

Note Technique n°1
PHEMU
v. du 9/05/2008

PRESENTATION DES SATELLITES GALILEENS DE JUPITER ET DES PHENOMENES MUTUELS

J.-E. Arlot, IMCCE/CNRS

I - INTRODUCTION

Les satellites galiléens sont des astres bien connus de tous les observateurs. Ils ont toujours eu la faveur des chercheurs et plus encore depuis qu'ils sont un but pour les sondes spatiales. Ce sont des corps rapides perturbés par le Soleil, l'aplatissement de Jupiter, Saturne et également les uns par les autres. Ces caractéristiques en font un système solaire en miniature où certains effets mal connus peuvent être mis en évidence plus rapidement. Avant de faire l'historique des recherches menées sur ces corps depuis plus de 300 ans et de faire le point sur les théories et les observations pratiquées actuellement, donnons quelques valeurs numériques sur le système jovien (dont la distance à la Terre varie de 4,2 à 6,2 U.A., soit 630 à 930 millions de km).

	Radii km	Orbital period day	Semi-major axis		Visual magnitude at opposition	Geometric albedoes (Harris, 1961)				
			AU	apparent geocen. at opposition		U	B	V	R	I
I	1840	1.76986	0.002820	2' 17"	4.8	0.19	0.56	0.92	1.12	1.15
II	1552	3.55409	0.004486	3' 40"	5.2	0.47	0.67	0.83	0.93	0.95
III	2650	7.16639	0.007155	5' 48"	4.5	0.29	0.41	0.49	0.56	0.57
IV	2420	16.75355	0.012586	10' 13"	5.5	0.14	0.21	0.26	0.30	0.31

II - HISTORIQUE

1. La découverte

Peu après la découverte des lunettes d'approche, Galilée, en observant Jupiter le 7 janvier 1610, aperçut trois petites étoiles dont le mouvement ne pouvait être expliqué par celui de la planète (a). Il comprit dès le 11 janvier que ces trois petits astres tournaient autour de Jupiter. Ce ne fut que le 13 janvier qu'il en vit quatre. Au cours de l'année 1610, il y eut d'autres observateurs de ces corps : S. Mayer (qui dit les avoir vus dès novembre 1609...), Képler, Harriot, Peiresc, ... L'identification des satellites, et donc la

détermination de leurs périodes, ne se fit qu'au début de 1611. Une observation d'éclipse (l'émergence de J2) fut faite par Galilée le 12 janvier 1610, mais il n'en comprit la signification qu'en 1612. Il fallut attendre 1643 pour une observation de l'ombre d'un des satellites sur Jupiter (par Fontana) et 1693 pour une observation de phénomènes mutuels (par Arnoldt : occultation de J2 par J3).

L'usage veut depuis longtemps que l'on désigne les satellites par les chiffres romains I, II, III et IV en commençant par celui qui est le plus proche de la planète. On les note également J1, J2, J3 et J4. Leurs noms "Io, Europe, Ganymède et Callisto" apparurent dans le "Mundus Jovialis" de S. Mayer ou Marius (1614). D'autres noms leur avaient été donnés par Hodierna : "Principharus, Victipharus, Cosmipharus et Ferdinandipharus". Galilée les appelait "Medicea Sidera" (c'est-à-dire Astres de Médicis), Hévélius : "Circulatores Jovis" ou "Jovis Comites" et Ozanam : "Gardes" ou "Satellites" (b).

