

LES PETITES PLANÈTES ICARUS GEOGRAPHOS ET TORO

par JEAN MEEUS et G. P. KÖNNEN

Parmi les 1 749 petites planètes actuellement numérotées, il en est trois qui s'approchent plus près du Soleil que la Terre, et qui pénètrent donc à l'intérieur de l'orbite terrestre. Ce sont Icarus, Geographos et Toro. (Les petites planètes Apollo, Adonis et Hermès, dont les distances au périhélie sont également inférieures à 1 unité astronomique, n'ont jamais été retrouvées ; elles ont été découvertes respectivement en 1932, 1936 et 1937.)

Icarus (« Icare » en français, mais nous utilisons le nom latin adopté internationalement) est la petite planète n° 1566. Elle fut découverte par Walter Baade, le 26 juin 1949, à l'aide du télescope Schmidt de 122 cm d'ouverture du Mont Palomar, en Californie.

Cette petite planète est particulièrement intéressante. On sait que la plupart des astéroïdes se meuvent autour du Soleil entre les orbites de Mars et de Jupiter. Or, le demi-grand axe de l'orbite d'Icarus est à peine supérieur à celui de l'orbite terrestre, tandis que l'excentricité orbitale est très grande. Il en résulte que, lorsqu'il vole vers son périhélie, Icarus pénètre à l'intérieur de l'orbite de Mercure, jusqu'à 28 millions de kilomètres seulement du Soleil, tandis que son aphélie l'entraîne au-delà de l'orbite de Mars, à 295 millions de kilomètres. Exception faite pour certaines comètes, Icarus s'approche plus du Soleil qu'aucun autre astre connu.

L'excentricité orbitale d'Icarus (0,827) est la plus grande connue pour une petite planète. Le terme de « planète » convient d'ailleurs assez mal : Icarus n'est qu'un gros rocher, d'un kilomètre de diamètre environ.

Geographos, la petite planète 1620, fut découverte le 14 septembre 1951 au Mont Palomar par A. Wilson et R. Minkowski. Cet astre ne pénètre pas à l'intérieur de l'orbite de Vénus, sa distance au périhélie étant de 0,827 UA. A l'aphélie, il se trouve à 1,662 UA du Soleil, soit un peu à l'extérieur de l'orbite de Mars. Le diamètre de Geographos est estimé à deux ou trois kilomètres.

Toro, la petite planète 1685, fut découverte le 17 juillet 1948 par Wirtanen à l'Observatoire Lick (Mont Hamilton), également en Californie. Son diamètre est d'environ deux kilomètres. Sa distance au périhélie est égale à 0,771 UA, tandis que l'aphélie (1,964 UA) se trouve à l'extérieur de l'orbite de Mars.

Les rapprochements de la Terre

On se rappelle qu'Icarus est passé à proximité de la Terre le 14 juin 1968 (voir, par exemple, *l'Astronomie* de mai 1968, pages 243-244). A son tour, Geographos a « frôlé » notre planète le 26 août 1969. Il nous a semblé intéres-

PLANÈTES ICARUS, GEOGRAPHOS ET TORO

sant de calculer les prochains passages des astéroïdes Icarus, Geographos et Toro au voisinage de la Terre. Nos résultats figurent au tableau I qui renferme tous les rapprochements à moins de 0,5 unité astronomique qui ont lieu entre les années 1961 et 2005.

La première colonne mentionne la date de la plus courte distance à la Terre. Les deux colonnes suivantes donnent cette distance, respectivement en unités astronomiques (UA) et en millions de kilomètres.

Enfin, la dernière colonne du tableau fait connaître la période (nombre de jours) pendant laquelle la distance à la Terre est inférieure à 0,5 UA. On constate que ce ne sont pas nécessairement les rapprochements serrés qui fournissent les plus longues périodes. En 1968, Icarus est passé à 6 millions de kilomètres seulement de la Terre, et sa distance est restée inférieure à 0,5 UA pendant 56 jours. En 1977 et 2005, pour les distances minimales beaucoup plus grandes, les périodes seront de 65 et de 59 jours.

