Huit activités sur les satellites naturels

Pierre Causeret, Esbarres

Je vous propose ici un petit tour d'horizon d'activités autour des satellites naturels des planètes du Système solaire, activités qui ont, pour beaucoup, déjà été abordées dans les Cahiers Clairaut.

Observer des satellites naturels

Quels satellites peut-on observer ? Mercure et Vénus n'en possèdent pas. Ceux de Mars sont trop petits et surtout trop près de leur planète pour être observés facilement.

Uranus et Neptune sont bien lointaines et il faut un gros télescope pour deviner quelques satellites : on peut voir Triton, le plus gros satellite de Neptune avec un télescope de 250 mm (magnitude 13,5) ; les satellites d'Uranus, pourtant plus proches, sont plus difficiles à voir car plus petits et plus sombres (magnitude ≈ 14 pour Titania et Obéron).

Nous ne parlerons pas ici de notre Lune. Il reste donc Jupiter et Saturne qui possèdent des satellites facilement observables.

Pour admirer les quatre satellites galiléens de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto), une paire de jumelles suffit – sur pied de préférence – mais c'est plus confortable dans un instrument type lunette ou télescope. Ces quatre satellites ayant une magnitude proche (entre 4,6 pour Ganymède et 5,7 pour Callisto), il est difficile de savoir qui est qui. Un logiciel comme Stellarium est bien pratique pour s'y retrouver. On peut suivre leur déplacement d'heure en heure ou de jour en jour. Les autres satellites de Jupiter sont nettement plus difficiles à voir (magnitude supérieure à 14).

Passons à Saturne. Son principal satellite, Titan, s'observe dans un petit instrument (mag 8,2). Avec un télescope de 200 mm, on monte jusqu'à sept satellites observables avec Rhéa (mag 9,5), Téthys (10,1), Dioné (10,2), Japet (≈ 11), Encelade (11,6) et Mimas (12,7). Là aussi, la méthode la plus simple pour les reconnaître est d'utiliser un logiciel.

Photographier des satellites naturels

Une fois les satellites observés, on voudrait bien les photographier, soit pour avoir un souvenir, soit pour faire des mesures. Pour les satellites de Jupiter ou de Saturne, on peut tenter une photo derrière l'oculaire avec un smartphone ou un appareil compact mais le résultat n'est pas garanti. On peut utiliser un système de fixation du smartphone ou de l'appareil compact sur le porte oculaire.

Fig.1. *Jupiter et les 4 satellites galiléens photographiés à l'aide d'un appareil compact fixé derrière une lunette muni d'un oculaire (temps de pose : 1/10 s). Le contraste a été augmenté pour rendre plus visibles les satellites. Avec le logiciel Stellarium, on peut les identifier. On a, de gauche à droite, Callisto, Europe, Io et Ganymède.*

Une bien meilleure solution consiste à fixer le boîtier d'un appareil photo reflex (sans objectif) sur la lunette ou le télescope (sans oculaire), l'instrument servant alors de téléobjectif. Il existe des bagues d'adaptation pour cela (bague T).

Pour être sûr d'avoir les satellites sur l'image, il faut un champ d'au moins 20'. Avec un instrument de 2 m de focale et un boîtier muni d'un capteur APS-C, le champ est de 40' environ, ce qui est largement suffisant.

Il faut ensuite choisir un temps de pose assez long pour que les satellites apparaissent. Mais la planète Jupiter risque alors d'être surexposée.

Avec une seule image, il est difficile d'obtenir un bon résultat mais ce peut être suffisant pour étudier le déplacement des satellites. Les spécialistes de photo astro font toute une série d'images pour ensuite les traiter avec différents logiciels. Nous ne détaillerons pas ici les différents types de traitement.

