

Satellites galiléens de Jupiter

Les phénomènes des satellites

Eclipses, occultations, passages, phénomènes mutuels, etc
Simulation avec Geogebra

Jupiter est la plus grosse planète de notre système solaire. Ses satellites galiléens, Io, Europe, Ganymède et Callisto¹, découverts par Galilée en 1609 avec sa première lunette astronomique, montrent, à chacune de leur révolution, en passant successivement devant et derrière Jupiter, un ensemble de configurations observables et prédictibles tels des *occultations*, des *éclipses*...

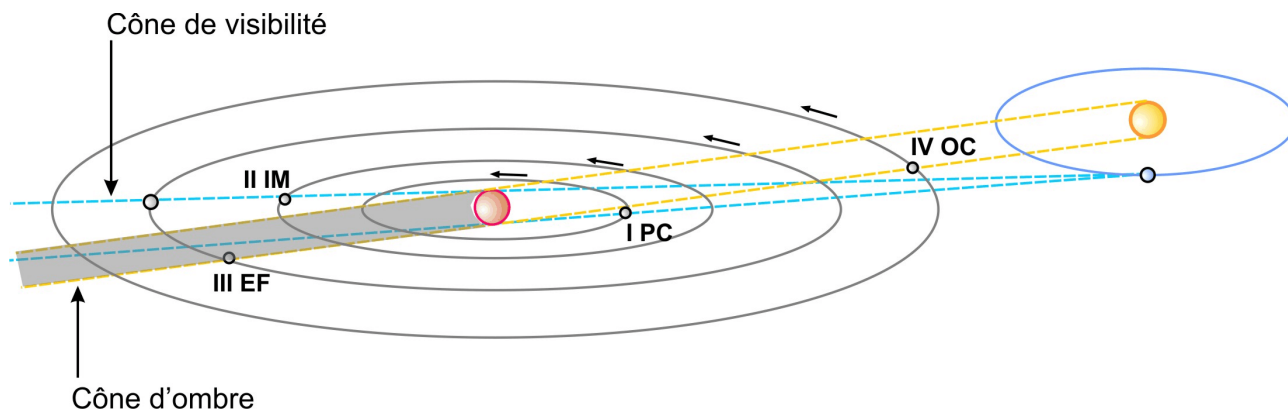


Figure 1

Quelques prédictions données par l'IMCCE (*Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides*)

Mai 2015

j	hh	mm.m	sat	ph.	j	hh	mm.m	sat	ph.	j	hh	mm.m	sat	ph.	j	hh	mm.m	sat	ph.
5	10	35	II	IM.	13	15	32	III	P.F.	21	2	27	IV	P.F.	29	1	40.0	I	E.F.
5	16	3.1	II	E.F.	13	17	1	III	O.C.	21	9	20	IV	O.C.	29	5	41	IV	IM.
5	21	52	I	IM.	13	20	37	III	O.F.	21	11	3	II	P.C.	29	10	34	IV	EM.
					13	20	56	I	P.C.	21	13	30	II	O.C.	29	17	11.6	IV	E.C.
6	1	26.5	I	E.F.	13	22	12	I	O.C.	21	13	55	II	P.F.	29	19	20	I	P.C.
6	7	54	III	P.C.	13	23	13	I	P.F.	21	13	57	IV	O.F.	29	20	31	I	O.C.
6	11	30	III	P.F.						21	16	21	II	O.F.	29	21	37	I	P.F.
6	13	1	III	O.C.	14	0	28	I	O.F.	21	20	13	I	IM.	29	21	54.2	IV	E.F.
6	16	38	III	O.F.	14	8	24	II	P.C.	21	23	45.2	I	E.F.	29	22	48	I	O.F.
6	19	1	I	P.C.	14	10	54	II	O.C.										
6	20	16	I	O.C.	14	11	16	II	P.F.	22	17	22	I	P.C.	30	7	53	II	IM.
6	21	18	I	P.F.	14	13	46	II	O.F.	22	18	35	I	O.C.	30	13	12.0	II	E.F.
6	22	33	I	O.F.	14	18	16	I	IM.	22	19	39	I	P.F.	30	16	40	I	IM.

