

# Galilée et les satellites de Jupiter au service de la cartographie au XVII<sup>e</sup> siècle

par **Michel TOULMONDE**

**Observatoire de Paris (SYRTE)** et **Université d'Evry** (michel.toulmonde@univ-evry.fr)

(Fleurance, 14 août 2009)

## Résumé

La découverte des satellites de Jupiter par Galilée en 1610 (voici bientôt 400 ans) a bouleversé la description du monde céleste d'alors et a permis de cartographier la Terre. Mais la détermination précise des « phénomènes » de ces satellites ne sera pas aussi simple à réaliser qu'on l'avait d'abord envisagé ; en particulier, la méthode sera impraticable en mer et ne pourra être utilisée que sur terre, rendant néanmoins de très grands services à la cartographie au XVII<sup>e</sup> siècle.

## 1- La découverte des satellites (Galilée, 1610)

En automne 1609, GALILEE (1564-1642) dispose d'une lunette de grossissement modeste (x 3 seulement) qu'il a perfectionnée à partir d'un modèle venu de Hollande. Il polit alors des lentilles afin d'améliorer cette lunette, atteignant un grossissement de 30. Pour la première fois, l'Homme observe le ciel avec un « autre oeil » plus puissant : Galilée découvre ainsi le relief de la Lune et la structure stellaire de la Voie lactée.

Le soir du 7 janvier 1610, peu après la nuit tombée sur Padoue (à 35 km à l'Ouest de Venise), il observe vers l'Est : la pleine Lune éclaire l'horizon mais Jupiter est bien visible à une distance angulaire de 10° environ, dans la constellation du Taureau.

Dans le champ de sa lunette, Galilée constate une disposition surprenante : le disque de Jupiter est aligné avec 3 étoiles, deux à gauche et une à droite (il pense alors que ce sont des étoiles du fond du ciel) et prend soin de noter cette configuration [ \* \* O \* ]. Le lendemain 8 janvier, Jupiter est encore aligné avec les 3 étoiles, mais est placé à leur gauche [ O \* \* \* ]. Cette disposition est pour le moins gênante dans son esprit car Galilée sait que, depuis trois mois, Jupiter a un mouvement rétrograde et se déplace d'Est en Ouest, donc de gauche à droite *devant* les étoiles. Comment se fait-il que ce soir-là, Jupiter soit situé à gauche des 3 étoiles, comme l'y aurait conduit un mouvement direct ? La lunette de Galilée possède un oculaire divergent qui n'inverse pas l'image, au contraire de la lunette astronomique que KEPLER (1571-1630) proposera dès 1611 mais qui ne sera réalisée que vers 1650.

Galilée décide de poursuivre cette recherche. Le 9 janvier, le ciel est couvert mais le 10, Jupiter est visible à droite de seulement deux étoiles [ \* \* O ], de même que le 11 janvier et il comprend enfin ses observations : les 3 points brillants proches de Jupiter dans le champ de la lunette ne sont pas des étoiles du fond du ciel mais **des objets tournant autour de Jupiter**. Le 13 il en voit quatre et Galilée poursuit ses méticuleuses observations pendant 54 jours avant de publier son *Sidereus nuncius (le Messager céleste)* le 12 mars 1610. Il honore son futur protecteur, le grand-duc de Toscane Cosme II de Médicis, à Florence, en nommant astres *médicéens* les compagnons de Jupiter (Kepler nommera ces astres **satellites** dans sa *Narratio de observatis a se quatuor Jovis satellitibus erronibus* au printemps 1611, on les appelle aujourd'hui satellites *galiléens*).

Galilée vient donc de découvrir que des astres tournent autour d'un centre qui n'est pas la Terre ! Or, le modèle géocentrique impose à tout astre de tourner autour de notre planète... Et si COPERNIC (1473-1543) avait raison ?

Au même moment, l'Allemand Simon MARIUS ou MAYER (1570-1625) observe à Ansbach, près de Nuremberg. Il écrit dans son livre *Mondus Jovialis (le Monde de Jupiter)* publié en 1614 : « *ma première observation a été faite le 29 décembre 1609 vers 5 heures du soir. Je vis 3 corps à l'ouest [à droite] de Jupiter, à peu près alignés* ». Or à Nuremberg, en pays protestant, le calendrier julien est encore en usage, en retard de 10 jours sur le calendrier grégorien employé en Italie. En ajoutant 10 jours au 29 décembre 1609 (julien), on obtient la date du 8 janvier 1610 (grégorien) : Simon Marius a bien observé la même disposition des satellites que Galilée le 8 au soir, mais l'Italien a un jour d'avance puisque sa première observation date du 7 janvier !