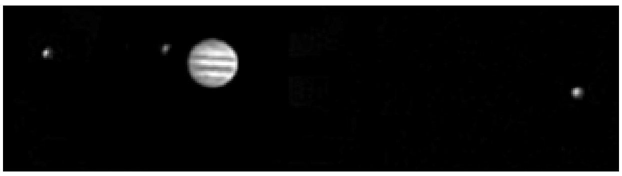

Fig.2. *Jupiter avec trois de ses satellites. Image réalisée par André Debackère et ses élèves avec le matériel d'Astro à l'école (Schmidt Cassegrain de 200 mm avec réducteur de focale et webcam). Extrait d'un article du n° 130 des Cahiers Clairaut (2010).*

Vérifier la 3e loi de Kepler

La 3e loi de Kepler, publiée en 1619, relie les périodes T de révolution des planètes au demi grand axe a de leur orbite. Elle s'écrit : a^3/T^2 = constante.

Cette loi, qui peut se démontrer grâce à la loi de la gravitation de Newton (voir paragraphe suivant), s'applique aussi aux satellites d'une planète. On peut la vérifier par exemple avec les 4 satellites galiléens de Jupiter.

Ex 1

Satellite	Demi grand axe a	Période T
Io	421 800 km	42,5 h
Europe	671 100 km	85,2 h
Ganymède	1 070 400 km	171,7 h
Callisto	1 882 700 km	400,5 h

Calculer a^3/T^2 pour chacun des satellites.

Solution : on obtient $4{,}16\times10^{13}$ dans chaque cas, en gardant ces unités (ou $3{,}21\times10^{15}$ en S.I. avec a en mètres et T en secondes).

Cette 3e loi se vérifie pour n'importe quel système de satellites, de Mars à Neptune[1].

Remarque

On pourra vérifier que la période d'Europe est le double de celle de Io et que celle de Ganymède est le double de celle d'Europe. On parle alors de résonance orbitale. On retrouve ce phénomène dans le système de Saturne entre Mimas et Thétys ou entre Encelade et Dioné (résonances 2 : 1).

Calculer la masse d'une planète

On utilise cette fois la 3e loi de Kepler généralisée sous sa forme newtonienne où la constante est égale à $G(M+m)/(4\pi^2)$. Dans cette formule, on peut négliger m, la masse du satellite, qui est faible par rapport à M, la masse de la planète. La formule devient alors :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \times M}{4\pi^2}$$

a est le demi grand axe de l'orbite en mètres,

T la période en secondes,

G, constante de gravitation = $6{,}67\times10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$

et M est la masse de la planète en kg.

Cette 3e loi de Kepler généralisée se démontre facilement dans le cas d'une orbite circulaire de rayon R. On montre que le mouvement est uniforme et on écrit ensuite l'égalité de la force d'attraction GMm/R^2 et de la force centripète mv^2/R, la vitesse v étant égale à $2\pi R/T$.

Ex 2

En utilisant le tableau de l'exercice 1 et la 3e loi de Kepler généralisée, déterminer la masse de Jupiter.

Solution

$M = 4\pi^2 a^3/(GT^2) = 1{,}9\times10^{27}$ kg

C'est de cette manière que l'on a pu déterminer la masse de toutes les planètes possédant au moins un satellite [2].

Pour Mercure et Vénus, dépourvues de satellite, on utilise l'attraction de la planète sur une sonde spatiale passant à proximité.

Réaliser une maquette des satellites de Jupiter

La maquette de la figure 3 a été réalisée sur une planchette carrée de 40 cm de côté. On a choisi une échelle de 10^{-10} où 1 mm représente 10 000 km. Les distances des 4 satellites à Jupiter sont alors de 42, 67, 102 et 188 mm et le diamètre de la planète de 14 mm.

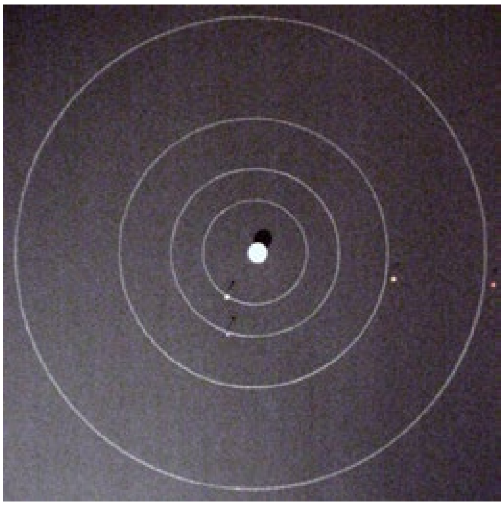

Fig.3a. *Maquette vue de dessus avec la position des satellites galiléens de Jupiter pour une date donnée, ici le 15 mars 2004 à 20 h. Jupiter est représenté par une boule en polystyrène et les satellites par des épingles à tête ronde.*

