l'observation des phénomènes mutuels expliquent le lancement de campagnes d'observations lors des périodes favorables. La visibilité d'un phénomène dépendant du lieu d'observation, il est nécessaire qu'un effort international soit fait afin de couvrir toutes les longitudes terrestres. Voyons ce qui a été fait par le passé.

Avant 1973, les calculs de prédiction restaient imprécis et il était alors difficile de réduire et d'utiliser ces observations du fait de l'usage alors restreint des calculateurs électroniques. On ne dispose donc que de quelques observations clairsemées, souvent effectuées par hasard par des observateurs de phénomènes classiques. Au XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, la photométrie photoélectrique n'existait pas et seules quelques observations visuelles ont été faites, dont certaines de simples conjonctions que l'on ne différenciait pas des occultations rasantes.

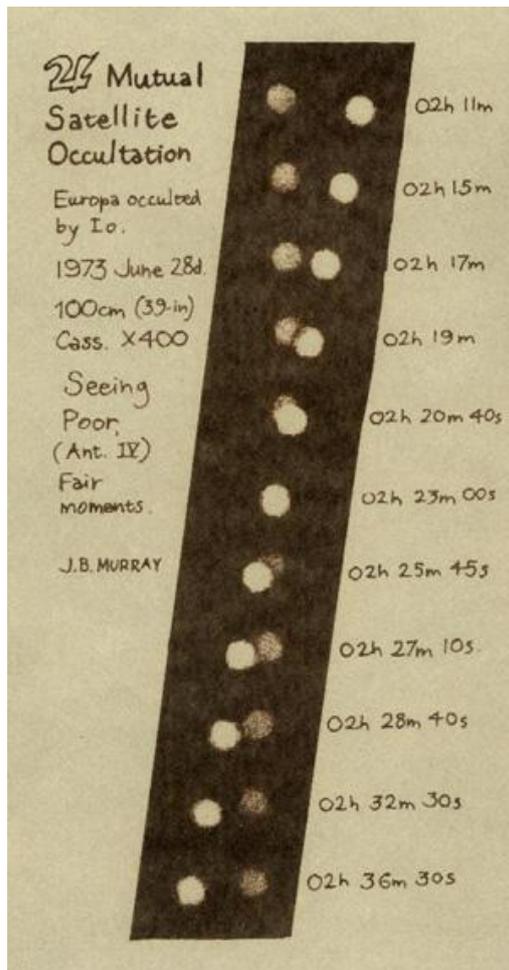
En 1973, la période était favorable et de nombreux jeux de prédictions ont été publiés. Une centaine d'observations ont été faites de par le monde mais en 1979, la période n'était pas favorable car la majorité des phénomènes se produisaient lors de la conjonction Jupiter-Soleil. Afin d'éviter une longue période sans observation de phénomènes mutuels, un effort particulier a été fait et une vingtaine de courbes de lumière ont été observées.

En 1985, 1991, 1997, 2003 et 2009, les périodes étaient favorables et des campagnes d'observations internationales ont rassemblé des observateurs de tous pays répartis tout autour de la Terre. On disposait ainsi en permanence d'au moins un observateur pour lequel Jupiter était visible et pouvant ainsi observer les phénomènes qui avaient lieu. Récemment en 2009, 520 observations de 250 phénomènes différents ont été effectuées depuis 52 sites d'observation montrés par la figure suivante :



Les sites d'observation des phénomènes mutuels en 2009

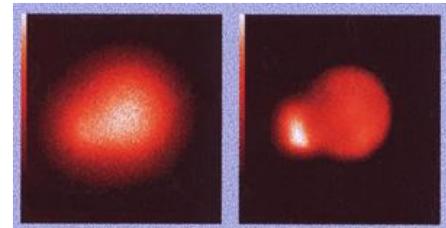
Les observations effectuées sont des observations photométriques, c'est-à-dire des observations de la variation de flux de lumière envoyé par les satellites (c'est un peu comme lors d'une éclipse de Soleil : quand la Lune recouvre le Soleil, le flux lumineux est minimal et cela signifie que les positions apparentes de la Lune et du Soleil sont pratiquement les mêmes). Il est indispensable que toutes les observations réalisées soient rapportées à la même échelle de temps : le Temps Universel, afin de les raccorder entre elles et au modèle théorique de mouvement.



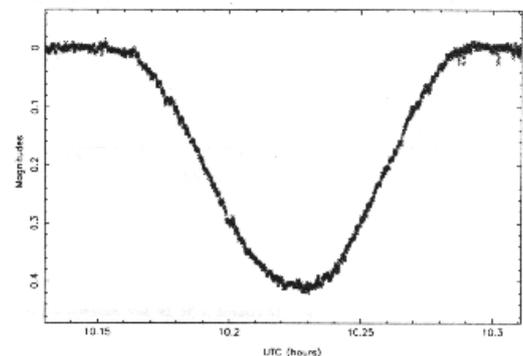
Crédit : J. B. Murray

Ci-dessus, une succession de dessins effectués au cours d'une occultation mutuelle en 1973 à Meudon avec le télescope de 1m (occultation d'Europe par Io le 28 juin 1973).

Ci-dessous, une image obtenue en optique adaptative à gauche pendant une occultation mutuelle en 1997 à l'Observatoire de Haute-Provence avec le télescope de 1m 52 (occultation d'Europe par Ganymède en 1997). A droite, la même image après traitement numérique.