2. Les recherches menées

L'étude du mouvement des satellites galiléens commença dès les premières observations. Galilée établit leur mouvement circulaire autour de Jupiter dès mars 1610. Les premières tables du mouvement des satellites (il fallait pour cela connaître leurs périodes et fixer une origine des longitudes) furent faites par Galilée en 1612 et par S. Mayer en 1614. Dans ses tables publiées en 1656, Hodierna reconnaît les latitudes des satellites et effectue des prédictions d'éclipses. En 1668, J.D. Cassini publie ses "tables du mouvement et de calcul des éclipses". Étant fondées sur un nombre important d'éclipses, ces tables furent nettement meilleures que celles qui avaient été publiées auparavant. Elles furent encore améliorées en 1693 (c'est en 1675 que Röemer met en évidence la vitesse de propagation de la lumière grâce à des observations d'éclipses du satellite J1). En 1719, Pound publie des tables comparables à celles de Cassini pour le calcul des éclipses mais abrégées. En 1749 sont publiées les tables (existant en fait depuis 1718) de Bradley faites à partir de ses propres observations. Bradley remarque l'inégalité de 437 jours de période dans le temps des éclipses des 3 premiers satellites. C'est l'époque où Maraldi signale l'action mutuelle des satellites et où l'on commence à soupçonner les excentricités et la nature des inégalités. En 1741, Wargentin publie des tables qu'il améliorera encore de 1746 à 1757 au moyen d'observations d'éclipses. Chaque satellite a alors une équation empirique et Lalande remarque, dans la Connaissance des Temps (1763), que "les inclinaisons et les noeuds des orbites éprouvent des variations qui sont encore peu connues".

C'est alors que ces tables empiriques vont laisser la place à des tables déduites de véritables théories mathématiques du mouvement des satellites. Les premières théories sont dues à Bailly (en 1766), à Lagrange (en 1766 également) et surtout à Laplace (en 1788) qui fit une théorie très complète du mouvement des satellites galiléens. Delambre (en 1791) construisit alors des tables fondées sur la théorie de Laplace et sur 6000 observations d'éclipses. Damoiseau fit une démarche identique et publia ses tables en 1836. La théorie de Laplace fut améliorée par Souillart en 1880 et servit à construire les tables publiées dans la Connaissance des Temps. En 1891, d'autres tables furent publiées par Marth. Ce fut enfin la publication des tables de Sampson en 1910 fondées sur une théorie nouvelle du mouvement des satellites qu'il ne publiera qu'en 1921. Cette théorie a été revitalisée par Lieske en 1977 et ajustée par Arlot en 1982 sur 8856 observations photographiques bien plus précises que les observations d'éclipses. Ces derniers travaux ont la base des éphémérides publiées par la "Connaissance des Temps" jusqu'en 2005. Une intégration numérique incluant tous les effets influençant le mouvement des satellites galiléens a été construite par Lainey en 2004 et a été ajustée sur des observations réalisées entre 1891 et 2003. Cette intégration numérique est maintenant la base des éphémérides de l'IMCCE et est utilisée pour calculer les prédictions des phénomènes par Jupiter ainsi que des phénomènes mutuels.

Pourquoi une telle densité de travaux, souvent de grande envergure, sur le problème des éphémérides des satellites galiléens ? Dès les premières observations du système de Jupiter, l'importance de la connaissance du mouvement des satellites n'échappa à personne; on était en présence d'une horloge beaucoup plus fiable que toutes celles existant alors. Les éclipses étaient très facilement observables. Citons Lalande qui écrivait en 1792 dans son "Astronomie" : "ils (les satellites galiléens) servent continuellement aux astronomes pour déterminer les différences de longitude entre les différents pays de la Terre (...); il importait donc beaucoup d'avoir une théorie sûre et exacte de leurs mouvements..." Cassini, en 1688, publiait une méthode de détermination des longitudes des lieux par l'observation des

satellites de Jupiter. La publication des prédictions d'éclipses était donc de première importance.

De nos jours, l'étude du mouvement des satellites galiléens est motivée par la nécessité d'avoir des positions très précises lors des missions des sondes spatiales Pioneer, Voyager et Galileo vers Jupiter que ce soit pour la préparation des missions ou pour l'exploitation des données. Mais la nature du système jovien (rapidité des satellites, complexité du mouvement) reste le champ d'étude privilégié où l'on peut espérer mettre en évidence des effets gravitationnels faibles, ou même des effets non gravitationnels inconnus à l'heure actuelle, et étudier des problèmes de résonance.