Fig.3b. *La même maquette vue de profil. L'observateur sur Terre est supposé être sous la photo 3a On obtient l'image des satellites tels qu'on peut les observer depuis la Terre à la date choisie.*

Pour placer correctement un satellite à la date et à l'heure choisies, on pourra déjà rechercher le passage

1 Vous trouverez les données pour les autres planètes sur le site du CLEA à Lunap, onglet Satellites / En bref.

2 Voir le n° 133 des Cahiers Clairaut (2011) pour le calcul de la masse de Saturne.

de ce satellite devant la planète le plus proche dans le temps avec un logiciel comme Stellarium ou les éphémérides de l'IMCCE[3]. On cherche ensuite de quel angle il a tourné depuis ce passage grâce à sa période (voir tableau exercice 1). Un exemple : on trouve, avec des éphémérides, que Europe est passé devant Jupiter le 19 juin 2021 à 22 h 33 TU. On cherche sa position le 21 juin à 0 h TU, donc 25,45 h plus tard : Europe aura tourné d'un angle de 360°×25,45/85,2 soit 107,5° (on a utilisé la période sidérale du satellite de 85,2 j comme si les planètes étaient immobiles mais cela n'entraîne pas de grosse erreur).

Vous trouverez une autre maquette dans le n° 155 des Cahiers Clairaut qui permet d'étudier les observations de Galilée[4]. Vous y trouverez également une animation GeoGebra[5].

Créer une animation des satellites de Jupiter

Si vous voulez créer une animation montrant les mouvements des satellites autour d'une planète, il faut connaître leur vitesse angulaire et leur position à l'instant 0.

Connaissant la période T d'un satellite, on calcule facilement sa vitesse angulaire égale à $2\pi/T$.

Pour connaître la position du satellite à l'instant zéro choisi, on utilisera comme dans le paragraphe précédent son passage devant la planète.

Reprenons l'exemple d'Europe. On veut représenter son mouvement à partir du 21 juin 0 h :

- sa vitesse angulaire est de 0,0737 rad/h ($2\pi/85{,}2$) ;
- l'angle à t = 0 avec la direction Jupiter-Terre est de 1,876 rad ($107{,}5\times\pi/180$) ;
- l'angle à l'instant t est donc de 0,106 + 0,0737×t
- sa distance à la planète est 671 (en milliers de km).

La position d'Europe est donc connue à l'instant t (compté ici en jours à partir du 21 juin 0 h).

En coordonnées cartésiennes, si on prend comme axe des abscisses la direction Jupiter Terre, cela donne :

$$X = 671 \times \cos(1{,}876 + 0{,}0737 \times t)$$
$$Y = 671 \times \sin(1{,}876 + 0{,}0737 \times t)$$

Et si on veut représenter ce que l'on voit depuis la Terre, on ne garde que la coordonnée Y. On suppose ici que la Terre est située dans le plan de l'équateur de Jupiter ainsi que ses satellites, ce qui est proche de la réalité.

La position des satellites vus depuis la Terre est assez bonne pendant quelques jours mais se décale rapidement car on a utilisé les périodes sidérales comme si la Terre et Jupiter étaient immobiles. Il est assez facile de tenir compte du mouvement de Jupiter en utilisant les périodes synodiques des satellites (mesurées par rapport à l'axe Soleil Jupiter) plutôt que les périodes sidérales. On reproduit alors assez bien les positions des satellites vus depuis le Soleil. La période synodique T_{syn} s'obtient à partir de la période sidérale T_{sid} et de la période de Jupiter T_{Jup} ainsi :

$$1/T_{syn} = 1/T_{sid} - 1/T_{Jup}$$

Avec T_{Jup} = 4332,6 j, on obtient pour Europe une période synodique de 42,477 jours (au lieu de 42,459 j pour la période sidérale).