<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/ephesat/predictions/Jupiter/phenJup.php>

où I, II, III et IV désignent Io, Europe, Ganymède et Callisto, et P.C., O.C, P.F. ... les types de phénomènes. Temps donnés en TT (Temps Terrestre) proche du TU (Temps Universel).

Les termes employés dans les *éphémérides* de l'IMCCE sont :

- E.C.** et **E.F.** pour *éclipse*, commencement et fin,
- IM.** et **EM.** pour *immersion* et *émersion* derrière Jupiter,
- P.C.** et **P.F.** pour *passage* du satellite *devant* Jupiter, début et fin,
- O.C.** et **O.F.** pour *passage* de son *ombre* sur Jupiter, début et fin.

La figure 1 permet de saisir les positions le long des orbites et les phénomènes possibles.

¹ Pour l'origine des noms des personnages mythologiques voir la page : <http://www.imcce.fr/promenade/pages4/443.html>

Tous les six ans, le Soleil et la Terre traversent le plan équatorial de Jupiter où orbitent les satellites galiléens. Quand la Terre et le Soleil sont proches de ce plan les satellites produisent des phénomènes d'éclipses et d'occultations mutuels.

On note alors, par exemples :

2 O 3 : satellite Europe J2 occulte Ganymède J3.

1 E 4 : satellite Io J1 éclipse Callisto J4...

Sur la figure 2 on dirait 3 O 1 et 4 E 2.

Les mouvements du trio Soleil, Jupiter, Terre sont régis par les lois de Kepler ; dimensions des orbites, périodes suivent ces lois. Il en est de même des satellites galiléens autour de Jupiter. Les mouvements de la Terre et de Jupiter ainsi que ceux des satellites autour de Jupiter sont connus.

Il va être possible pour bien saisir la nature des phénomènes, leur succession, leur déroulement, et comprendre les observations, de construire une *simulation* qui englobe tous ces corps et leur évolution sur une période d'une année.

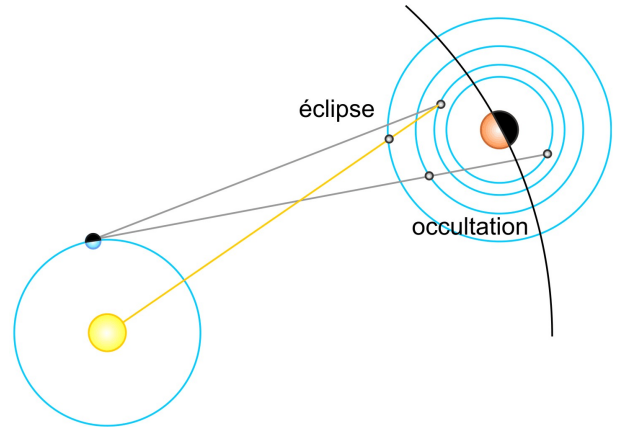


Figure 2.

Plan de travail

- 1 – positionnements et mouvements Terre et Jupiter autour du Soleil sur un an (1/09/2014 - 1/09/2015)
- 2 – passage au référentiel jovicentrique
- 3 – positionnements et mouvements des satellites galiléens
- 4 – les directions Terre-Jupiter (occultations et passages) et Soleil-Jupiter (éclipses et passages ombres)
- 5 – interactions satellites - Jupiter
 - 5a – éclipses et passages de l'ombre : critères d'existence des phénomènes, tests et affichage
 - 5b – occultations et passages des satellites sur le disque de Jupiter critères d'existence des phénomènes, tests et affichage
- 6 – Interactions mutuelles des satellites
 - 6a – éclipses mutuelles : critères d'existence, tests et affichage
 - 6b – occultations : critères d'existence des phénomènes, tests et affichage
- 7 – Compléments et extensions

Simplification dans la simulation

Les orbites des planètes autour du Soleil et celles des satellites autour de Jupiter sont assimilées à des cercles.

Les planètes ont leurs plans orbitaux confondus avec celui de l'orbite de la Terre : le plan écliptique, ainsi que le plan équatorial de Jupiter où gravitent les satellites.

Unités de distances

Dans le système solaire, l'unité la plus couramment utilisée est l'*unité astronomique* (150 000 000 km) distance moyenne Terre-Soleil. Les demi-grands axes des orbites des satellites, plus petits, de l'ordre de la distance Terre-Lune, sont exprimés en km comme leurs rayons, ainsi que celui de Jupiter.