Le cas est encore plus frappant pour Geographos. En 1969, cet objet est passé à 9 millions de kilomètres de nous, et sa distance est restée inférieure à 0,5 UA pendant 122 jours. En 1976 et en 2001, sa distance à la Terre sera inférieure à 0,5 U.A. pendant 283 jours (plus de neuf mois !), et pourtant Geographos ne s'approchera pas à moins de 40 millions de kilomètres.

En 1976 et en 2001, la distance Terre-Geographos passera par *deux* minimums ; entre ceux-ci, la distance passera par un maximum dont la valeur sera inférieure à 0,5 UA. :

minimum	0,388 UA	le 22 février 1976
maximum	0,418 UA	le 4 avril 1976
minimum	0,269 UA	le 24 juin 1976
minimum	0,388 UA	le 21 février 2001
maximum	0,418 UA	le 5 avril 2001
minimum	0,269 UA	le 26 juin 2001

Remarquez la similitude de ces nombres ! Nous parlerons plus loin des périodicités.

D'ici la fin du siècle, Icarus ne s'approchera plus à moins de 0,1 UA de la Terre. Le rapprochement de juin 1968 doit donc être considéré comme exceptionnel.

Le 25 août 1994, Geographos s'approchera encore plus près de nous qu'en 1969, plus près même qu'Icarus en 1968.

En 1969, la distance de Geographos à la Terre a été inférieure à 0,1 UA du 16 août au 6 septembre, soit pendant 21 jours. En 1968, Icarus s'était approché plus près de nous, mais sa distance a été inférieure à 0,1 UA pendant dix jours seulement. En 1994, la distance de Geographos à la Terre sera inférieure à 0,1 UA pendant 25 jours.

TABLEAU I. — RAPPROCHEMENTS A LA TERRE, DE 1961 A 2005

DATE	DISTANCE MINIMALE		DURÉE DE $\Delta < 0,5$ UA
	UA	10^6 km	
<i>1566 Icarus</i>			
1962 août 21	0,412	62	30 jours
1968 juin 14	0,042	6	56 —
1972 sept. 4.....	0,425	64	46 —
1977 juin 8	0,240	36	65 —
1978 juill. 2	0,404	60	24 —
1981 août 26	0,374	56	40 —
1986 juin 11	0,475	71	25 —
1987 juin 20	0,156	23	48 —
1990 août 14	0,483	72	13 —
1996 juin 10	0,114	17	61 —
2000 sept. 1.....	0,378	57	46 —
2005 juin 8	0,361	54	59 —
<i>1620 Geographos</i>			
1962 sept. 14	0,442	66	41 jours
1965 mars 4	0,271	41	85 —
1969 août 26	0,061	9	122 —
1976 févr. 22	0,388	58	283 —
1976 juin 24	0,269	40	
1983 mars 16.....	0,095	14	142 —
1987 sept. 11.....	0,376	56	60 —
1990 mars 3	0,324	48	74 —
1994 août 25	0,034	5	128 —
2001 févr. 21	0,388	58	283 —
2001 juin 26	0,269	40	
<i>1685 Toro</i>			
1964 août 9	0,128	19	111 jours
1968 févr. 4	0,400	60	49 —
1972 août 8	0,134	20	109 —
1976 févr. 3	0,383	57	53 —
1980 août 7	0,142	21	106 —
1984 févr. 2	0,366	55	57 —
1988 août 7	0,152	23	103 —
1992 févr. 1	0,350	52	61 —
1996 août 5	0,163	24	101 —
2000 janv. 31	0,333	50	64 —
2004 août 5	0,175	26	98 —

Éléments orbitaux

Pour la recherche des rapprochements figurant au tableau I, nous avons calculé la distance des trois petites planètes à la Terre à intervalles de quatre jours, et ce pour la période de quarante-cinq ans envisagée. Ce travail a été effectué à l'aide d'un ordinateur.

Les orbites ont été considérées comme fixes, c'est-à-dire qu'il n'a pas été tenu compte des perturbations : nous avons considéré un mouvement purement képlérien. Dans le cas de l'orbite terrestre, une excentricité égale à 0,01672 a été adoptée, ce qui correspond à l'année 1974. Nous avons donc

négligé la lente rotation du plan de l'écliptique (47" par siècle), ainsi que la lente diminution de l'excentricité orbitale.