On voit ainsi l'intérêt de la publication de tables de positions ou d'éphémérides. Notons à ce propos que l'usage des tables des satellites galiléens a toujours été malaisé : la rapidité des mouvements empêche la fabrication d'éphémérides facilement interpolables. On a donc publié jusqu'à ces dernières années des tables d'éléments des orbites servant à calculer des positions avec une précision souvent en deçà des possibilités de la théorie, puis, à partir de 1980, la Connaissance des Temps a publié des tables de coefficients de Tchélytcheff permettant d'obtenir les positions avec une précision meilleure. Ensuite, une représentation des positions sous forme de fonctions mixtes dépendant directement du temps a été utilisée et a permis une réduction sensible du volume de données à publier. Aujourd'hui, les coefficients sont publiés sur CD Rom et la Connaissance des temps donnent les positions près des élongations pour tester les éphémérides programmées. Notons que des "configurations" (ou représentation graphique du mouvement) donnent des positions avec une faible précision, mais suffisante dans bien des cas pour la préparation des observations et l'identification des satellites. Les éphémérides diffusées sur Internet, offrent toutes les possibilités d'éphémérides.

La plupart des théories ont été autrefois principalement ajustées sur des observations d'éclipses : celles-ci ne peuvent être faites sans erreurs systématiques, aussi, il importe désormais de multiplier les types d'observations effectuées.

(a) on peut lire à ce propos le "Sidereus Nuncius" de Galilée paru en 1610 dans sa traduction anglaise récente "The Sidereal Messenger" (chez Dansons of Pall Mall, Londres).

(b) satellites, du latin satelles, satellitis : escorte

III - LES DIFFERENTS TYPES D'OBSERVATION DES SATELLITES GALILEENS

L'observation astrométrique d'un corps céleste consiste à mesurer, à un instant donné, une quantité physique. On distingue deux catégories d'observations qui se caractérisent ainsi :

- l'observation ordinaire qui consiste en la mesure d'une quantité physique, par exemple une distance angulaire ou un flux de lumière à un instant choisi par l'observateur (par rapport à un étalon fiable),
- l'observation d'un "phénomène" où l'on détermine l'instant pour lequel une quantité physique a une valeur remarquable (en général un maximum ou un minimum pour une quantité variable dans le temps).

On remarque que ces deux types d'observation nécessitent une horloge pour le rattachement à une origine des temps. Cependant, l'observation simple nécessite en plus un matériel relativement sophistiqué : il faut mesurer une quantité physique par rapport à un étalon fixe dans le temps. Une observation de position absolue est de ce type. L'observation d'un phénomène ne demande que d'apprécier l'instant "où il se passe quelque chose" et de faire une mesure relative (notons qu'il existe certaines observations combinant ces deux catégories).

1. Les observations de position

a) Les observations visuelles

L'intérêt des observations de position est de n'avoir point à attendre un éventuel phénomène, mais de choisir l'instant de l'observation. Ainsi, on n'est plus limité pour le nombre d'observations possibles, et

moins sujet aux aléas de la météorologie comme c'est le cas pour les phénomènes. Dès que l'instrumentation l'a permis, des mesures visuelles de distances et d'angles de position ont été effectuées à l'aide de micromètres. L'observatoire où de telles mesures visuelles de distances et d'angles de position ont été faites avec une grande précision est l'Observatoire du Cap (Afrique du Sud). Là, on utilisait un instrument appelé "héliomètre" bien adapté à ce type d'observations. Ce type d'observations a été supplanté au début du XX^{ème} siècle par les observations photographiques dès que ces dernières sont devenues précises : elles avaient, de plus, l'avantage de permettre de conserver les observations.