Pour la clarté de la lecture, l'unité utilisée dans la *fenêtre graphique* de Geogebra est le *rayon équatorial de Jupiter*. Bien faire attention aux conversions à partir des données fournies dans le fichier de départ lors des constructions sous Geogebra.

Données de départ

Les données de base du système sont incluses dans le fichier Geogebra *data_depart.ggb*.
Leurs significations et valeurs sont données en Annexe, page 9.



En route, et au travail !

 Lancer *Geogebra* (2D ou 3D) et ouvrir le fichier *data_depart.ggb*.

Dans ce texte les mots en police Arial et **gras** sont les objets de Geogebra existants ou à construire.

1 – Positionnement et mouvement Terre et Jupiter autour du Soleil (héliocentrisme)

Le plan xOy représente le plan de l'écliptique, et la direction Ox est celle du **point** ou **point vernal**, direction origine des longitudes héliocentriques (figure 2).

 Placer un point Soleil au point origi
:

$$S' = (0,0)$$


Les longitudes héliocentriques de la Terre et Jupiter, en fonction du temps, sont données par (voir figure 2) :

$$l_{T} = lg0_{T} + 360 / P_{T} * tps$$

$$l_{J} = lg0_{J} + 360 / P_{J} * tps$$

avec :

$lg0_{T}$ et $lg0_{J}$ longitudes écliptiques héliocentriques à l'instant 0 ($tps = 0$, 1/09/2014 à 0h TU),
 $360 / P_{T}$ et $360 / P_{J}$ vitesses angulaires des deux planètes en degrés par jour.

 Placer les points Terre et Jupiter sur leurs orbites (en coordonnées polaires) :

$$T' = (a_{T} * ua / R_{J} ; l_{T}^{\circ})$$

$$J' = (a_{J} * ua / R_{J} ; l_{J}^{\circ})$$

Remarque : si l'on avait exprimé les vitesses de rotation en radians par jour, ($2\pi / P_{T}$ ou $2\pi / P_{J}$), le signe degré ($^{\circ}$) n'était pas à mettre, mais il fallait convertir $lg0_{T}$ et $lg0_{J}$ en radians pour le calcul de l_{T} et l_{J} .

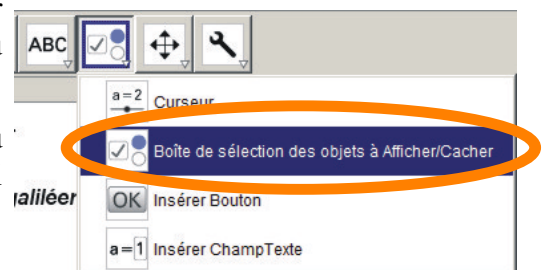
 **SAUVEGARDER avec un nouveau nom de fichier personnalisé.**

 Faire varier le temps pour observer les mouvements des deux planètes.

2 – Passage au référentiel jovicentrique

La simulation portant sur les phénomènes qui se passent autour de Jupiter, nous allons placer celui-ci au centre du repère du graphique.

Pour ne pas perdre de vue que c'est le Soleil qui est au centre du Système solaire, nous allons créer une boîte de visualisation qui permettra de passer d'un système de référence à l'autre.



Créer une boîte de visibilité. Geogebra, par défaut la nomme et on l'appellera **Héliocentrisme/Jovicentrisme** (voir figure 3).

Cette valeur logique **a**, mise à **true** (vrai) indiquera l'héliocentrisme et mise à **false** (faux) pour le Jovicentrisme.

Mettre Jupiter au centre, dans ce changement de référentiel, c'est effectuer une translation de vecteur **J'S'** à tous les éléments déjà construits.

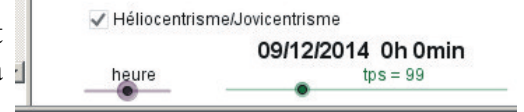


Figure 3.

Positionner Jupiter au centre du Graphique et le mettre en rouge

$$J = \text{Si}[a , J', (0, 0)]$$

Signification de l'affectation logique : si **a** est à vrai (héliocentrisme), je crée **J** similaire au point **J'** (même position), sinon, **a** est à faux (jovicentrisme), je crée un point **J**, au centre.