### Les périodes des satellites

En été 1610, tout en poursuivant l'observation des satellites de Jupiter, Galilée découvre que les **phases de la planète Vénus** ne sont pas conformes à celles prévues dans un modèle géocentrique, mais respectent les prévisions d'un modèle héliocentrique. Il observe également **Saturne** « *en triple forme* » mais le trop faible pouvoir séparateur de sa lunette (de 2 cm de diamètre) ne lui permet pas d'en voir davantage.

Pendant l'hiver 1610-1611, il entreprend de déterminer les périodes de révolution des 4 satellites et dès avril 1611, il en connaît les valeurs qu'il publiera au tout début de son livre *Discours sur les corps flottants* en avril 1612 : **Io** tourne en 42 h 1/2 (valeur réelle 42 h 29 m), **Europe** en 85 h 1/3 (85 h 14 m), **Ganymède** en 172 h (171 h 43 m = 7,2 j) et **Callisto** en 402 h (400 h 32 m = 16,7 j). En fait, Galilée désigne ces satellites par les numéros I à IV, les noms actuels seront donnés par Simon Mayer en 1614.

### Intérêt de l'observation

Dès 1610, Galilée a compris que ces satellites constituent une véritable **horloge céleste**, visible de tout point de la Terre pour lequel Jupiter est visible, au-dessus de l'horizon, le Soleil étant couché. Cette horloge peut donc servir de **garde-temps universel** pour tous les marins afin de déterminer la **longitude en mer**. Connaissant les périodes des satellites, Galilée établit les premières tables de leurs mouvements, basées sur la reproduction de mouvements circulaires uniformes autour de Jupiter. Il contacte alors, mais sans succès, la Cour d'Espagne pour proposer son aide dans la détermination des longitudes en mer.

## **2- Les tables des mouvements**

Les premières tables de Galilée font apparaître peu à peu des écarts sans qu'il y trouve remède. En France, PEIRESC (1580-1637) et GASSENDI (1592-1655) font des observations systématiques mais sans fournir de tables fiables. En 1614, les observations ne confirment pas non plus les prévisions des tables que Mayer publie dans son livre *Mondus Jovialis*. Si bien que jusqu'en 1660, les longitudes terrestres seront (mal) déterminées à partir de la seule horloge céleste supposée fiable à l'époque, celle donnée par les éclipses de Lune. Mais hélas, le mouvement de la Lune est encore bien mal connu et ces éclipses ne sont prévisibles qu'à 15 ou 20 minutes de temps près !

En 1665, l'Italien Gian-Domenico CASSINI (1625-1712), professeur d'astronomie à Bologne, utilise des objectifs de grande qualité fabriqués par l'opticien italien CAMPANI. Cassini observe alors des détails sur Jupiter et découvre la désormais célèbre **Tache rouge**, qui prouve la rotation de Jupiter en 10 heures environ.