b) Les observations photographiques

La photographie astronomique de position fut véritablement lancée lorsque les frères Henry proposèrent un réfracteur dit "équatorial photographique de la Carte du Ciel" de 33cm d'ouverture et de 3,43m de distance focale. Les mesures des plaques (sur une machine appelée "macromicromètre") avaient une précision qui dépassait celle des pointés effectués au micromètre sur un équatorial ordinaire. La réduction des clichés faisait appel aux constantes instrumentales déduites des positions des étoiles bien connues se trouvant sur le cliché lui-même. L'observation photographique des satellites galiléens débuta dans les années 1880-1890. Notons que seuls les instruments à courte focale furent envisagés à l'origine pour de telles observations : des instruments à focale plus longue (6-7m) ne furent utilisés qu'à partir de 1950. Dans les années 1920-1930, les travaux théoriques furent pratiquement interrompus et donc également les observations de positions. Les théories et les tables de positions paraissaient difficiles à améliorer et les astronomes se tournaient plus volontiers vers l'astrophysique. Ce n'est que dans les années 1960 que les travaux reprirent : l'arrivée des calculateurs électroniques et la perspective des missions spatiales vers Jupiter en sont la cause. Les observations photographiques reprirent, mais à longue focale désormais, les nouvelles émulsions photographiques le permettant.

c) Les observations CCD

L'arrivée des récepteurs CCD à transfert de charges a rendu obsolète l'utilisation des plaques photographiques grâce à leur facilité d'utilisation, à la numérisation des images et à la sensibilité accrue de ce récepteur comparé à une émulsion photographique. Le problème nouveau venait de la petitesse du récepteur et de sa surface utile qui ne fournissait qu'un champ réduit. Ce problème a été résolu grâce à l'arrivée de catalogues d'étoiles extrêmement denses permettant la calibration d'un champ même réduit. Cette calibration possible sur chaque image réalisée a aussi permis l'utilisation de n'importe quel instrument, lunette ou télescope, la stabilité du champ au cours d'une nuit n'étant plus nécessaire. Dans le cas des satellites galiléens, le seul problème à résoudre est leur trop forte brillance rendant difficile la présence simultanée des satellites et d'étoiles de calibration dans le champ.

2. Les observations de phénomènes

a) Les phénomènes dits "classiques"

Les satellites galiléens présentent des phénomènes particuliers dus aux positions que prennent le Soleil, Jupiter et la Terre : les éclipses (lorsqu'un satellite passe dans l'ombre de Jupiter); les occultations (lorsqu'un satellite passe derrière Jupiter par rapport à la Terre); les passages (lorsqu'un satellite passe devant Jupiter par rapport à la Terre) et les passages d'ombre (lorsque l'ombre d'un satellite passe sur le disque de Jupiter). Les phénomènes les plus célèbres sont les éclipses car ils sont les plus faciles à observer : il s'agit de l'extinction ou de l'apparition d'un satellite isolé. Les autres phénomènes nécessitent l'observation simultanée de Jupiter ce qui dégrade beaucoup le rapport signal sur bruit. Tous ces phénomènes ont été observés visuellement pendant des dizaines d'années et le grand nombre d'éclipses observées a constitué la base des premières éphémérides. Dès la fin du XIX^{ème} siècle, les techniques d'observation des éclipses se sont améliorées et les premières courbes photométriques ont permis d'améliorer la précision de la datation de ces phénomènes. Ensuite, les enregistreurs photoélectriques sont apparus mais, malgré le progrès qu'ils apportaient, ils ont été très peu utilisés : ils arrivèrent lorsque cessa l'intérêt des astronomes pour ce type de travaux et n'ont pas encore été repris pour des raisons de précision que nous verrons plus loin. Une amélioration de la réduction est cependant envisageable et une reprise des observations serait alors possible.