Créer la planète de rayon unité, la mettre en rouge avec une transparence de 50%.

$$cp_J = \text{cercle}[J , 1]$$

Positionner le Soleil : $S = \text{Si}[a , S' , S' - J]$

Mettre ce point **S** en jaune.

Créer le point Terre : $T = \text{Si}[a , T' , T' - J]$

Créer l'orbite de la Terre : $c_T = \text{cercle}[S , a_T * ua/R_J]$

Mettre en bleu **T** et **c_T**.

Créer l'orbite de Jupiter autour du Soleil ou l'orbite du Soleil autour de Jupiter :

$$c_J = \text{cercle}[S' , a_J * ua/R_J]$$

à mettre aussi en rouge.

Cacher les points **S'**, **T'** et **J'**. Cacher les labels des cercles construits.

Tester le changement de référentiel et observer les trajectoires des objets avec **tps** dans les deux référentiels. Puis rester en jovicentrique.

SAUVEGARDER par sécurité.

Réfléchissons (explications en fin de document, page 8)

En observant de Jupiter, sur une année, les positions respectives du Soleil et de la Terre comment décrire le comportement de notre Terre ? A quel phénomène céleste vu de la Terre peut-on le rapprocher?

3 – Positionnement des satellites

Pour ne pas surcharger le graphique, nous nous occuperons seulement des deux premiers satellites Io (J1) et Europe (J2).


Orbites de Io et d'Europe : $c_1 = \text{cercle}[J , a_1 / R_J]$
 $c_2 = \text{cercle}[J , a_2 / R_J]$

Pour placer les satellites en fonction du temps, il faut connaître leurs positions au temps origine et leurs vitesses angulaires.

Par simplification, dans ce TD, nous prendrons comme longitudes origines 0. Celles-ci pourront être précisées ultérieurement pour rendre plus réaliste la simulation.

Les vitesses angulaires en degrés par jour des satellites sont :

$$360 / P_1 \text{ et } 360 / P_2$$


 Leurs positions écrites en coordonnées polaires sont donc (même remarque que précédemment sur l'emploi degrés - radians) :

$$J_1 = (a_1 / R_J ; (360 / P_1 \text{ tps})^\circ) + J$$

$$J_2 = (a_2 / R_J ; (360 / P_2 \text{ tps})^\circ) + J$$

4 – Les directions Terre-Jupiter et Soleil-Jupiter

Les observations des éclipses et occultations sont conditionnées par les directions Soleil-Jupiter et Terre-Jupiter.

 Faire apparaître ces directions principales :

$$\text{axeS} = \text{DemiDroite}[J, S] \quad \text{en jaune}$$

$$\text{axeT} = \text{DemiDroite}[J, T] \quad \text{en bleu}$$

Observer leurs variations avec le temps sur la plage de 1 an.

Description des divers événements

Pour chaque satellite, les directions importantes à considérer sont celles *Soleil-satellites* et *Terre-satellites*.


- Lorsque l'axe *Soleil-satellite* rencontre Jupiter, suivant que le satellite est devant ou derrière, on verra
 - soit un passage de l'ombre du satellite sur Jupiter
 - soit une éclipse du satellite.
- Lorsque l'axe *Terre-satellite* rencontre Jupiter, suivant que le satellite est devant ou derrière, on verra
 - soit un passage du satellite sur Jupiter
 - soit une occultation du satellite.
- Lorsque l'axe *Soleil-satellite* rencontre un autre satellite, il y aura éclipse de l'un par l'autre, suivant les positions relatives par rapport au Soleil
- Lorsque l'axe *Terre-satellite* rencontre un autre satellite, il y aura occultation de l'un par l'autre, suivant les positions relatives par rapport à la Terre.

Tableau 1 - Les différents événements

	Pos. Satellite	Direction Soleil-Jupiter	Direction Terre-Jupiter
J1 et Jupiter	en avant	passage de son ombre	passage du satellite
	en arrière	éclipse	occultation
J1 et J2	J1 devant J2	J1 éclipse J2	J1 occulte J2
	J1 derrière J2	J2 éclipse J1	J2 occulte J1

Si la géométrie de ces événements vous paraît claire, alors vous pouvez continuer, sinon éclairez vos idées en faisant un schéma des phénomènes.