En négligeant cette variation de l'excentricité de l'orbite terrestre, l'erreur *après un siècle* atteint au plus : 0,000 0418 UA (soit 6 250 km) pour le rayon vecteur, et 17",25 pour l'équation du centre. Cette dernière valeur correspond à 12 500 km dans l'orbite. Ces écarts sont négligeables pour le but poursuivi.

Cependant, dans le cas des petites planètes, *les perturbations ne sont pas négligeables*. Les orbites sont sensiblement modifiées par les passages à proximité de la Terre. Pour tenir compte de ces changements, nous avons utilisé deux orbites différentes pour Icarus, et trois pour Geographos. Dans le cas de Toro, qui ne s'approche pas à moins de 0,13 UA de la Terre au cours de la période considérée, une seule orbite a été utilisée.

TABLEAU II. — ÉLÉMENTS ORBITAUX

ORBITE PLANÈTE	A Icarus	B Icarus	C Geographos	D Geographos	E Geographos	F Toro
Époque (o h)	1949 juin 23	1968 août 12	1968 mai 24	1969 oct. 26	1994 août 26	1968 mai 24
a (UA)	1,0777	1,077 875	1,2439	1,244 676	1,245 434	1,3677
e	0,826 668	0,826 607	0,335 139	0,335 306	0,335 682	0,435 969
Ω	87°,772	87°,6334	336°,874	336°,8648	336°,6652	273°,961
ω	30°,878	31°,0376	276°,340	276°,4047	276°,6943	126°,571
i	22°,994	22°,947	13°,325	13°,327	13°,334	9°,370
M	52°,369	89°,9268	75°,403	84°,7407	42°,6778	96°,881
n	0°,880 9319	0°,880 7471	0°,710 4108	0°,709 7734	0°,709 1250	0°,616 2167
P (jours)	408,66	408,74	506,75	507,20	507,67	584,21
q (UA)	0,1868	0,1869	0,8270	0,8273	0,8274	0,7714
Δ_{\min} (UA)	0,0377	0,0372	0,0314	0,0315	0,0307	0,0492

Les éléments orbitaux figurent au tableau II. La longitude du nœud ascendant Ω , l'argument du périhélie ω , et l'inclinaison i se rapportent à l'équateur et à l'écliptique de 1950,0. M est l'anomalie moyenne à l'époque ; n est le moyen mouvement diurne, P la période de révolution sidérale, et q la distance périhélie. Les orbites A, C et F, calculées par S. Herrick, R. Reichert et P. Tiffany, ont été publiées dans l'annuaire soviétique, des petites planètes (Léningrad). Les éléments orbitaux B, D et E, calculées par P. Tiffany sous la direction du Dr S. Herrick, nous ont été aimablement communiqués par ce dernier.

La dernière ligne du tableau contient la plus courte distance entre les orbites de la Terre et de la petite planète. Le calcul de cette distance minimale — qui est un problème de géométrie à trois dimensions ! — a été effectué selon la méthode que nous avons décrite dans *Ciel et Terre* de novembre-décembre 1963, pages 398-406. On remarque que Geographos peut s'approcher plus près de la Terre qu'Icarus, jusqu'à 4,6 millions de kilomètres, soit douze fois la distance de la Lune.

L'orbite B_a a été calculée pour une date postérieure de deux mois au rapprochement serré du 14 juin 1968. On remarque que ce rapprochement a eu pour effet d'allonger la période de révolution de la petite planète de 0,08 jour (deux heures).

De même, l'orbite D a été calculée pour une époque postérieure de deux mois au rapprochement du 26 août 1969. L'influence gravitationnelle de la Terre a eu pour effet d'allonger la période de Geographos de 11 heures, tandis que l'inclinaison orbitale est restée pratiquement inchangée. Le rapprochement de 1994 aura pour effet d'allonger de nouveau la période d'environ un demi-jour.

Pour Icarus, l'orbite A a été utilisée pour le calcul des rapprochements à la Terre jusqu'en 1968. Pour la période 1969-2005, c'est l'orbite B qui a été utilisée. Pour Geographos, l'orbite C a servi pour le calcul des rapprochements jusqu'en 1969, l'orbite D pour la période 1970-1994, et l'orbite E pour la période 1994-2005.