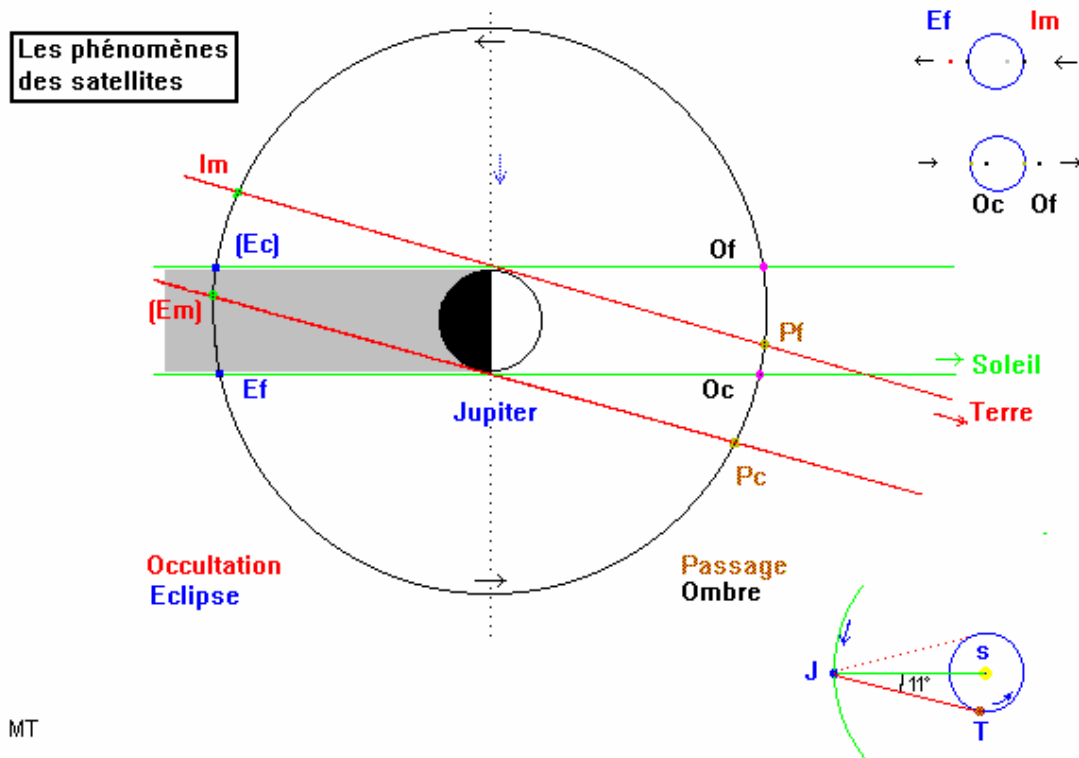
Cassini publie en 1668 ses tables *Ephemerides Bononienses Mediceorum Syderum* (*Ephémérides bolognaises des astres médicéens*). Celles-ci se présentent sous la forme d'une suite de doubles pages, avec à gauche les schémas prévus des configurations des 4 satellites (en image inversée, comme dans une lunette), jour par jour à 7 heures du soir (à Bologne) et à droite des informations horaires détaillées sur les phénomènes des satellites. Les modèles actuels des mouvements de ces satellites montrent que les instants donnés par Cassini sont corrects à 10 minutes près environ.

### 3- Les phénomènes des satellites

Le lent ballet des satellites engendre des « phénomènes » : **éclipse** et **occultation** quand ils passent « derrière » Jupiter, **passage** et **ombre** quand ils passent « devant ». Les éclipses se produisent quand le satellite passe dans l'ombre de Jupiter, l'occultation est causée par le passage du satellite derrière Jupiter, il est alors caché depuis la Terre. A l'inverse, le passage se produit quand le satellite passe devant le globe de Jupiter, projetant éventuellement son ombre, visible sur le disque.

Concernant l'éclipse, selon les positions relatives de Jupiter et de la Terre autour du Soleil, on peut en voir soit le début soit la fin. L'éclipse commence quand, vu de la Terre, le satellite disparaît un peu à droite de Jupiter. Elle prend fin quand vu de la Terre, le satellite apparaît « sortant du noir » bien à gauche de Jupiter.

C'est l'observation de ces phénomènes, et surtout celle de leurs instants, qui sert ainsi d'horloge céleste universelle, à la base de la méthode de détermination des longitudes.



### 4- La détermination des longitudes

#### Principe de la méthode

Les instants de tous les phénomènes étant *calculés* en temps vrai (temps solaire) du lieu de référence (l'Observatoire de Paris par exemple), on *observe* en un autre lieu l'un de ces phénomènes, repéré en temps vrai *local*. La différence des deux instants (observé moins calculé ou o-c) donne l'écart entre les deux échelles de temps vrai, c'est-à-dire l'écart en longitude entre ces deux lieux, à raison de 4 minutes par degré, vitesse angulaire de la rotation de la Terre.

Simple dans son principe, cette méthode souffre hélas de nombreuses difficultés de mise en œuvre.

### Difficultés de la méthode des longitudes (par les éclipses des satellites de Jupiter)

a)- faible *fréquence* du phénomène : la période orbitale de Io vaut 1,769 j (~ 42,5 h). Il se produit donc 206 révolutions par an, mais la présence du Soleil empêche d'observer vers la conjonction de Jupiter (avec la disposition T -- S -- J). Il reste donc seulement 150 éclipses de Io utilisables par an.

b)- *heure* du phénomène : il est évidemment nécessaire que Jupiter soit visible dans le ciel du lieu dont on veut déterminer la longitude au moment de l'éclipse attendue, et que le Soleil soit couché (de nuit). Cette double contrainte diminue fortement le nombre d'éclipses « utiles ». Selon les années, on peut espérer observer une éclipse sur trois (si la déclinaison de Jupiter vaut +23°) ou une sur dix seulement si elle vaut -23°. Bien que peu fréquentes, ces éclipses restent toutefois plus nombreuses qu'une seule éclipse totale de Lune par an en moyenne en un lieu donné !

c)- les *conditions météorologiques* réduisent hélas les possibilités d'observation car parfois, un petit nuage au mauvais moment ne permet pas de déterminer l'instant de l'éclipse !

d)- toutes ces conditions doivent être remplies simultanément dans les *deux lieux* dont on veut connaître l'écart de longitude.

e)- mais la plus grande difficulté réside dans la *précision* de l'observation.