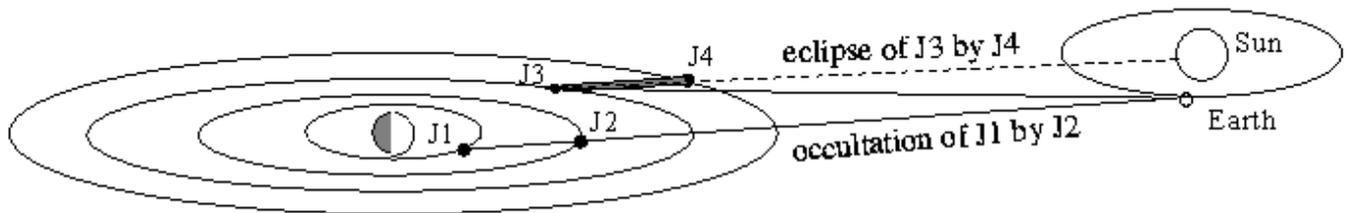


Fig. 1 – Definition of the mutual events.

b) Les phénomènes mutuels

Ces phénomènes sont dus aux positions relatives que prennent le Soleil, la Terre et deux satellites (voir plus loin). Ces phénomènes, contrairement aux phénomènes "classiques" qui ont lieu en permanence, ne se produisent que tous les six ans. L'absence d'atmosphère sur les satellites galiléens 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.

Avant d'étudier plus précisément les phénomènes mutuels donnons des valeurs concernant la précision des différents types d'observation que nous venons d'évoquer :

PRECISION ASTROMETRIQUE DES OBSERVATIONS DES SATELLITES GALILEENS

Observations	Type	Instrument	Erreur individuelle (") km géocentrique	
Eclipses	visuelles	d<40cm	0,250	1000
Eclipses	photométriques visuelles	d<40cm	0,200	800
Astrographe	photographiques	f=3,4m d<40cm	0,190	760
Eclipses	photométriques photoél. ou CCD	d<60cm	0,150	600
Astrographe	photographiques	f=5,2m d<40cm	0,130	520
Héliomètre	visuelles	f=2,5m d<40cm	0,120	500
Astrographe	photographiques	f=6m d<40cm	0,100	400
Astrographe	photographiques	f=10m d<60cm	0,060	240
Astrographe	photographiques renumérisées	f=10m d<60cm	0,040	160
Phén. mutuels	visuelles en site urbain	d<40cm	0,055	220
Appulses	images numériques	f=20m d=1m	0,030	120
Phén. mutuels	images numériques en site urbain	f=20m d=1m	0,015	60
Phén. mutuels	photométrie CCD en site urbain	d=40cm	0,012	48
Phén. mutuels	photométrie CCD en site moyen	d=80cm	0,010	40
Phén. mutuels	photométrie CCD en site exceptionnel	d=1m	0,002	8

On voit clairement dans ce tableau la supériorité des observations de phénomènes mutuels (les phénomènes classiques restent très imprécis du fait de l'atmosphère de Jupiter) : on peut ainsi espérer mesurer des effets inconnus actuellement, effets non-gravitationnels et accélération éventuelle des satellites.