Crédit : ESO/ONERA/F. Marchis

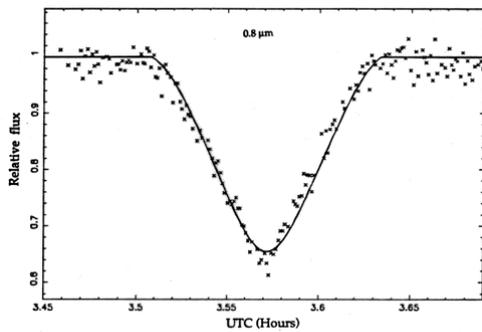


Crédit : IMCCE/ESO

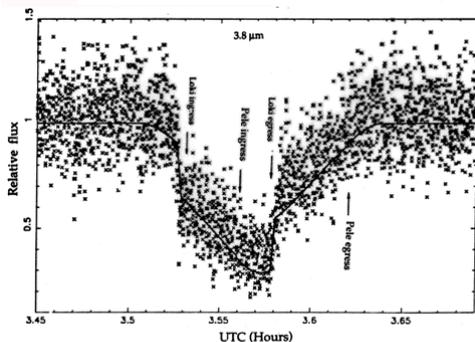
Ci-dessus, une courbe photométrique montrant la variation de lumière pendant l'occultation de Europe par Ganymède le 10 juin 1985 à l'ESO (photomètre photoélectrique, télescope de 50cm).

Ces séries d'observation présentent non seulement un intérêt pour l'étude dynamique du système jovien puisque l'on détermine précisément la position relative des satellites à un instant donné, mais aussi pour l'étude des sols des satellites puisque la variation d'intensité de la lumière au cours d'un phénomène dépend de la nature des sols passant de l'ombre à la lumière.

L'un des résultats les plus spectaculaires est l'observation de l'activité des volcans de Io, difficiles à observer depuis la Terre, mais qui émettent un flux infrarouge important. Lors de l'occultation d'un volcan par un autre satellite, le flux disparaît montrant ainsi la position du volcan et son activité au moment de l'observation.



Lightcurve observed at 0.8 μm and the model (line) during the occultation of Io by Europa on February 20, 1991, at the 1-m telescope of the Pic du Midi Observatory (Colas *et al.*, in preparation).



Lightcurve observed at 3.8 μm and the model (line) during the occultation of Io by Europa on February 20, 1991, at the 1-m telescope of the ESO.

Ci-contre :

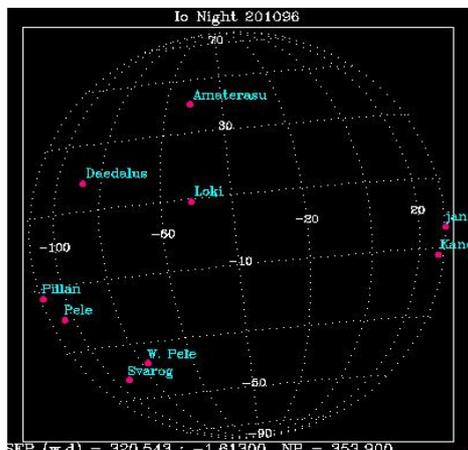
en haut, une occultation de Io observée dans le visible;

en bas, la même occultation observée en infra rouge (bande de 3,6 micromètres) : les ruptures brutales de la courbe de lumière correspondent à l'occultation du volcan Loki (disparition puis réapparition), très actif lors de l'observation.

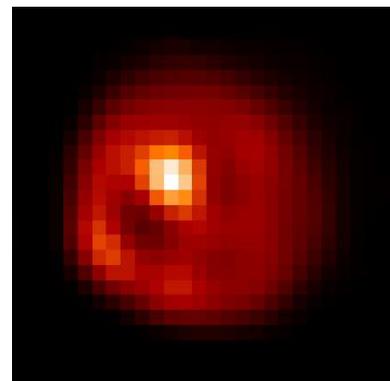
Crédit : IMCCE/ESO (Icarus 100, 235)

Les deux sondes Voyager ont survolé Io et les volcans détectés n'étaient pas tout à fait les mêmes pour les deux sondes : l'activité volcanique était tellement forte que les volcans changeaient d'aspect en très peu de temps. Des phénomènes variables aussi rapidement méritaient d'être observés régulièrement depuis la Terre.

La première méthode utilisée a été celle de l'occultation de Io par un autre satellite. Ces phénomènes sont rares et il fallait profiter des opportunités. Des observations du flux et de la position des volcans ont été faites ainsi (voir ci-dessus). Une méthode récente est celle de l'observation directe d'images dans l'infrarouge de la surface de Io grâce aux progrès des techniques d'observation : détecteurs infra rouge à deux dimensions et optique adaptative. On trouvera ci-dessous une image de cette surface.



Ci-dessus l'aspect de Io le 20 octobre 1996 montrant les volcans visibles.



Io le 20 octobre 1996 (bande L') observé avec le système ADONIS/COMIC en infrarouge : le volcan Loki, actif, est très visible.

Crédit : F. Marchis/ESO

Ces volcans révèlent une émission thermique importante du satellite Io et une question se pose : Io est-il en équilibre thermique ou bien est-il en phase de refroidissement ? On verra dans un chapitre ultérieur comment répondre à cette question importante pour l'histoire du système des satellites galiléens.