Pour chacune de ces périodes, l'orbite utilisée a été considérée comme étant invariable. Le choix de nouveaux éléments orbitaux après chaque rapprochement serré avec la Terre a permis de tenir compte des modifications importantes de l'orbite, tout en évitant le calcul fastidieux des perturbations.

Dans le cas d'Icarus et de Geographos, qui peuvent se rapprocher fortement de la Terre, il n'est pas permis de négliger ces modifications de l'orbite. Par exemple, en continuant à utiliser l'orbite C de Geographos après le rapprochement de 1969, on trouverait pour la plus courte distance en 1994 la valeur de 0,122 UA (18 millions de kilomètres), alors que la valeur exacte est de 0,034 UA (5 millions de kilomètres).

Périodicités

La période de révolution sidérale de Toro est égale à 584,21 jours. Cinq révolutions de la petite planète, soit 2921 jours, durent donc sensiblement huit années terrestres. Il en résulte que les rapprochements avec la Terre se reproduisent, presque jour pour jour, après un laps de temps de huit ans. Au tableau I, nous constatons en effet l'existence de deux séries :

début août : 1964, 1972, 1980, 1988, 1996, 2004,

début février : 1968, 1976, 1984, 1992, 2000.

Examinons le cas d'Icarus. Dans le cas de l'orbite A (tableau II), la période de révolution est égale à 408,6581 jours, soit 1,118 826 fois la période sidérale de la Terre. Il en résulte que 8, 17, 25, 42 et 101 périodes sidérales de la petite planète sont respectivement égales à :

9 ans	—	18,0 jours
19 ans	+	7,3 jours
28 ans	—	10,7 jours
47 ans	—	3,4 jours
113 ans	+	0,5 jour

PLANÈTES ICARUS, GEOGRAPHOS ET TORO

Par conséquent, les rapprochements avec la Terre se produisent par séries à intervalles de 9, 19, 28 et 47 ans. Par exemple :

- 9 ans : 1968, 1977, 1986 et 1972, 1981, 1990 ;
- 19 ans : 1962, 1981, 2000 et 1968, 1987 ;
- 28 ans : 1962, 1990 et 1968, 1996.