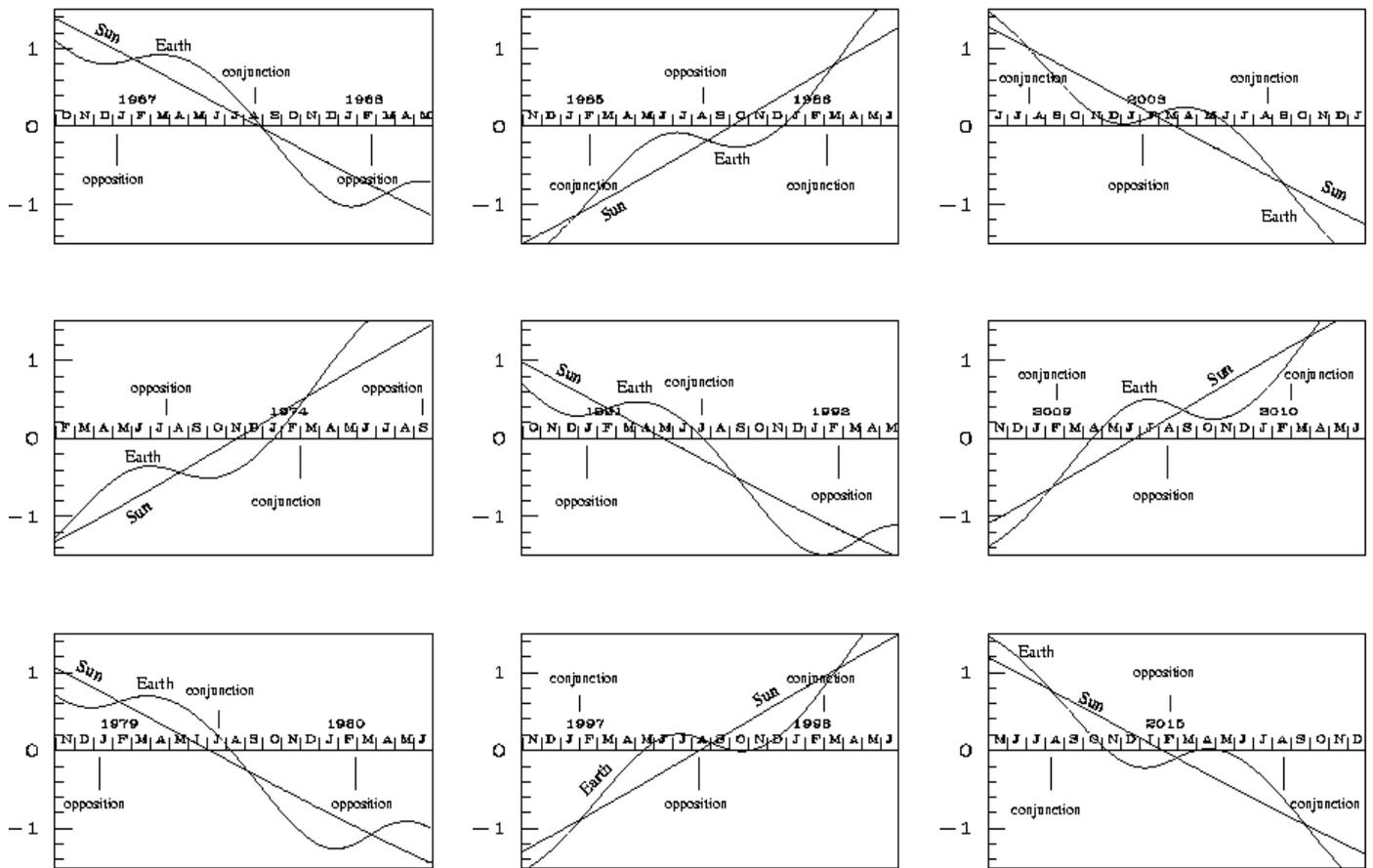


Fig. n°2: Déclinaisons jovicentriques du Soleil et de la Terre (en degrés)

IV - LA PREDICTION DES PHENOMENES MUTUELS

La figure 1 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'occulent 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. La figure 2 donne les valeurs de ces déclinaisons pour de nombreuses périodes. Les phénomènes sont possibles tant que ces déclinaisons restent proches de zéro. Bien entendu, il faut que Jupiter et le Soleil soient en opposition 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). Les valeurs de ces déclinaisons pour les périodes favorables aux phénomènes mutuels sont données ci-après.