Avant 1676, les tables des mouvements ne tenaient pas compte du « *retardement* » de la lumière, phénomène physique découvert par le Danois Olaf ROEMER (1644-1710) en étudiant les différents instants observés de ces éclipses qui s'écartaient parfois d'une dizaine de minutes des prévisions (en plus ou en moins). En effet, à cause de la finitude de la vitesse de la lumière, les prévisions (calculées) n'étaient correctes au mieux qu'à 8 minutes près (durée du parcours de la lumière du Soleil à la Terre), cette durée étant d'ailleurs évaluée à 11 minutes par Roemer.

On parle ici de l'instant (au singulier) de l'éclipse. En réalité, ce phénomène n'est pas instantané et dure plus de 3 minutes pour Io. Pendant cette durée, l'éclat du satellite varie de 0 à 1 (fin d'éclipse ou sortie de l'ombre de Jupiter). La variation d'éclat du satellite, proportionnelle à la fraction d'aire émergée de l'ombre, n'est donc pas proportionnelle au temps : 20 secondes après le début de la sortie de l'ombre, la variation d'éclat ne représente encore que 5 % de l'éclat total du satellite.

On a bien là une difficulté « subjective » de cette méthode : après seulement une vingtaine de secondes, tel observateur verra le minuscule petit point émerger du ciel noir à côté de Jupiter, là où il n'y a « rien à voir » avant la fin de l'éclipse, alors qu'un autre ne verra encore rien. La précision de la méthode dépend donc très fortement de l'appréciation visuelle personnelle du phénomène. Pendant près de 30 secondes, on ne peut pas affirmer qu'il a eu lieu ou non. Mais pendant 30 secondes, la Terre tourne de 7,5' (un huitième de degré) : cela

correspond à l'incertitude sur la longitude pour chacun des deux lieux (soit environ 10 km en longitude à la latitude de 45°).

En 1693, dans son « *Instruction générale pour les Observations Géographiques & Astronomiques à faire dans les Voyages* », J.-D. Cassini écrivait, à propos des fins d'éclipse : « *Les émersions demandent une attention particulière parce qu'on ne voit rien quand on les attend* ».

### Les lunettes utilisées

A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, ces observations astrométriques s'effectuent au moyen de longues lunettes de 14 ou 18 pieds (4,5 m à 5,8 m), munies d'oculaires convergents de 6 cm de focale environ, avec un grossissement de l'ordre de 100 et un champ de 0,5° (égal au diamètre angulaire de la Lune). Le diamètre apparent de Jupiter varie de 31" à 46" et celui de Io est 40 fois plus petit soit environ 1".

La « fin » d'une éclipse est déterminée en comparant l'éclat des satellites avec les autres satellites du champ de la lunette. L'habitude de l'observateur joue donc un rôle majeur.

### Usage en mer

Pour observer un début ou une fin d'éclipse d'un satellite, il faut suivre très attentivement Jupiter dans le champ de la lunette. Mais l'instant attendu n'étant prévu qu'à une dizaine de minutes près, l'œil de l'observateur ne doit quasiment pas quitter l'oculaire pendant cette durée d'incertitude, puis ensuite, être capable de juger pendant une minute si effectivement le phénomène se produit. Une telle démarche rendait évidemment la méthode impraticable en mer à cause des mouvements du navire. C'est la raison pour laquelle seule la cartographie terrestre a pu en tirer parti, comme on le verra plus loin.

## **5- Un exemple de mise en œuvre**

(ce paragraphe peut être « sauté » par ceux qui n'aiment pas les calculs !)

Les observations de M. VARIN à Dieppe (1681) figurent dans les *Mémoires de l'Académie royale des Sciences* (tome 7-2, p. 446). Elles conduisent à la longitude de Dieppe en 5 étapes de calculs :

### 1- détermination du temps sidéral local (par l'étoile)

$\sin h^* = \sin \delta^* \cdot \sin \varphi + \cos \delta^* \cdot \cos \varphi \cdot \cos AH^*$ . Pour Dieppe :  $\varphi = 49^{\circ}56'$  (connue par la *Polaire*)

Étoile *Pollux* (catalogue de RICCIOLI) :  $\alpha^* = 7h 26m$  ;  $\delta^* = 28^{\circ}45'$

$h^* = 58^{\circ}52'$  (observée) d'où  $AH^* = -30^{\circ}10' = -2h 01m$  (vers l'Est) et  $TS = AH^* + \alpha^* = 5h 25m$

### 2- détermination de l'heure vraie locale (par le Soleil)

Les *Ephémérides* de MEZAVAQUES (1674) donnent l'ascension droite du Soleil pour le 10 nov. à 2h.