Dans le tableau apparaît le fait que pour déterminer un événement, il faut deux informations : proximité de l'alignement et l'ordre de positionnement. Il faudra donc tester, avec les mouvements ces deux possibilités avec des valeurs logiques.

 Créer les axes Soleil-satellites et Terre-satellites.

Avec le Soleil et à mettre en jaune :

$$drS_1 = \text{Droite}[S, J_1]$$

$$drS_2 = \text{Droite}[S, J_2]$$


Avec la Terre et à mettre en bleu :

$$\begin{aligned} \text{drT_1} &= \text{Droite}[T, J_1] \\ \text{drT_2} &= \text{Droite}[T, J_2] \end{aligned}$$

 **SAUVEGARDER par sécurité.**

5 – Phénomènes Jupiter - Satellites

Pour connaître la possibilité d'un événement au cours du temps, nous allons procéder par valeurs logiques associées à des critères. Le temps variant, ces valeurs seront à "vrai" ou "faux". Leur combinaison nous avertira de la production ou non d'un événement que l'on affichera.

 Prenons pour commencer, l'interaction de Io (J_1) avec le Soleil. On crée une valeur logique qui sera à "vrai" (*true*) lorsque l'alignement est réalisé avec la distance de Jupiter à l'axe Soleil-satellite plus petite que la somme des rayons de Jupiter et du satellite sinon à "faux" (*false*) (voir figure 4) :

$$\begin{aligned} \text{dS}_{\{J1\}} &= \text{Distance}[J, \text{drS_1}] \\ \text{fdistJ1S} &= \text{Si}[\text{dS}_{\{J1\}} < 1 + R_1/R_J, \text{true}, \text{false}] \end{aligned}$$

Dans le test intervient le rayon du satellite R_1 , car celui-ci n'est pas ponctuel et le phénomène se produit lors de l'interaction du cylindre de même axe et de rayon du satellite avec Jupiter (figure 4).

La lettre **f** de l'objet **fdistJ1S** rappelle que l'on a une valeur logique "drapeau", *flag* en anglais, comme en usage dans la marine pour donner des indications à distance.

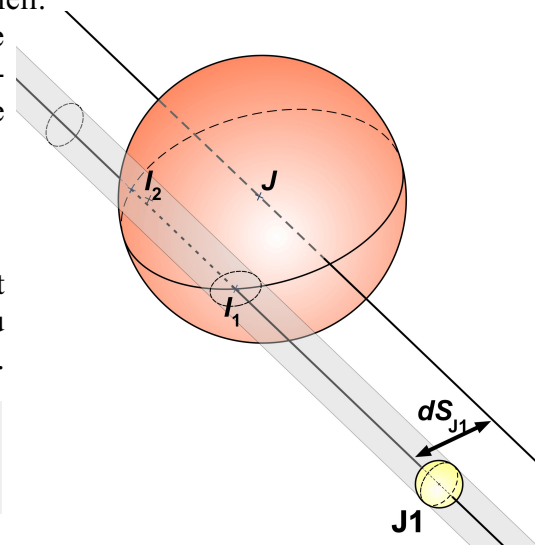



Figure 4.

De même la valeur logique pour la condition de l'ordre de la position du satellite, avant ou après Jupiter :

$$\text{fposJ1S} = \text{Si}[\text{distance}[J_1, S] < \text{distance}[S, J], \text{true}, \text{false}]$$


 On fait de même avec l'alignement avec la Terre :

$$\begin{aligned} \text{dT}_{\{J1\}} &= \text{Distance}[J, \text{drT_1}] \\ \text{fdistJ1T} &= \text{Si}[\text{dT}_{\{J1\}} < 1 + R_1/R_J, \text{true}, \text{false}] \\ \text{fposJ1T} &= \text{Si}[\text{Distance}[J_1, T] < \text{distance}[T, J], \text{true}, \text{false}] \end{aligned}$$

Tableau 2 - Existences des événements

Conditions		Dist. à Jupiter fdistJ1S		Dist. à Jupiter fdistJ1T	
		<i>true</i>	<i>false</i>	<i>true</i>	<i>f false</i>
Dist. au Soleil fdistJ1S ou fdistJ1T	<i>true</i>	Passage de l'ombre	rien	Passage du satellite	rien
	<i>false</i>	éclipse	rien	occultation	rien

Il reste à faire afficher les événements dans un objet texte (figure 5).