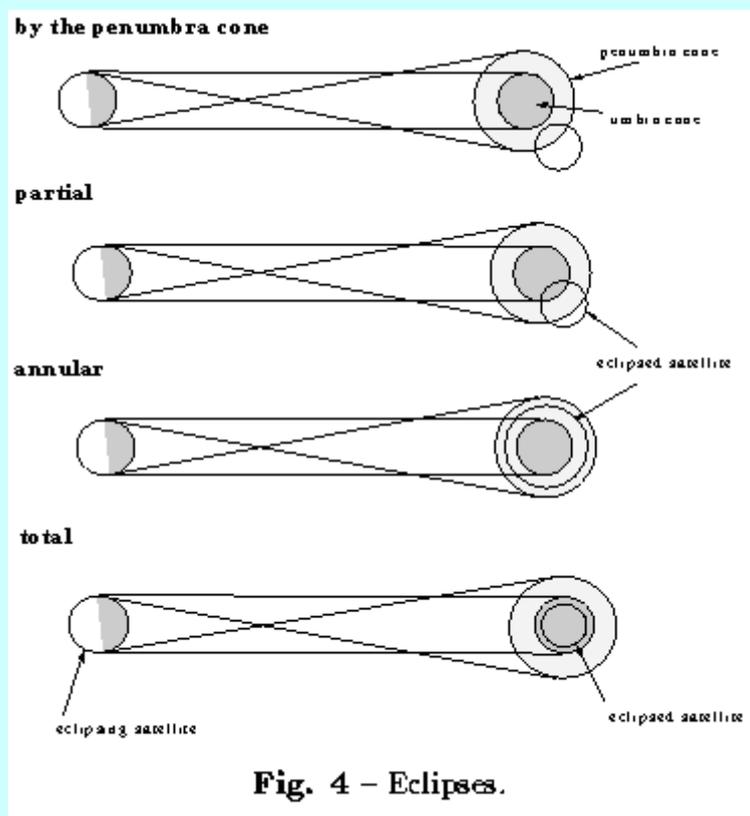
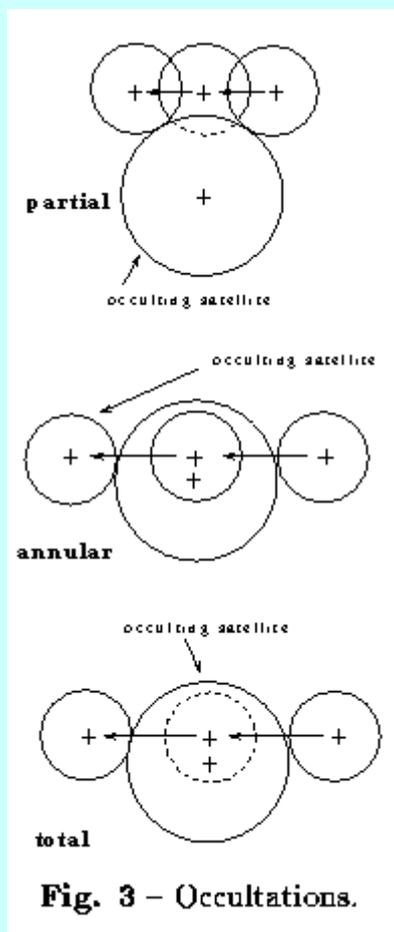
Period	Declination of Jupiter
1967-1968	+20° to +10°
1973-1974	-22° to -10°
1979-1980	+12° to +8°
1985-1986	-22° to -14°
1990-1991	+18° to +20°
1997-1998	-18° to -4°
2002-2003	+23° to +18°
2009-2010	-20° to -10°
2014-2015	+23° to +15°

On détermine qu'il y a phénomène lorsque la distance apparente entre deux satellites est inférieure à la somme des rayons apparents (vu de la Terre pour les occultations et vu du Soleil (c) 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.

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 : 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 de la théorie.

Nous ne dirons rien ici des différentes techniques d'observation, du dépouillement ou de l'exploitation des observations qui feront l'objet d'autres notes techniques.

(c) En fait, une éclipse est une occultation du Soleil par le satellite éclipsant, vu du satellite éclipsé. La vitesse finie de la lumière doit être prise en compte avec soin pour la prédiction du phénomène.



VI - LA CAMPAGNE D' 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 XIXème 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.

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 nous avons rassemblé une vingtaine de courbes de lumière observées.

En 1985, la période était favorable et nous avons lancé une campagne d'observations internationale qui a rassemblé des observateurs de France (Paris, Meudon, Grasse, Nice, Bordeaux, Pic-du-Midi, Observatoire de Haute-Provence), d'Italie (Teramo, Catania), d'Espagne (Granada), de Suisse (Jungfrau), du Brésil (Brasopolis) et du Chili (La Silla). Des astronomes amateurs de France, de Belgique, des Pays-Bas, d'Espagne et d'Italie ont également participé à cette campagne en fournissant souvent des données de qualité. Environ 160 courbes de lumière furent obtenues, représentant l'observation de près de 70 phénomènes.