$\alpha_0 = 15h 03m$ . Or  $TS = AH_0 + \alpha_0$  d'où  $AH_0 = TS - \alpha_0 = 2h 22m$  (après minuit)

### 3- correction d'horloge (temps moyen local)

2h 17m 54s # 2h 18m (horloge) = 2h 22m (temps solaire vrai)

donc l'horloge retarde de 4 min sur le temps vrai local

### 4- Immersion de Io : observée à Dieppe à 4h 16m (horloge) donc à 4h 20m (temps vrai de Dieppe)

### 5- Ecart de longitude avec Paris

Immersion observée à Paris à 4h 25m (temps vrai local de Paris)

donc 5 min plus tard qu'à Dieppe (avec deux échelles de temps différentes)

Conclusion : Dieppe est située à 5 min à l'Ouest de Paris [réel : 5m 05s = 1,27°]

## **6- Applications à la cartographie**

La méthode de détermination des longitudes terrestres par les satellites de Jupiter va être mise à profit afin de « rectifier » les côtes du royaume de la France. Plusieurs missions d'observations de l'Académie royale des sciences seront menées dès la fin de 1676 jusqu'en 1681. Cassini reste à Paris (ou sur le méridien de Paris), tandis que PICARD (1620-1682) et LA HIRE (1640-1718) arpentent les littoraux, de la Méditerranée à l'Atlantique et à la Manche. Par comparaison avec la carte de Nicolas SANSON (1600-1657) publiée 50 ans plus tôt en 1634, les écarts sont importants, tant en longitude qu'en latitude, notamment pour Lyon et Marseille. Cette carte dite **de l'Académie** sera présentée à Louis XIV en 1682. FONTENELLE (1657-1757), secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences de 1699 à 1740, écrira que « *cette carte enrichissait la géographie et assurait la navigation* » (la rendait plus sûre).

En cartographie, la précision de la détermination des longitudes évoluera assez rapidement. Dès la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, les premières cartes sont établies à partir des **éclipses totales de Lune** fournissant la longitude à une **centaine** de kilomètres près environ. Ces cartes sont corrigées par la méthode des **satellites de Jupiter**, utilisée dès la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, apportant une précision de l'ordre de la **dizaine** de kilomètres. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, la **géodésie par triangulation** permettra d'atteindre une précision inférieure à **un** kilomètre. Les satellites de Jupiter ont donc joué un rôle moteur dans cette évolution du moins sur terre.

A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, le problème des longitudes était résolu à terre, mais pas en mer. Ce sera pour le siècle suivant un important défi à relever, motivé par la très forte prime anglaise du *Longitude Act* (1714) attribuée par le *Board of Longitude* à quiconque obtiendra une précision de un demi-degré sur la longitude après 40 jours de navigation (durée moyenne d'un trajet aux Antilles). Malgré la rivalité entre des astronomes (par la méthode des distances lunaires) et des horlogers (par la mise au point d'un garde-temps fiable) l'Anglais John HARRISON (1693-1776) finira par triompher en 1762 avec son **chronomètre de marine** après 35 années de laborieuses recherches.

Au XX<sup>e</sup> siècle, les signaux horaires radioélectriques, la photographie aérienne puis les satellites artificiels permettront d'obtenir petit à petit une meilleure précision, de l'ordre de quelques mètres aujourd'hui avec le GPS (*Global Positioning System*). Le système européen *Galileo* devrait faire mieux encore, rendant ainsi un hommage mérité au grand savant.

## Bibliographie et webographie

Les *Mémoires de l'Académie royale des Sciences* sont consultables sur le site de la BnF : [//gallica.bnf.fr](http://gallica.bnf.fr)

Le manuscrit des observations de Galilée est également sur ce site (chercher l'auteur GALILEI)  
*Le Messenger céleste* et *Dialogue sur les deux grands Systèmes du monde* de Galilée sont publiés au Seuil (collection Points Sciences)

*L'aventure cartographique*, Jean LEFORT, Belin Pour la Science, 2004

Michel TOULMONDE, Fleurance, 14 août 2009.