 Affichage *éclipse* ou *passage de l'ombre* :

Si[fdistJ1S, Si[fposJ1S, "Passage ombre", "éclipse"], "-"]

Affichage *occultation* ou *passage satellite* :

Si[fdistJ1T, Si[fposJ1T, "Passage sat.", "occultation"], "-"]

Faire varier le temps pour voir apparaître et disparaître les événements.

 **SAUVEGARDER par sécurité.**

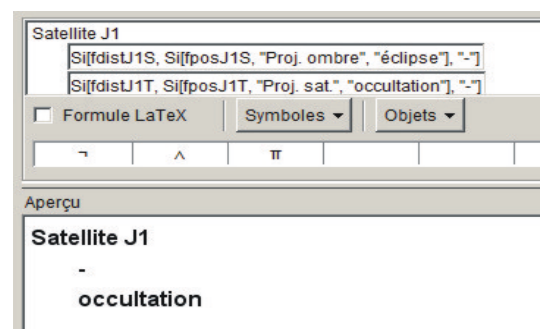


Figure 5.

Satellite J2. Il faut construire de façon similaire les tests pour le satellite Europe (J_2) :



Avec le Soleil, condition d'alignement :

$$dS_{\{J2\}} = \text{Distance}[J, drS_2]$$

$$fdistJ2S = \text{Si}[dS_{\{J2\}} < 1 + R_2/R_J, \text{true}, \text{false}]$$

Condition d'ordre de la position :

$$fposJ2S = \text{Si}[\text{distance}[J_2, S] < \text{distance}[S, J], \text{true}, \text{false}]$$

Avec la Terre condition d'alignement :

$$dT_{\{J2\}} = \text{Distance}[J, drT_2]$$

$$fdistJ2T = \text{Si}[dT_{\{J2\}} < 1 + R_2/R_J, \text{true}, \text{false}]$$

Condition d'ordre de la position :

$$fposJ2T = \text{Si}[\text{distance}[J_2, T] < \text{distance}[T, J], \text{true}, \text{false}]$$

Affichages

Affichage éclipse ou passage ombre de J_2 dans un nouvel objet texte :

$$\text{Si}[fdistJ2S, \text{Si}[fposJ2S, \text{"Passage ombre"}, \text{"éclipse"}], \text{"-"}]$$

Affichage occultation ou passage satellite :

$$\text{Si}[fdistJ2T, \text{Si}[fposJ2T, \text{"Passage sat."}, \text{"occultation"}], \text{"-"}]$$



SAUVEGARDER par sécurité.

6 – Phénomènes mutuels

Interaction de J_1 et J_2 (voir figure 6).



La démarche est identique, on teste la distance d'un satellite à l'axe Soleil de l'autre satellite et à l'axe Terre - autre satellite :

a) Eclipses

$$dS_{\{J12\}} = \text{Distance}[J_1, drS_2]$$

$$fdistJ12S = \text{Si}[dS_{\{J12\}} < (R_1 + R_2)/R_J, \text{true}, \text{false}]$$

Condition d'ordre de position :

$$fposJ12S = \text{Si}[\text{distance}[J_1, S] < \text{distance}[J_2, S], \text{true}, \text{false}]$$

b) Occultations

$$dT_{\{J12\}} = \text{Distance}[J_1, drT_2]$$

$$fdistJ12T = \text{Si}[dT_{\{J12\}} < (R_1 + R_2)/R_J, \text{true}, \text{false}]$$

Condition d'ordre de position :

$$fposJ12T = \text{Si}[\text{distance}[J_1, T] < \text{distance}[J_2, T], \text{true}, \text{false}]$$

c) Affichages événements entre J_1 et J_2

Affichage éclipse : $\text{Si}[fdistJ12S, \text{Si}[fposJ12S, \text{"J1 éclipse J2"}, \text{"J2 éclipse J1"}], \text{"-"}]$

Affichage occultation : $\text{Si}[fdistJ12T, \text{Si}[fposJ12T, \text{"J1 occulte J2"}, \text{"J2 occulte J1"}], \text{"-"}]$



SAUVEGARDER par sécurité.