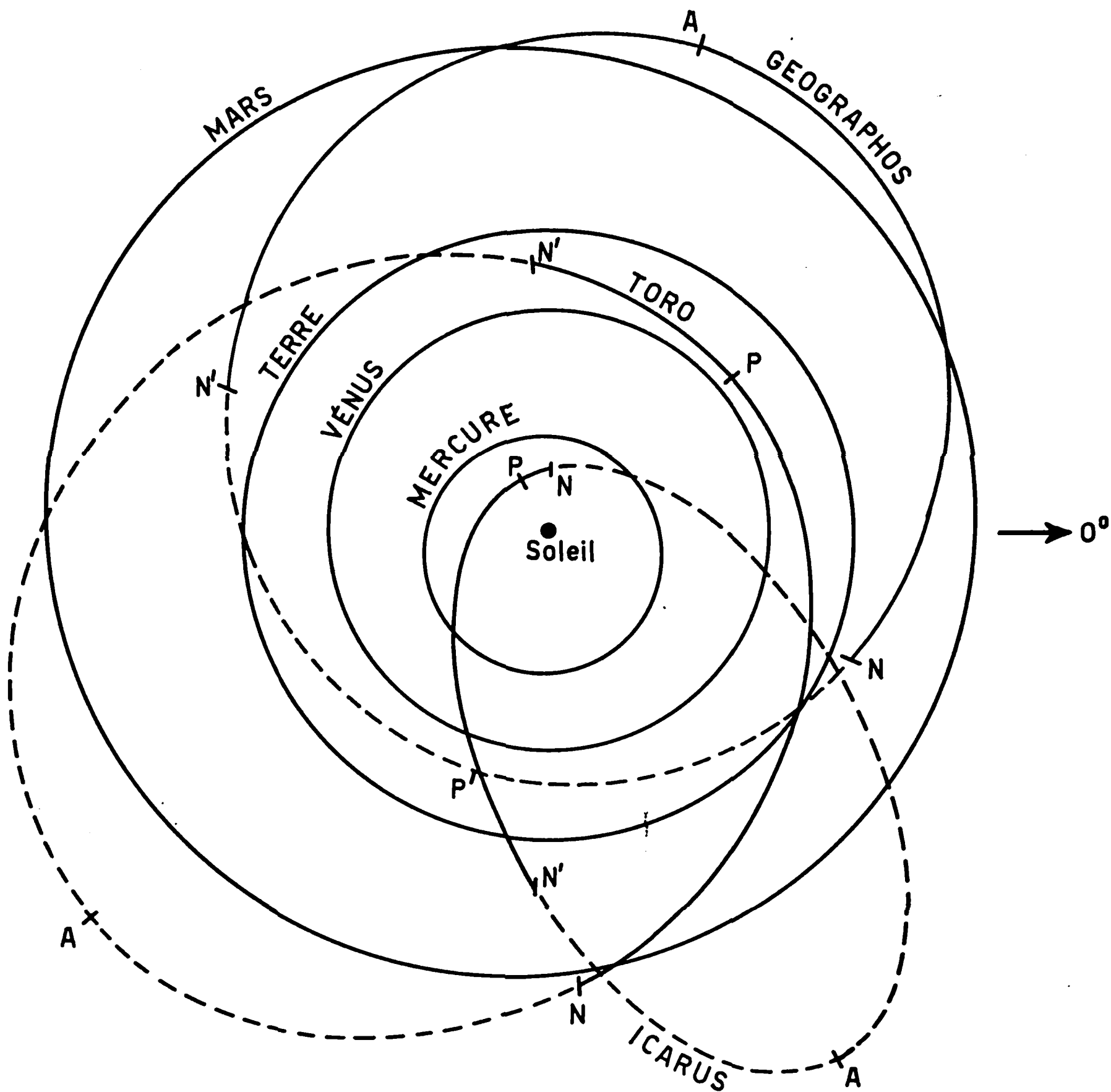


Fig. 216. — Les orbites des planètes Mercure, Vénus, la Terre et Mars, et des trois petites planètes exceptionnelles Icarus, Geographos et Toro.

Les parties en tirets se trouvent au sud du plan de l'écliptique. N et N' sont les nœuds ascendant et descendant; P est le périhélie, A est l'aphélie. Pour Mercure, Vénus et Mars, les nœuds n'ont pas été représentés. La flèche indique la direction du point vernal (longitude zéro).

On pourrait croire que la période de 113 ans est bien meilleure encore, l'écart n'étant que d'un demi-jour. L'examen de l'orbite B nous enlève cependant cette illusion : dans ce cas, la période de la petite planète est devenue 408,7439 jours, ou 1,119 060 année sidérale de la Terre. On en déduit les périodicités suivantes :

9 ans	—	17,4 jours
19 ans	+	8,8 jours
28 ans	—	8,6 jours
47 ans	+	0,2 jour
113 ans	+	9,2 jours

Si la périodicité de 47 ans est maintenant excellente, celle de 113 ans a perdu son intérêt. Conclusion : *méfions-nous des périodicités de longue durée : elles sont illusives*, car après de tels laps de temps l'orbite s'est sensiblement modifiée.

Le phénomène est encore plus frappant dans le cas de Geographos, où nous trouvons les périodicités suivantes :

<i>Orbite C</i>	<i>Orbite D</i>	<i>Orbite E</i>
25 ans — 9,9 jours	25 ans — 1,7 jour	25 ans + 6,61 jours
68 ans — 6,7 jours	68 ans + 15,6 jours	68 ans + 38,3 jours
82 ans — 52,8 jours	82 ans — 26,0 jours	82 ans + 1,4 jour
154 ans — 0,3 jour	154 ans + 50,2 jours	154 ans + 101,7 jours!

La périodicité de 154 ans, excellente dans le cas de l'orbite C, n'a plus aucun sens pour l'orbite E. Au contraire, nous avons alors une bonne périodicité de 82 ans, qui est illusoire dans le cas de l'orbite C. Seule la période de 25 ans a un sens, du moins jusqu'à la fin de ce siècle. On la retrouve au tableau I :

1962-1987, 1965-1990, 1969-1994 1976-2001

Les rapprochements serrés du mois d'août (1969, 1994) ont lieu près du nœud ascendant N de l'orbite de Geographos. Ceux de mars (1983) se produisent au nœud descendant N' (voir figure 216).