La vue des satellites depuis le Soleil donne une approximation de la vue depuis la Terre. Il faudrait également tenir compte de la position de la Terre mais c'est alors un peu plus compliqué.

Fig.4. *Animation des satellites créée avec le logiciel Processing. Ganymède est devant Jupiter ici. L'abscisse X des formules ci-dessous est représentée ici verticalement.*

X1=42×cos(0,148×t) ; Y1=42×sin(0,148×t)
X2=67×cos(1,876+0,0737×t) ; Y2=67×sin(1,876+0,0737×t)
X3=107×cos(1,265+0,0365×t) ; Y3=107×sin(1,265+0,0365×t)
X4=67×cos(4,136+0,0156×t) ; Y4=67×sin(4,136+0,0156×t)

Avec un logiciel en 3D, on peut également reproduire le mouvement des satellites dans un plan et incliner plus ou moins ce plan pour visualiser la vue « de dessus » ou la vue depuis la Terre.

3 https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/323.html
Pour avoir le milieu du passage, faire la moyenne de PC (Passage Commencement) et PF (Passage Fin).

4 Cahiers Clairaut n° 155 (2016), Histoire des sciences, actualité et évaluation en classe de 3e. Avec un document élève à imprimer.

5 Vous trouverez ce document sur le site du CLEA à Lunap, onglet satellites / activités.

Calculer la vitesse de la lumière

Quand les satellites de Jupiter tournent autour de la planète, ils peuvent se retrouver dans son ombre, on parle alors d'éclipse. Callisto, le plus éloigné de Jupiter, passe souvent au-dessus ou en dessous de l'ombre. Mais Io, le plus proche, traverse l'ombre à chacune de ses révolutions. C'est ce phénomène qui va nous intéresser ici. Contrairement aux occultations (lorsque Io passe derrière Jupiter par exemple), une éclipse se produit à un instant donné, indépendant de l'observateur.

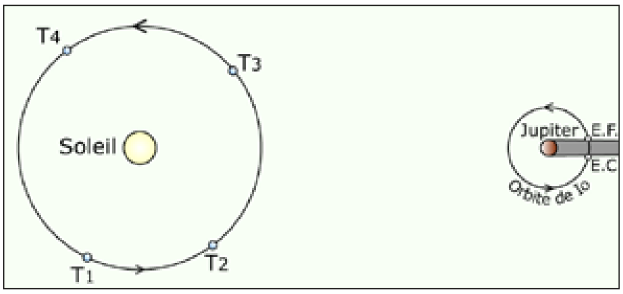

***Fig.5**. Une éclipse de Io se produit quand le satellite passe dans l'ombre de Jupiter. E.C. représente le commencement de l'éclipse et E.F., la fin de l'éclipse.*

Quand la Terre est en T1 ou en T2, on peut observer Io rentrant dans l'ombre de Jupiter. Si ce commencement d'éclipse (EC) se produit à un instant t, nous ne l'observerons qu'un peu plus tard, à un instant t', le temps que la lumière parcoure la distance Jupiter-Terre. On aura donc t' = t + Δt avec Δt = d/c (d = distance Jupiter-Terre, c = vitesse de la lumière). Quand la Terre se rapproche de Jupiter, la distance d diminue, donc Δt aussi et l'intervalle de temps entre deux éclipses est raccourci pour l'observateur.

Quand la Terre est en T3 ou en T4, on peut observer cette fois les fins d'éclipse (EF), là aussi avec un certain retard Δt. Mais ici, la Terre s'éloigne de Jupiter, la distance augmente, donc Δt aussi. L'intervalle de temps entre l'observation de deux éclipses est rallongé.

La période de Io doit donc apparaître plus courte quand la Terre se rapproche de Jupiter et plus longue quand elle s'en éloigne. Malheureusement, l'écart est faible et ne peut pas se mesurer sur une seule période. Il faut donc utiliser plusieurs périodes de Io.

L'astronome danois Ole Rœmer avait remarqué les variations de période des éclipses de Io et en avait déduit que la vitesse de la lumière était finie[6]. Nous allons reprendre ici le même principe mais, au lieu d'observer les éclipses, nous utiliserons les éphémérides de l'IMCCE.