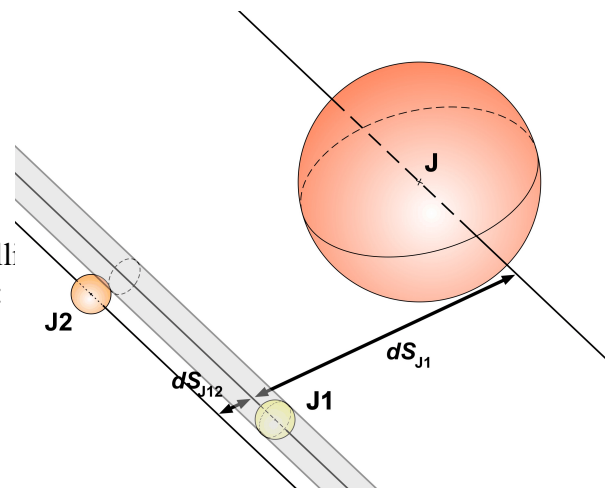


Figure 6.

Remarque

Dans les interactions des deux satellites entre eux, on ne tient pas compte du fait que l'interaction peut survenir lorsque Jupiter est intercalé entre eux ou quand ils sont tous les deux derrière.

Ceci peut être traité en introduisant un test logique supplémentaire.

Ce test logique peut être basé sur les tests qui ont permis de détecter les occultations et éclipses par Jupiter.

7 – Prise en compte de Ganymède (J3) et Callisto (J4)

Pour compléter la simulation, il faut y introduire les deux autres satellites Ganymède et Callisto.

- Tracer leurs orbites
- positionner les deux satellites
- gérer similairement leurs interactions avec Jupiter
- gérer leurs interactions réciproques :
J1 avec J3, J1 avec J4, J2 avec J3, J2 avec J4 et J3 avec J4.

En compléments

Les logiciels type “Planétarium” peuvent permettre de retrouver ces phénomènes, mais ne présentent qu'une projection sur le ciel.

On pourra se servir de *Stellarium* (<http://www.stellarium.org/fr>)

Pour aller plus loin, on peut reprendre la construction de la simulation par *Geogebra* mais en **3D** et inclure alors les vraies positions et inclinaisons des différents plans par rapport au plan écliptique : plan de l'orbite de Jupiter, plan de son équateur.

La simulation est alors plus complexe, mais plus réaliste et peut permettre des prédictions.

Documents et textes de travail à télécharger à partir de la page :

cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/astrogebra/astrogebra3D.htm

Renseignements, compléments d'information - Ph Merlin : merlin@obs.univ-lyon1.fr

Réfléchissons - explications

Le comportement de la Terre vue de Jupiter est semblable à celui de Vénus vue de la Terre.

Comme elle reste apparemment près de Soleil, elle est soit en avance sur lui (à l'Ouest du Soleil vu de Jupiter), soit en retard (à l'Est du Soleil). Elle apparaîtra donc comme Vénus, soit “étoile” du matin (à l'Ouest), puis après *conjonction supérieure*, “étoile” du soir (à l'Est du Soleil).

Etant à l'Est, après s'être éloignée du Soleil d'un angle maximal (*maximum d'élongation*), elle se rapproche du Soleil, passe à sa *conjonction inférieure* et redevient “étoile” du matin.

La durée de ce cycle s'appelle une *période synodique* mais jovienne.

Connaissant les périodes sidérales de la Terre et de Jupiter, elle s'exprime par la formule :

$$1/P_S = 1/P_T - 1/P_J$$

Sauriez-vous retrouver cette formule ?

L'angle du maximum d'élongation, en supposant que les orbites soient circulaires est donné par son sinus qui est le rapport des deux demi-grands axes :

$$\sin \theta = a_T / a_J$$

Faire un schéma pour expliciter cette formule et calculer cet angle.



Annexe

Données de départ

Fichier data_depart.ggb

Les mots en police Arial et **gras** sont les objets de *Geogebra* que l'on retrouve dans la fenêtre **Algèbre**.

Ces données ne doivent pas être altérées.