Toutes ces observations ont été obtenues principalement à l'aide de photomètres photoélectriques à photomultiplicateur mais aussi à l'aide de caméra vidéo (SIT Vidicon), de photomètres à photodiodes ou encore visuellement ou photographiquement.

En 1991, la période était moins favorable (cf. figure n°2) mais la déclinaison de Jupiter était positive, fait favorable aux sites d'observation de l'hémisphère Nord, bien équipé. De nouveaux sites aux USA, en Inde (Kavalur), en Roumanie (Bucarest, Cluj-Napoca, Timisoara), Allemagne, Canada (Alberta), Japon, Yougoslavie, Bulgarie, Australie se joignirent à la campagne d'observation. 371 courbes de lumière correspondant à 111 phénomènes furent obtenues depuis 56 sites. La plupart des observations furent réalisées à l'aide de photomètres photoélectriques, certaines avec des caméras vidéo (SIT Vidicon), avec des photomètres à photodiodes ou même visuellement ou photographiquement.

En 1997, la période fut favorable (cf. figure n°2) car l'opposition de Jupiter eut lieu au moment du maximum de phénomènes. Malheureusement l'hémisphère Nord fut désavantagé du fait de la déclinaison négative de Jupiter.

En 2003, tout est favorable: déclinaison de Jupiter positive et maximum de phénomènes au moment de l'opposition de Jupiter et 361 courbes de lumière de 116 phénomènes ont été obtenues depuis 42 sites d'observation.

En 2009, la déclinaison de Jupiter n'est pas favorable à l'hémisphère nord où se trouvent beaucoup d'observateurs mais de nombreuses observations peuvent cependant être faites, même lorsque Jupiter est bas sur l'horizon.

VII - CONCLUSION

Ces séries d'observation présentent non seulement un intérêt pour l'étude dynamique du système jovien mais nous donnent aussi une expérience pour effectuer les observations futures : des erreurs pourront être évitées et des améliorations peuvent être apportées pour augmenter la précision des données. Nous reviendrons dans les notes techniques suivantes sur les techniques et méthodes d'observation les mieux appropriées, mais on peut déjà signaler les principales remarques déduites des observations passées :

- on ne dira jamais assez que la datation de chaque point de la courbe de lumière dans une échelle de temps rapportée à UTC est indispensable afin de rattacher les observations entre elles. Toutes les précautions doivent être prises pour être sûr de l'échelle de temps : vérification avant et après chaque

observation sur une horloge fiable. UTC est diffusé par divers émetteurs (par exemple codé sur France-Inter) et on peut l'obtenir (+1 ou 2 heures selon les dates) par l'horloge parlante. La précision avec laquelle chaque point de la courbe de lumière est daté peut n'être que de 0.1 à 0.5 seconde car la vitesse relative des satellites galiléens est de l'ordre de 10km/s.;

- la calibration en magnitude absolue du signal n'est pas indispensable. Il s'agit d'une observation en photométrie différentielle : on cherche à mesurer la chute d'éclat entre les instants hors phénomène et les instants des différentes phases du phénomène. Ainsi, les observations peuvent être faites même lorsque les conditions ne sont pas photométriques : forte absorption, faible hauteur au-dessus de l'horizon, ... Une calibration à l'aide d'une étoile de type solaire proche présente néanmoins de l'intérêt. Dans le cas où la transparence du ciel varie, il est important d'enregistrer un objet de référence (étoile ou autre satellite). Pour cela, l'expérience nous a montré le grand intérêt des photomètres à plusieurs voies spatiales et des récepteurs bidimensionnels comme les CCD. Attention cependant à veiller à la linéarité du gain du récepteur et à éviter toute saturation.

En conclusion, ne ratez pas ces phénomènes rares, spectaculaires et faciles à observer. Les résultats scientifiques que l'on en attend justifient l'organisation d'une campagne internationale coordonnée.