Les données (source IMCCE)

Les dates choisies ci-dessous correspondent à des commencements ou fins d'éclipses observables.

	Date	Heure EC	N° de l'éclipse	Distance Terre-Jupiter
1	26/04/2021	3 h 47,9 min	50	5,3397 ua
2	05/08/2021	0 h 48,6 min	107	4,0473 ua

***Tab.1.** Commencements d'éclipses. L'IMCCE donne les horaires d'observation au dixième de minute près. Les éclipses ont été numérotées à partir du 29 janvier (conjonction de Jupiter avec le Soleil).*

	Date	Heure EF	N° de l'éclipse	Distance Terre-Jupiter
3	05/09/2021	23 h 40,7 min	10	4,0546 ua
4	15/12/2021	21 h 03,9 min	67	5,3569 ua

***Tab.2.** Fins d'éclipses. Les éclipses ont été numérotées à partir du 20 août 2021 (opposition de Jupiter).*

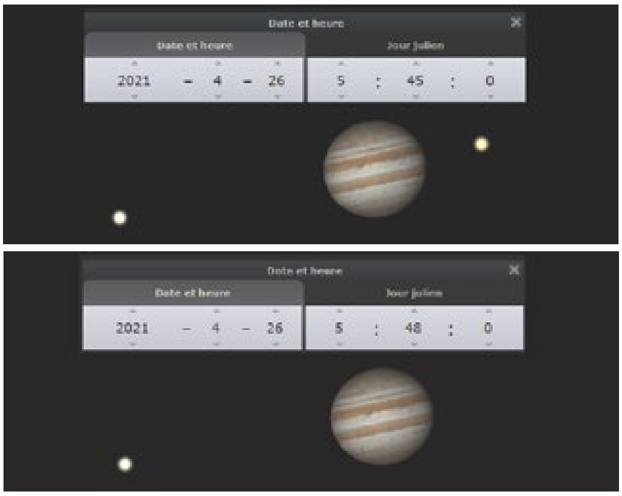

***Fig.6**. Le commencement d'éclipse (EC) de Io du 26 avril 2021 à 3 h 48 TU (5 h 48 en heure légale), simulé par le logiciel Stellarium. Le satellite disparaît en entrant dans l'ombre de Jupiter.*

Les calculs

On supposera que la période réelle de révolution de Io est constante, nous l'appellerons P. Nous avons vu que : t' = t + d/c si on appelle t l'instant du phénomène et t' l'instant de son observation depuis la Terre, d étant la distance observateur Jupiter, et c la vitesse de la lumière. Pour chaque tableau, il s'est écoulé 57 périodes entre les deux observations.

Ligne 1 du tableau 1 : $t'1 = t1 + d1/c$
Ligne 2 du tableau 1 : $t'2 = t2 + d2/c$
donc $t'2 - t'1 = t2 - t1 + (d2 - d1)/c$

Comme $t2 - t1 = 57\ P$ et que $d2 < d1$, cela devient : $t'2 - t'1 = 57\ P - (d1 - d2)/c$, ce que l'on peut encore écrire : $$\Delta t'1 = 57\ P - \Delta d1/c \qquad [1]$$

6 Vous trouverez des extraits de textes de Rœmer ainsi qu'un calcul de la vitesse de la lumière dans l'article Vitesse de la lumière : Rœmer revisité, paru dans le numéro 130 des Cahiers Clairaut (2010).

Le temps écoulé entre les deux observations d'éclipse 1 et 2 (Δ t'1) est donc égal aux 57 périodes de Io diminué du temps que met la lumière à parcourir la distance Δ d1 (ou d1 – d2).

Ligne 3 du tableau 2 : t'3 = t3 + d3/c
Ligne 4 du tableau 2 : t'4 = t4 + d4/c
donc t'4 – t'3 = 57 P + (d4 – d3)/c ce que l'on peut encore écrire : Δ t'3 = 57 P + Δ d3/c [2]

Le temps écoulé entre les deux observations d'éclipse 3 et 4 (Δ t'3) est égal aux 57 périodes de Io augmenté du temps que met la lumière à parcourir la distance Δ d3 (ou d4 – d3).