Unité de base

- unité astronomique **ua** (km)

Jupiter

- demi-grand axe de l'orbite **a_J** (ua)
- rayon équatorial **R_J** (km)
- période de révolution **P_J** (jours)
- longitude écliptique au temps origine **lg0_J** (degrés)

Terre

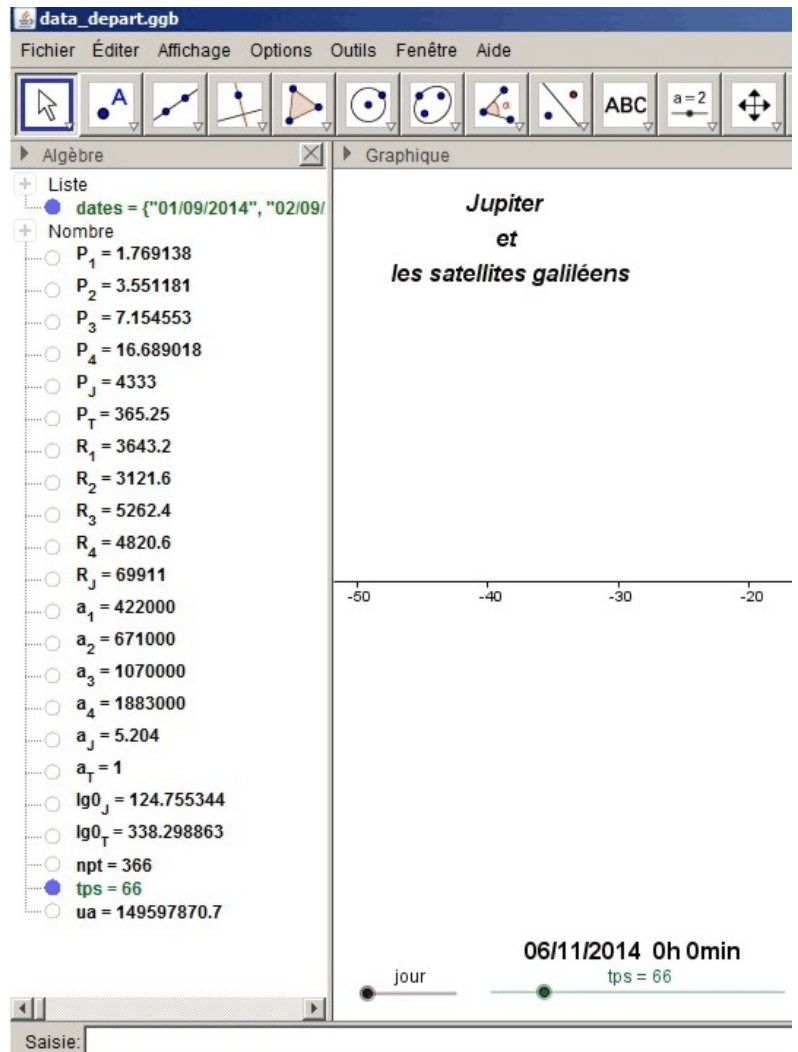
- demi-grand axe de l'orbite **a_T** (ua)
- période de révolution **P_T** (jours)
- longitude écliptique au temps origine **lg0_T** (degrés)

Satellites galiléens

- demi-grands axes **a₁, a₂, a₃, a₄** (km)
- rayons **R₁, R₂, R₃, R₄** (km)
- périodes de révolution **P₁, P₂, P₃, P₄** (jours)

Curseur temps

- curseur temps **tps** en jours sur un an
- un curseur [*jour, heure, minute*] permet de changer la valeur de l'incrément du curseur temps **tps**.
- liste **dates**, pour permettre l'affichage du temps par date (jour, heures et minutes) sur un an.
- **npt** nombre de points de la liste



Remarques :

Utilisation des curseurs : lorsque un curseur est sélectionné (en cliquant sur son trait le point mobile devient flou), les touches flèches du clavier permettent de l'incrémenter ou décrémente.

De plus en agissant sur les touches flèches et en tenant simultanément appuyé sur la touche :

- SHIFT : l'incrément est dix fois plus petit
- CTRL : l'incrément est dix fois plus grand

Utilisation du zoom : pour zoomer dans la fenêtre graphique, en plus ou en moins et ne pas partir n'importe où, il faut se souvenir que l'endroit où pointe le curseur de la souris reste immobile.