En soustrayant membre à membre les égalités [1] et [2], on trouve : Δ t'3 – Δ t'1 = (Δ d3 + Δ d1)/c

d'où : c = (Δ d3 + Δ d1)/(Δ t'3 – Δ t'1)

Les calculs numériques se font facilement à l'aide d'un tableur :

Δ d3 + Δ d1 = 2,594 7 ua soit 388 167 120 km
Δ t'3 – Δ t'1 = 1 350 s

On trouve <u>c ≈ 288 000 km/s</u>

<u>Quelques remarques</u>

La précision du résultat n'est pas très bonne (environ 4 %) mais nous avons considéré la période de Io comme constante alors qu'elle varie, suite aux perturbations exercées par les autres satellites. On peut d'ailleurs arriver à une erreur nettement plus grande en choisissant d'autres dates. Cette méthode permet néanmoins d'obtenir un bon ordre de grandeur de c.

Pour que la méthode soit correcte, il faudrait réellement observer les éclipses de Io. On utilise ici les données de l'IMCCE qui fabrique ses éphémérides en tenant compte de la vitesse de la lumière...

Mythologie, littérature et noms des satellites

Dans le cadre de travaux interdisciplinaires, on peut également s'intéresser à l'origine des noms de satellites. La plupart proviennent de la mythologie grecque, mais pas tous.

Les satellites de Mars, ont été baptisés Phobos (la peur) et Déimos (la terreur) par leur découvreur Asaph Hall en 1877, du nom de deux fils d'Arès (le dieu grec correspondant à Mars), à la suite d'une suggestion d'un Anglais, Mr Madan.

Les 4 principaux satellites de Jupiter ont d'abord été nommés étoiles médicéennes par Galilée en l'honneur des Médicis. Les noms actuels ont été proposés par Simon Marius, un contemporain de Galilée, Il s'agit de maîtresses de Jupiter - Zeus (Io, Europe, Callisto) ou d'amants (Ganymède). Pour les satellites découverts ensuite, on a continué avec toute la mythologie liée à Zeus : Amalthée (nourrice), Himalia, Thébé, Élara (maîtresses)...

Titan, le principal satellite de Saturne a été découvert en 1655 par Huygens mais n'a reçu ce nom que deux siècles plus tard. C'est John Herschel (fils de William) qui proposa de désigner les satellites de Saturne par des noms liés aux Titans (frères et sœurs de Cronos, l'équivalent de Saturne pour les Grecs) : Japet est un Titan, Rhéa la femme de Cronos, Téthys ou Phœbe, deux Titanides...[7]

Plus original, les noms des satellites d'Uranus sont des personnages de William Shakespeare ou d'Alexander Pope, encore sur la suggestion de John Herschel. Miranda et Ariel viennent de *La Tempête*, de Shakespeare, Umbriel d'un poème de Pope, Titania et Obéron de *Songe d'une nuit d'été* de Shakespeare...

Pour les satellites de Neptune, on revient à la mythologie grecque avec des noms liés au dieu de la mer : Triton, fils de Poséidon (le dieu grec correspondant à Neptune), Protée (fils de Poséidon), Néréide (nymphe marine)...

Fig.7*. Un Triton et une Néréide, deux divinités marines. Triton et Néréïde sont les noms de deux satellites de Neptune, le dieu de la mer (crédit Wikimedia / Sylvain Gailloud).*

On a donné à Pluton le nom du dieu des Enfers et Charon, son gros satellite (on parle souvent de planète naine double) est le passeur des Enfers. Pour les autres satellites, on reste dans le domaine de la mort avec Styx (un fleuve des Enfers), Nyx (la déesse de la nuit), Kerberos (Cerbère, le chien gardien des Enfers).

Il reste les satellites d'astéroïdes : le premier photographié fut Dactyle (divinité grecque mineure), satellite de l'astéroïde Ida (nymphe). On en connaît actuellement plus de 200. Ils ont des noms variés : Romulus (mythologie romaine), Lempo (mythologie nordique), Petit Prince... ■

7 Pour en savoir plus sur les noms des satellites de Saturne, un article leur a été consacré dans le n° 133 des Cahiers Clairaut (2011).